



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE DE GEOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

PEGUY NOEL NKOUMEN NEMZOUÉ

**GEODIVERSIDADE E COMUNIDADES BENTÔNICAS DA PLATAFORMA
CONTINENTAL LESTE DO CEARÁ: INDICADORES E LINHA DE BASE
AMBIENTAL PARA A SUSTENTABILIDADE DA ECONOMIA AZUL**

FORTALEZA

2024

PEGUY NOEL NKOUMEN NEMZOUÉ

GEODIVERSIDADE E COMUNIDADES BENTÔNICAS DA PLATAFORMA
CONTINENTAL LESTE DO CEARÁ: INDICADORES E LINHA DE BASE AMBIENTAL
PARA A SUSTENTABILIDADE DA ECONOMIA AZUL

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará - UFC, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Geologia. Área de concentração: Geologia Sedimentar e Paleontologia.

Orientadora: Profa. Dra. Narelle Maia de Almeida.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N1g Nkouamen Nemzoue, Peguy Noel.
Geodiversidade e comunidades bentônicas da plataforma continental leste do Ceará: indicadores e linha de base ambiental para a sustentabilidade da economia azul / Peguy Noel Nkouamen Nemzoue. – 2024.
95 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2024.
Orientação: Profª. Dra. Narelle Maia De Almeida.

1. Foraminíferos. 2. Componentes bióticos. 3. Margem equatorial brasileira. I. Título.
CDD 551

PEGUY NOEL NKOUMEN NEMZOUÉ

GEODIVERSIDADE E COMUNIDADES BENTÔNICAS DA PLATAFORMA
CONTINENTAL LESTE DO CEARÁ: INDICADORES E LINHA DE BASE AMBIENTAL
PARA A SUSTENTABILIDADE DA ECONOMIA AZUL

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Geologia. Área de concentração: Geologia Sedimentar e Paleontologia.

Aprovada em: 18/12/2024.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Narelle Maia de Almeida (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Antônio Rodrigues Ximenes Neto
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Profa. Dra. Lidriana de Souza Pinheiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Moab Praxedes Gomes
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Profa. Dra. Patrícia Pinheiro Beck Eichler
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

A Deus.

Aos meus pais, Paul (*in memoriam*) e Florence Nemzoue, aos meus irmãos, irmãs, a meus amores à vida Ryan Fongang e Félicia Fongang.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará (UFC) por me proporcionar através do Programa de Pós-graduação em Geologia (PPGG) a oportunidade de desenvolver pesquisas científicas e por ser a área fonte dos conhecimentos adquiridos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo financiamento da bolsa de estudos através do PPGG, disponibilizando os recursos e infraestrutura necessários para a consolidação deste estudo e a manutenção do programa de pós-graduação.

Ao falecido Prof. Dr. George Satander Sá Freire por me dar oportunidade de iniciar meus estudos de Pós-graduação através de incentivos, auxílios, conhecimentos, confiança, dedicação, paciência, amizade construída e pela presença durante essa caminhada do doutorado.

À minha Orientadora Profa. Dra. Narelle Maia de Almeida pela ajuda e disponibilidade espontânea, por acreditar em mim, pela motivação, por se juntar a mim na busca de uma melhor saída para solucionar e enfrentar todos os desafios durante a execução deste trabalho.

Aos membros da banca do exame de qualificação deste doutoramento, Profs. Drs. Moab Gomes e Patrícia Eichler, por todas as contribuições.

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Geologia (PPGG) do Departamento de Geologia (DEGEO) da UFC pelas aulas e sugestões para a melhoria do trabalho. Especialmente aos coordenadores do programa de Pós-graduação, os Profs. Drs. Cynthia Duarte e César Veríssimo, pelas significativas contribuições em macro e microescala que aperfeiçoaram a estrutura deste trabalho.

Aos professores e colegas do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Aplicada à Energia (LGMA) pelo apoio prestado ao longo da execução de todo o trabalho.

À Universidade de Iaundé I no Camarões que me concedeu meus conhecimentos de graduação e pós-graduação, especialmente aos Profs. Drs. Jean Pierre Tchouankoue, Kamgang, Kombou Charles, Ndjigui, Zenthi, Nguetchoua Gabriel, Temdjim robert, Mouafo Lucas, Simeni Nicole e Ngo Belnoun Rose.

À minha família Metchindji e Tchakounte pela vida, reconforto e amor de sempre.

À Félicien Fongang por ficar sempre ao meu lado quando precisava e que sempre me apoiou desde o início da graduação até presente momento, obrigada por tudo.

À mãe Héléne (em memória) pelos conselhos que me ajudaram a ser essa mulher forte hoje. De onde você está, Mahé, eu vou conseguir finalizar o Doutorado, mamãe.

À minha avó e Tchana Josette pela hospitalidade e tempo de troca durante todo o tempo de graduação.

À Ms. Agathe Arrissa Noucoucouk pelo apoio, atenção e disponibilidade durante esses quatro anos de pesquisa para o desenvolvimento desta tese. Em nome da Profa. Dra. Piovesan e do Dr. Melo, também agradeço ao Laboratório de Micropaleontologia Aplicada da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

À Cristiane Barroso, do Departamento de Biologia da UFC, pela ajuda com as análises dos componentes bióticos.

A minhas tias, tios e, particularmente, a Sandrine e Axelle, pela disponibilidade e conselho em todo tempo que precisava. Muito obrigada, meus amores.

Aos meus amigos de sempre, Felicite, Claude, Joseline, Arnold, François, Noel, Anne Laure, Liliane (em memória) que me motivam sempre.

A todos os amigos que fiz durante a pós-graduação, Mário, Catarina, Guirino, Cláudio, Irineudo, Victoire e Babá.

À grande família Lavor onde eu morei cerca de quatro anos, só Deus lhe recompensará. Sem me esquecer da família Brener, também endereço os meus profundos agradecimentos.

Para finalizar, endereço a todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram-me durante toda a caminhada.

Muito obrigada!

RESUMO

A plataforma continental leste do Ceará (PCLC) apresenta um enorme potencial para a geração de energia eólica offshore. Além disso, possui sedimentos bioclásticos que tem sido de interesse de diversos setores industriais devido à alta concentração de minerais carbonáticos. Apesar do conhecimento prévio sobre as fácies sedimentares desta região, a mesma carece de informações sobre sua assembleia bentônica, sendo esta uma lacuna científica significativa, principalmente quando relacionada aos indicadores ambientais e às características ecológicas. Desta forma, este estudo objetivou, mapear os componentes bióticos, com foco nos foraminíferos bentônicos, dos sedimentos superficiais da PCLC e correlacioná-los com a geodiversidade marinha a fim de caracterizar a ecologia deste ambiente e produzir uma linha de base inédita e essencial para estudos de monitoramento ambiental. Para tais propósitos, foram utilizados dados de sensores remotos, batimetria e amostras de sedimentos. A análise sedimentológica identificou briozoários (35,5%), algas calcárias (27%), foraminíferos (12,3%), moluscos (12%), cnidários (4%), equinodermos (3,9%), poríferos (3,5%) e artrópodes (1,7%) como principais componentes bióticos. As análises de componentes principais revelaram correlações positivas entre algas calcárias, poríferos e cnidários com profundidades de 20 - 40 m, zonas de dunas transversais e construções recifais, e a fácies areia bioclástica. Artrópodes foram associados a profundidades de 40-60 m e à fácies areia biolitoclástica, enquanto equinodermos e moluscos predominam em regiões mais rasas (0 - 20 m), associados às zonas de sedimentos em suspensão e às fácies de cascalho bioclástico e areia bioclástica com cascalho. Em relação aos foraminíferos bentônicos, 14 gêneros epifaunais e 6 infaunais foram identificados. A maioria das amostras apresentou diversidade moderada e há ausência de espécies extremamente dominantes. Os índices de diversidade de Shannon-Wiener, Uniformidade e Dominância sugerem que a condição da água na PCLC é favorável para o habitat de foraminíferos. Este trabalho comprova a relação entre a geodiversidade e os componentes bióticos na PCLC e mostra como os fatores abióticos influenciam na distribuição da biocenose da região. A distribuição equilibrada dos foraminíferos reflete uma comunidade bentônica estável, típica de ambientes bem oxigenados e oligotróficos. Esse conhecimento é particularmente importante para avaliar possíveis futuras mudanças ambientais e apoiar estratégias de manejo, subsidiando o desenvolvimento sustentável da PCLC no âmbito da Economia Azul.

Palavras-chave: foraminíferos; componentes bióticos; margem equatorial brasileira.

ABSTRACT

The Eastern Continental Shelf of Ceará (PCLC) has enormous potential for offshore wind energy generation. In addition, it has bioclastic sediments that have been of interest to several industrial sectors due to the high concentration of carbonate minerals. Despite previous knowledge about the sedimentary facies of this region, it lacks information about its benthic assemblage, which is a significant scientific gap, especially when related to environmental indicators and ecological characteristics. Thus, this study aimed to map the biotic components, focusing on benthic foraminifera, of the surface sediments of the PCLC and correlate them with marine geodiversity in order to characterize the ecology of this environment and produce a new and essential baseline for environmental monitoring studies. For such purposes, data from remote sensing, bathymetry and sediment samples were used. Sedimentological analysis identified bryozoans (35.5%), calcareous algae (27%), foraminifera (12.3%), molluscs (12%), cnidarians (4%), echinoderms (3.9%), porifera (3.5%) and arthropods (1.7%) as the main biotic components. Principal component analyses revealed positive correlations between calcareous algae, porifera and cnidarians with depths of 20 - 40 m, zones of transverse dunes and reef constructions, and the bioclastic sand facies. Arthropods were associated with depths of 40-60 m and the biolithoclastic sand facies, while echinoderms and molluscs predominate in shallower regions (0 - 20 m), associated with suspended sediment zones and the bioclastic gravel and bioclastic sand with gravel facies. Regarding benthic foraminifera, 14 epifaunal and 6 infaunal genera were identified. Most samples showed moderate diversity and there was an absence of extremely dominant species. The Shannon-Wiener diversity, Uniformity and Dominance indices suggest that the water condition in the PCLC is favourable for foraminiferal habitat. This work proves the relationship between geodiversity and biotic components of the study area, showing that abiotic factors influence the distribution of the biocenosis. The balanced distribution of foraminifera reflects a stable benthic community, typical of well-oxygenated and oligotrophic environments. This knowledge is particularly important to assess possible environmental changes and support management strategies, subsidizing the sustainable development of the PCLC within the scope of the Blue Economy.

Keywords: foraminifera; biotic components; brazilian equatorial margin.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Localização da área de estudo na plataforma continental leste do Estado do Ceará, margem equatorial brasileira 15
- Figura 2 - Alguns exemplos de biodetritos da Plataforma Continental Brasileira, sendo: A- formados por conchas de moluscos, ou “concheiros”, no Rio Grande do Sul (CORRÊA *et al.*, 2019), B- agregados carbonáticos de recifes altifóticos em Abrolhos (BA) (autor), C- fundo totalmente recoberto por talos de Halimeda próximos ao Parcel de Manoel Luís (MA) (DIAS *et al.*, 2021), D- Bioclastos resultantes da fragmentação das algas calcárias na Bacia de Santos, (Projeto de Caracterização Regional da Bacia de SantosPRC-BS,), E- cascalhos carbonáticos da plataforma continental cearense (XIMENES NETO *et al.*, 2018), F- foraminíferos bentônicos (Fontes *et al.*, 2017) e G- fragmentos de briozoários que compõem os bioclastos da plataforma da Bacia de Sergipe-Alagoas (FONTES *et al.*, 2017). 21
- Figura 3 - Correntes Norte do Brasil (CNB) e Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) formadas a partir da bifurcação da corrente Sul Equatorial (CSEq).. 24
- Figura 4 - Dois principais tipos de coberturas sedimentares na Plataforma Semiárida Cearense: A) Carbonática e B) Siliciclástica. Na figura (A) é evidenciada um substrato rico em artículos da alga calcária verde do Gênero Halimeda. Na figura (B) o substrato siliciclástico é predominante com presença dispersa nas calhas de ripples de fragmentos bioclásticos. 25

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agencia Nacional de Petróleo, Gás e Combustíveis
BNDO	Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
CNB	Corrente Norte Brasileira
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GEBCO	General Bathymetric Chart of Oceans
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LGMA	Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Aplicada à Energia
PCA	Principal Component Analysis
REMAC	Projeto Reconhecimento Global da Margem Continental
REMLAC	Programa de Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma
SIG	Sistema de Informação Geográfica
UFC	Universidade Federal do Ceará
USGS:	United State of the Geological Survey
UTM	Universal Transversa de Mercator
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Estrutura da tese	14
1.2	Objetivos	14
1.2.1	<i>Geral</i>	14
1.2.2	<i>Específicos</i>	14
1.3	Área de estudo	15
2	ESTADO DA ARTE	18
2.1	Geodiversidade marinha no Brasil.....	18
2.2	Biocenose da plataforma continental brasileira.....	20
2.3	Importância dos foraminíferos como indicadores ambientais.....	21
2.4	Aspectos oceanográficos e climáticos.....	22
2.5	Cobertura sedimentar da plataforma continental do Ceará.....	25
2.6	Economia Azul na Plataforma Continental Leste do Ceará.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODO	30
3.1	Dados Processamento digital de imagens.....	30
3.2	Dados batimétricos	31
3.3	Análise de sedimentos	31
3.4	Análise estatísticas	32
4	BENTHONIC ASSEMBLY AND ITS CORRELATION WITH THE GEODIVERSITY OF THE EAST CONTINENTAL SHELF OF CEARÁ (BRAZILIAN EQUATORIAL MARGIN)	33
4.1	Introduction	35
4.2	Study area and regional setting	37
4.3	Materials and methods	38
4.3.1	<i>Acquisition and processing of bathymetry data</i>	38
4.3.2	<i>Acquisition and Treatment of Landsat 8 images data</i>	39
4.3.3	<i>Acquisition and processing of the sedimentological samples</i>	39
4.3.4	<i>Statistical treatment</i>	39
4.4	Results.....	40
4.4.1	<i>Seabed geomorphology as an indicator of marine geodiversity</i>	40
4.4.2	<i>Representation and distribution of the benthic communities in the Ceará</i>	45

	<i>continental shelf</i>	
4.4.3	<i>PCA: how the geodiversity and the benthic communities are related?</i>	47
4.5	Discussions.....	49
4.6	Conclusions	51
5	BENTHIC FORAMINIFERA AS ENVIRONMENTAL INDICATORS:	59
	A CASE STUDY FROM THE EASTERN CONTINENTAL SHELF OF	
	CEARÁ, EQUATORIAL MARGIN OF BRAZIL	
5.1	Introduction	59
5.2	Materials and Methods	61
5.3	Results.....	63
5.3.1	<i>Foraminifera diversity and ecology</i>	63
5.3.2	<i>Benthic foraminifera assemblages</i>	65
5.4	Discussion	68
5.5	Conclusions.....	72
6	CONCLUSÕES	82
	REFERÊNCIAS	85

1 INTRODUÇÃO

No ambiente marinho, os estudos da paisagem têm sido utilizados como uma ferramenta importante para caracterização dos ambientes costeiros, bentônicos e pelágicos (ROFF *et al.*, 2003; CONNOR, *et al.*, 2004; PITTMAN & BROWN, 2011). O termo geodiversidade pode ser definido como as particularidades do meio físico que condicionam as características da paisagem e, conseqüentemente, a diversidade biológica (CPRM, 2006). Desta forma, os elementos geológicos têm uma importância na paisagem, na evolução da diversidade biológica e no fornecimento de recursos minerais para a sociedade (GRAY, 2008); e conhecer a geodiversidade permite uma boa avaliação das aptidões e restrições quanto ao uso do meio físico, além dos impactos que podem resultar do seu uso inadequado (PESSOA *et al.*, 2018).

A geodiversidade do fundo do marinho está relacionada à heterogeneidade do meio físico e reflete a diversidade de habitats e a variação de recursos associados (KASKELA *et al.*, 2017). Os elementos abióticos (salinidade, a temperatura, as correntes marinhas, a luminosidade da coluna d'água, as amplitudes de maré, a ação de ondas, a estratificação e os nutrientes da coluna d'água) e/ou fisiográficos (os movimentos tectônicos, a profundidade, o tipo de substrato geológico e a geomorfologia do fundo marinho) de uma determinada área exercem controle sobre a biocenose marinha (ROFF & TAYLOR, 2000).

A biocenose marinha pode ser definida como a comunidade de organismos vivos que habita os sedimentos encontrados nos fundos marinhos (MÖBIUS, 1877, *in* KELLER & GOLLEY, 2000). A biocenose de sedimentos marinhos é extremamente diversificada e inclui uma ampla gama de organismos, desde bactérias e protozoários microscópicos até vermes, crustáceos, moluscos, equinodermos e peixes. Essa comunidade de organismos desempenha papéis importantes nos ecossistemas marinhos, contribuindo para processos como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes, a aeração dos sedimentos, a sedimentação e a formação de habitat para outras espécies (AGER, 1963).

A biocenose dos sedimentos pode fornecer informações valiosas sobre as condições ambientais, como qualidade da água, disponibilidade de nutrientes, níveis de poluição e oxigenação do ambiente. A presença, ausência e saúde dos organismos nos sedimentos podem refletir a saúde geral do ecossistema. E ainda, as mudanças dos componentes bióticos dos sedimentos podem ser indicadores de perturbações ambientais. Os foraminíferos são considerados como o grupo mais importante da macrofauna bentônica por

serem abundantes e se apresentarem em numerosas espécies. Além disso, são muito utilizados como proxies ecológicos para ambientes marinhos (JORISSEN *et al.*, 2007).

A composição e a diversidade da biocenose de sedimentos marinhos podem variar significativamente de acordo com fatores como tipo de sedimento, profundidade, salinidade, temperatura, intensidade fótica, disponibilidade de nutrientes e grau de perturbação ambiental (RICKLEFS, 2003; PONZI, 2004; WRIGHT; BURGESS, 2005). Dentre os elementos abióticos utilizados para caracterizar a paisagem marinha, o tipo de substrato é de grande importância, pois define o habitat e a composição das comunidades associadas (COLTMAN; *et al.*, 2008).

A plataforma continental leste do Estado do Ceará (PCLC), margem equatorial brasileira, apresenta um clima único entre as regiões semiáridas da Terra (MOLION & BERNARDO, 2002). É caracterizada por temperaturas quentes, baixa pluviosidade e ventos intensos (KAYANO & ANDREOLI, 2009; LIRA *et al.*, 2011; SILVA PESSOA, 2021). Caracteriza-se como uma plataforma rasa, estreita, com baixo aporte sedimentar e sedimentação mista, carbonática-siliciclástica (FREIRE, 1985; COUTINHO, 1996; FREIRE & CAVALCANTI, 1998; MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2021). Devido a estas características, a PCLC tem atraído a atenção de alguns setores da Economia Azul, tais como o setor energético, que visa a instalação de parques eólicos offshore (ORTIZ & KAMPEL, 2011; SILVA & GOMES, 2019), e o setor mineral, que visa a exploração de granulados carbonáticos (PAIVA *et al.*, 2023).

As pesquisas desenvolvidas na PCLC são muitas vezes limitadas à caracterização faciológica sem integração com os componentes bióticos da sedimentação (MONTEIRO, 2011; LIMA, 2019; MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2021). Por isso, há uma considerável lacuna científica sobre a relação entre a geodiversidade e a biocenose marinha da PCLC. Não se sabe quais são os principais componentes bióticos da PCLC e nem como os fatores abióticos controlam sua distribuição. Consequentemente, não se conhece sobre as condições ambientais, como qualidade da água, disponibilidade de nutrientes, níveis de oxigenação e sobre a saúde geral do ecossistema da região.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo testar a seguinte hipótese: ‘Os componentes abióticos profundidade, fácies sedimentares e morfologia de fundo controlam a distribuição da biocenose da PCLC a qual indica que este ambiente marinho plataformar está sob condições ecológicas de equilíbrio ambiental.

1.1 Estrutura da tese

Esta tese é composta por oito capítulos. O capítulo I corresponde à parte introdutória, onde é feita a contextualização da temática em estudo. São apresentados a hipótese, os objetivos e a localização da área de estudo. No capítulo II é apresentado o estado da arte, onde é abordado sobre a geodiversidade marinha no Brasil, biocenose da plataforma continental brasileira, importância dos foraminíferos como indicadores ambientais, aspectos oceanográficos e climáticos, cobertura sedimentar da plataforma continental do Ceará e a economia Azul na Plataforma Continental Leste do Ceará. O capítulo III apresenta de uma forma geral os materiais e métodos usados no estudo. Nos capítulos IV e V são apresentados os resultados constituídos por dois artigos. O primeiro artigo intitulado: *ASSEMBLEIA BENTÔNICA E SUA CORRELAÇÃO COM A GEODIVERSIDADE DA PLATAFORMA CONTINENTAL LESTE DO CEARÁ (MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA)* foi publicado na revista *Quaternary and Environmental Geosciences*. O segundo artigo intitulado: *BENTHIC FORAMINIFERA AS ENVIRONMENTAL INDICATORS: A CASE STUDY FROM THE EASTERN CONTINENTAL SHELF OF CEARÁ EQUATORIAL MARGIN OF BRAZIL*. Por fim, o capítulo VI apresenta as considerações finais resultantes das constatações deste estudo, seguidas de recomendações, e o capítulo VII apresenta toda a referência bibliográfica usada na pesquisa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Mapear os componentes bióticos, com foco nos foraminíferos bentônicos, dos sedimentos superficiais da plataforma continental leste do Estado do Ceará e correlacioná-los com a geodiversidade marinha a fim de reconhecer padrões ecológicos deste ambiente e produzir uma linha de base inédita e essencial para estudos de monitoramento ambiental para o uso sustentável dos recursos naturais da região.

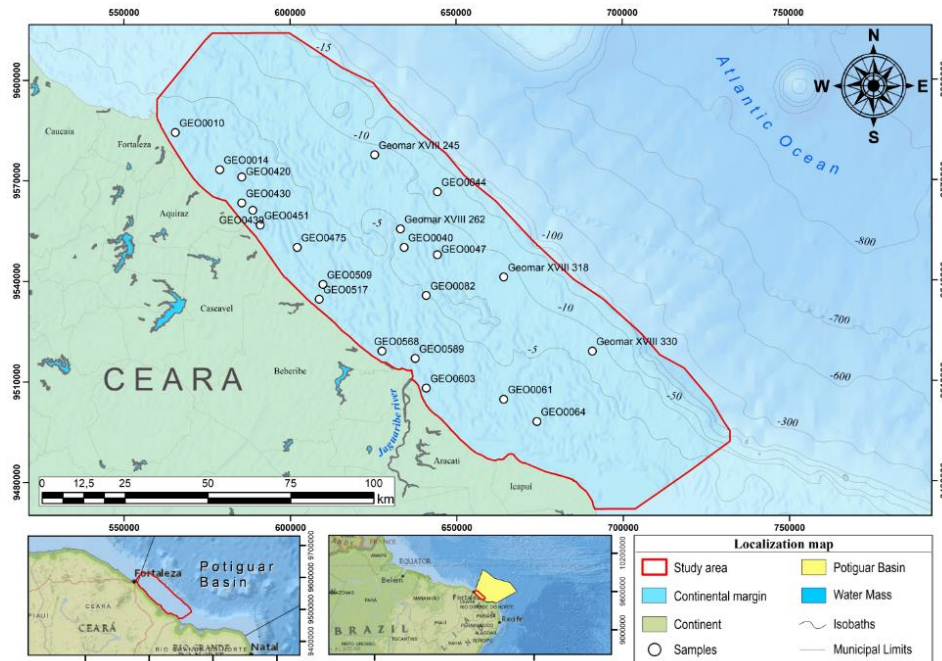
1.2.2 Específicos

- a) Compreender as relações entre os principais grupos da assembleia bentônica e os elementos abióticos da geodiversidade marinha ao longo da PCLC;
- b) Interpretar a distribuição espacial dos foraminíferos bentônicos e suas características em função das condições ambientais predominantes, com ênfase na oxigenação, disponibilidade de alimento e dinâmica sedimentar;
- c) Avaliar os índices de diversidade, uniformidade e dominância da comunidade de foraminíferos bentônicos como indicadores da qualidade ecológica deste ambiente marinho;
- d) Interpretar os indicadores ambientais e realizar a caracterização ecológica da área de estudo para subsidiar a gestão dos seus ecossistemas marinhos.

1.2 Área de estudo

A área de estudo está localizada na plataforma continental leste do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas geográficas longitudinais de 39°00' W e 37°00' W e latitudinais de 5°00' S e 3°30' S, entre a capital Fortaleza e o município de Icapuí. Possui cerca de 63 km de largura, limitando-se ao sul pela linha de costa dos municípios de Fortaleza, Aquiraz, Cascavel, Beberibe, Fortim, Aracati e Icapuí; e ao norte ao Oceano Atlântico (Figura 1). A área de estudo está inserida na Bacia Potiguar a qual se estende pelos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará.

Figura 1 - Localização da área de estudo na plataforma continental leste do Estado do Ceará, margem equatorial brasileira



Fonte: Elaborado pela autora

A plataforma continental do Ceará possui largura que varia cerca de 100 km na altura de Camocim até aproximadamente 40 km, em Icapuí (FREIRE, 1985). Coutinho e Moraes (1970) subdividem a plataforma em três setores de acordo com suas características sedimentológicas e morfológicas: interna (até 20 m de profundidade), média (entre 20 e 40 m de profundidades) e externa (de 40 m até a zona da quebra da plataforma que se dá por volta de 60 – 70 m).

A plataforma interna limita-se a profundidade de 20 m, apresenta um relevo regular com declive bem acentuado até a isóbata de 10 à 15 m. Após essa profundidade, o relevo apresenta algumas irregularidades devido à ocorrência de recifes submersos, canais e ondulações cobertos com areia terrígena e muito pouco cascalho e lama. Os gradientes variam de quase nulos a 1:1150 (SILVA FILHO, 2004) com teor de carbonato de cálcio inferior a 25%.

A plataforma média (20 – 40 m), por sua vez, é caracterizada por várias quebras de declividade, conformando patamares que caracterizam uma ruptura múltipla em degraus. Essas rupturas múltiplas em degraus correspondem a antigas linhas de costa. Em decorrência disso, os gradientes são bem variados, alcançando valores entre 1:570 a 1:190 nas quebras mais pronunciadas. Os referidos patamares correspondem a terraços de borda de plataforma. Estes são bem caracterizados no setor próximo a Fortaleza, onde ocorre um primeiro nível entre 23 e 26 m de profundidade, e um segundo, entre 30 e 40 m. No setor próximo à desembocadura do Rio Jaguaribe, a tendência é de que os patamares ocorram a maiores

profundidades, com o primeiro, entre 26 e 34 m e o segundo em torno de 47 m. Já no extremo sudeste da plataforma continental cearense, o relevo da plataforma média torna-se mais regular, sem patamares bem individualizados (FREIRE, 1985).

A plataforma externa vai de 40 m até a quebra da plataforma, que no Ceará é em torno de 60 – 70 m (MORAIS *et al.*, 2019). É a faixa mais estreita possuindo maior largura próxima ao Terraço do Ceará e é caracterizada morfologicamente por entalhes de cabeceiras de canyons submarinos que cortam o talude continental (LEOPOLDINO OLIVEIRA *et al.*, 2020; MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2020).

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Geodiversidade marinha no Brasil

Com o desenvolvimento de pesquisas sobre a geodiversidade marinha, a caracterização da geodiversidade permitiu compreender a paisagem de forma sistêmica, e tal compreensão pode fornecer subsídios para identificação e gestão dos bens e serviços ecossistêmicos oceânicos. Os primeiros estudos desenvolvidos no ambiente marinho sobre a geodiversidade marinha, foram iniciados nos domínios marinhos da Escócia, no Reino Unido e no golfo da Finlândia. Uma relação foi estabelecida entre a geodiversidade marinha e a biodiversidade, identificando as áreas a serem protegidas, pois tem importância não só de ponto de vista econômico, mas também científico (BROOKS *et al.*, 2009; 2011; 2012; BUREK *et al.*, 2012; BARRON, 2011; GORDON *et al.*, 2006; 2011; KASKELA *et al.*, 2012; ROVERE *et al.*, 2010; 2011).

A geodiversidade pode ser definida como as particularidades do meio físico que condicionam as características da paisagem e, consequentemente, a diversidade biológica (CPRM, 2006). Para Gray (2004), o mapeamento da geodiversidade consiste na identificação de variações ou diversidades da componente geológica, geomorfológica, assembléias, sistemas e processos de determinada área geográfica. As variáveis abióticas utilizadas para descrever a geodiversidade marinha podem ser classificadas em dois grupos distintos: os descritores oceanográficos e os fisiográficos. Os principais descritores oceanográficos utilizados são a salinidade, a temperatura, as correntes marinhas, a luminosidade da coluna d'água, as amplitudes de maré, a ação de ondas, a estratificação e os nutrientes da coluna d'água. Dentre os principais descritores fisiográficos, estão os movimentos tectônicos, a profundidade, o tipo de substrato geológico e a geomorfologia do fundo marinho (ROFF & TAYLOR, 2000). Nesse contexto, os descritores oceanográficos são significativos para toda a biota marinha, pois exercem controle tanto sobre as comunidades pelágicas como sobre as comunidades bentônicas. Por outro lado, descritores fisiográficos como geomorfologia, geologia e correntes (transferência de energia para o fundo marinho) exercem maior influência sobre as comunidades bentônicas (ROFF *et al.*, 2003).

No Brasil, o primeiro trabalho sobre geodiversidade marinha foi realizado por Maia (2013), onde a autora desenvolveu um modelo, em escala regional, para caracterização a geodiversidade marinha, tendo como área-piloto a Cadeia de Montes Vulcânicos Submarinos de Vitória-Trindade e áreas adjacentes, situada no Atlântico Sul, sudeste do Brasil. A

metodologia adotada compreendeu a definição de 5 compartimentos representativos da geodiversidade marinha, em ambiente de sistema de informação geográfica, através da integração e análise de variáveis espaciais resultantes de dados batimétricos, geológicos, geofísicos e de uso e ocupação, disponíveis na literatura e em bancos de dados governamentais e de instituição de pesquisas. Dessa análise, resultou a seleção de 13 áreas-chaves representativas de aspectos peculiares da geodiversidade marinha e do patrimônio geológico e potencial de uso a elas associado. As áreas selecionadas incluem registros de interesse científico e educativo sobre a história geológica da abertura do Oceano Atlântico Sul e formação da Margem Continental Brasileira, áreas potenciais de uso voltadas ao geoturismo e aproveitamento mineral. Foram abordadas restrições ao uso relacionado ao risco geológico; ações antrópicas; aspectos legais, tecnológicos e financeiros decorrentes da ocupação desses espaços. As informações obtidas visam subsidiar as ações governamentais brasileiras para o ordenamento do território marinho quanto ao aproveitamento de seus recursos e geoconservação dos aspectos singulares da história geológica brasileira e dos habitats mais suscetíveis. Constitui dessa forma um orientativo para futuros levantamentos da geodiversidade em regiões marinhas.

Mussi (2017) propôs uma definição da geodiversidade marinha aquela que consiste na caracterização ambiental das particularidades do meio físico que condicionam a dinâmica da paisagem e controlam em ampla escala de distribuição dos organismos. Em sua tese, fez o mapeamento e foram analisados os bens e serviços ecossistêmicos da geodiversidade ao longo da plataforma continental do estado de Santa Catarina. No estado de Ceara, Abreu Neto (2017) adotou a metodologia proposta por Maia (2013) e estudou cinco áreas de geodiversidade da zona costeira e da plataforma continental de Icapuí/CE: as falésias da Praia de Ponta Grossa, os terraços marinhos holocênicos e pleistocênicos, as cristas de praia submersas, o campo de dunas submersas e a linha recifal na plataforma externa. Essas informações ajudaram na compreensão dos conceitos da geodiversidade nesse ambiente.

O mapeamento do habitat marinho fornece informações que visam subsidiar ações governamentais para a gestão ambiental e desenho de reservas marinhas, pois em regiões tropicais, principalmente ao longo da costa brasileira, a variabilidade espacial dos habitats marinhos é pouco conhecida. Lucatelli *et al.* (2019) apresenta um estudo sobre a geodiversidade da região da plataforma continental de Pernambuco como um indicador da distribuição do habitat bentônico, utilizando dados batimétricos e geológicos em larga escala existentes. Finco e Bonetti (2020) apresentam sobre a caracterização da geodiversidade da plataforma continental interna a noroeste da ilha do arvoredo – SC através de dados

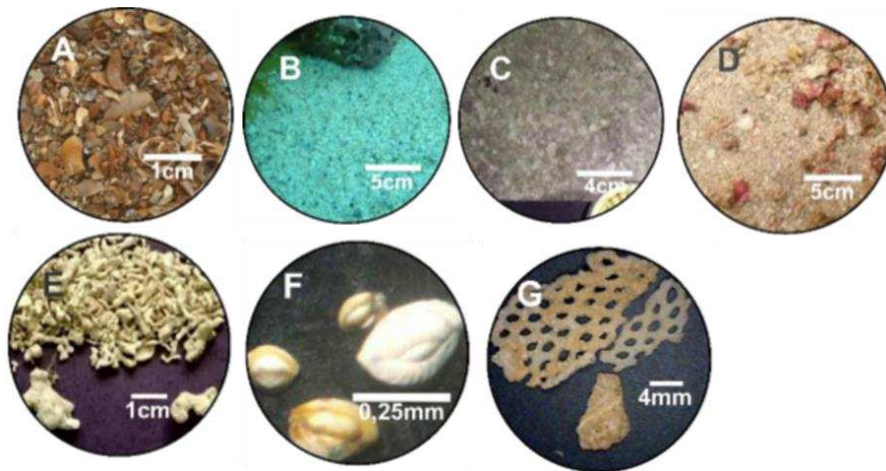
geoacústicos e sedimentológicos. Nessa pesquisa foi mapeada a geomorfologia, as feições e o tipo de fundo, destacando-se um canal com perfil em V com uma maior representatividade espacial dos rodolitos e de plataforma arenosa. Vieira *et al.* (2023) apresentaram resultados essenciais sobre as interrelações entre a geodiversidade marinha e a geomorfologia submarina de uma área no Atlântico Sul. Nesse sentido, eles mostram a influência direta da geomorfologia submarina como componente ambiental que impulsiona a geodiversidade e a variedade de geohabitats.

2.2 Biocenose da plataforma continental brasileira

Devido a sua ampla capacidade de ocupar diversos ambientes marinhos, os organismos bentônicos constituem um grupo muito diversificado, composto por representantes de numerosos filos e milhares de espécies. A comunidade bentônica compreende os organismos associados ao fundo, seja este constituído por substratos consolidados (rochas, recifes, costões rochosos, cascalhos) ou substratos não consolidados (cascalho, areia, silte, argila, lama). Os organismos de substrato consolidados podem ser fixos, sedentários, quando possuem movimentação restrita, ou vágeis, quando tem liberdade para se movimentar a maiores distâncias. Os organismos bentônicos de substrato não consolidado podem ser divididos em dois grandes grupos: componentes da endofauna, quando vivem enterrados no substrato, sendo fixos ou possuindo pouca movimentação e componentes da epifauna, quando se encontram sobre o substrato, podendo apresentar grande capacidade de movimentação (MONTEIRO, 2011; MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2016; MORAIS *et al.*, 2019; MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2021)

No Brasil, os sedimentos carbonáticos são formados por biodetritos (agregados ou granulados) provenientes de moluscos, briozoários, foraminíferos bentônicos e algas calcárias (Figura 2) que ocorrem na forma aderente, foliácea e livres (MARTINS & COUTINHO, 1981; STENECK, 1986; DIAS, 2000; DIAS *et al.*, 2021). No caso das algas calcárias, elas ocupam uma vasta diversidade de habitats na plataforma continental, ocorrendo em profundidades de até 200m, e são importantes atores na construção de recifes biológicos (BOSENCE, 1983; DIAS, 2000; BÔAS *et al.*, 2005). Essas areias e cascalhos biodetríticos estão mais localizados nas regiões de plataforma externa e média, podendo atingir a plataforma interna em algumas localidades (MARTINS & COUTINHO, 1981; DIAS, 2000).

Figura 2 - Alguns exemplos de biodetritos da Plataforma Continental Brasileira, sendo: A- formados por conchas de moluscos, ou “concheiros”, no Rio Grande do Sul (CORRÊA *et al.*, 2019), B- agregados carbonáticos de recifes altifóticos em Abrolhos (BA) (autor), C- fundo totalmente recoberto por talos de *Halimeda* próximos ao Parcel de Manoel Luís (MA) (DIAS *et al.*, 2021), D- Bioclastos resultantes da fragmentação das algas calcárias na Bacia de Santos, (Projeto de Caracterização Regional da Bacia de SantosPRC-BS,), E- cascalhos carbonáticos da plataforma continental cearense (XIMENES NETO *et al.*, 2018), F- foraminíferos bentônicos (FONTES *et al.*, 2020) e G- fragmentos de briozoários que compõem os bioclastos da plataforma da Bacia de Sergipe-Alagoas (FONTES *et al.*, 2020).



Fonte: Santos Filho, 2022

A presença de corais no Brasil não está associada necessariamente a ocorrência de “recifes de coral” tanto na zona altifótica quanto na mesofótica, mas mais comumente ocorrem de forma esporádica sobre substratos duros pré-existentes (CASTRO & PIRES, 2001). De acordo com esses autores, a ocorrência de recifes de corais verdadeiros na margem brasileira é restrita, tanto devido a plataforma continental muito estreita em algumas localidades quanto pela baixa diversidade de espécies formadoras de recifes na margem Brasileira, quando comparada com outras regiões do mundo. Os principais organismos bioconstrutores que compõe a estrutura dos recifes biogênicos brasileiros são de fato as algas calcárias e os briozoários, com pouca contribuição de corais (majoritariamente da ordem Scleratinia) e hidrocorais (gênero *Millepora*) (LEÃO *et al.*, 2016; BASTOS *et al.*, 2018).

2.3 Importância dos foraminíferos como indicadores ambientais

Os foraminíferos são protistas, predominante marinhos, de hábitos planctônico ou bentônico, que secretam uma teca composta por carbonato de cálcio (CaCO_3) que

normalmente varia entre 50 – 1000 μm (VILELA, 2011). Estes ocupam quase todos os ambientes marinhos, alguns em ambientes mixohalino, e raros em água doce (SIEMENSMA *et al.*, 2017), sendo menos abundantes nas zonas de maior profundidade devido à CCD (*Carbonate Compensation Depth* – zona de compensação de carbonato de cálcio). As formas bentônicas interesse desse trabalho habitam o fundo oceânico, tendo hábito infaunal (vivem dentro, ou seja, se enterram a poucos centímetros no substrato) ou epifaunal (vivem sobre o substrato) e são abundantes na plataforma continental. Eles podem ser livres ou fixos e caracterizam-se por ocupar uma determinada região ou ambiente (ANTUNES & MELO, 2001) e são susceptíveis às variações físico-químicas e batimétricas, sendo, portanto, bons indicadores de mudanças ambientais e excelentes indicadores de diversos parâmetros ecológicos, bióticos e abióticos, tais como salinidade, disponibilidade de nutrientes e temperatura.

A distribuição de foraminíferos bentônicos vivos na coluna sedimentar segue alguns parâmetros, como a disponibilidade de oxigênio e alimento, refletindo na profundidade habitada e na morfologia da carapaça. O microhabitat da espécie é considerado oligotrófico quando a produtividade é baixa em função da baixa concentração de nutrientes, quando um nível crítico de alimento determina a profundidade de penetração da maioria das espécies; enquanto que em ambiente eutrófico, onde há abundância de nutrientes, um nível crítico de oxigênio determina a profundidade esta profundidade (JORISSEN *et al.*, 1995).

De acordo com Jorissen *et al.* (1995), em ambientes mais oligotróficos, a comunidade bentônica é predominantemente constituída por espécies epifaunais e controlada principalmente pela disponibilidade de nutrientes; em ambientes mais eutróficos, as espécies infaunais são predominantes sendo o fator oxigênio determinante para distribuição da comunidade. Além destes indicadores, o estudo dos parâmetros populacionais como a diversidade de Shannon-Weaver (PIELOU, 1975), equitatividade (PIELOU, 1969), a densidade absoluta e diversidade ponderada (BURONE & PIRES-VANIN, 2006) tem grande importância nos trabalhos ecológicos.

2.4 Aspectos oceanográficos e climáticos

Foi observada que no período não chuvoso, a temperatura das águas superficiais em toda a costa é muito homogênea, sendo que a mesma diminui quando se distancia da costa. A temperatura média das águas diminui, geralmente nas épocas das chuvas, ficando entre 27,5°C a 28°C. Esse decaimento de temperatura deve-se a uma menor incidência de

raios solares na superfície dos oceanos devido a uma maior nebulosidade no período de inverno (CPRM, 2007).

A costa cearense sofre uma influência de um regime climático equatorial semiárido, com altas taxas de insolação. A pluviosidade encontra-se em quatro meses consecutivos com média anual de 1400 mm. A temperatura média anual de 27,5°C e a umidade relativa do ar varia em torno de 83% em março a 74% em setembro (SANTOS *et al.*, 2009).

A salinidade das águas superficiais apresentou-se em torno de 37 e 38‰. Nos meses de verão, coincide com a época das chuvas nas bacias de drenagem dos rios, obtendo uma salinidade na ordem de 36, concordante com o que foi encontrado por Barretto *et al.*, 1975, para a plataforma Continental do Ceará. Em Fortaleza, próximo do emissário, variou de 35 a 36, devido à descarga do mesmo.

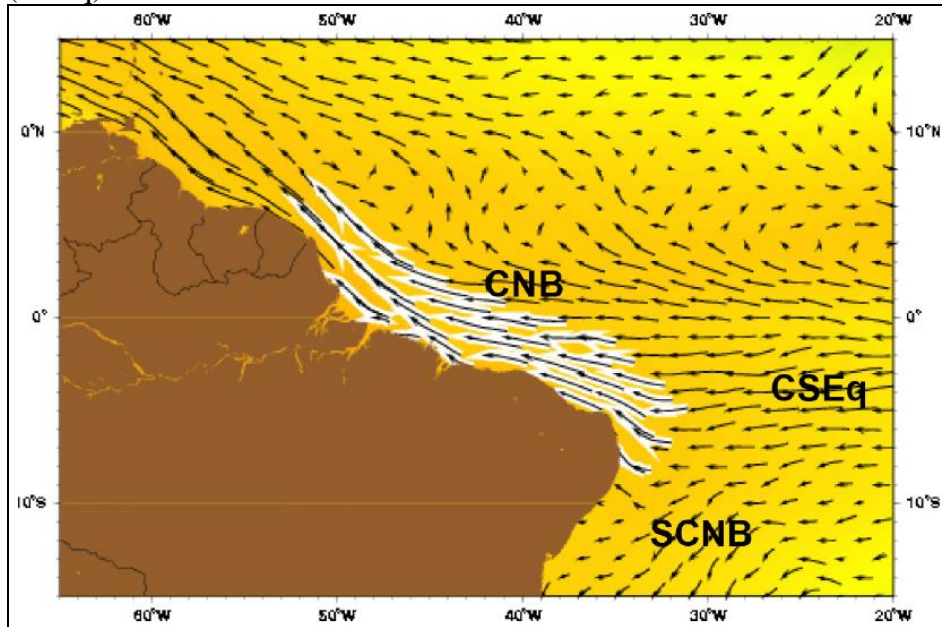
O estudo das concentrações do material em suspensão mostra uma relação direta com as variações sazonais. Estudos realizados por Barretto e Summerhayes (1975) mostram que a concentração do material em suspensão varia em média de 1,0 mg/L próximo à costa e 0,12 mg/L nas proximidades do talude. Na plataforma interna e média, defronte a foz dos Rios Coreaú e Jaguaribe, a concentração média é de 0,19 mg/L na superfície, e de 0,23 mg/L no fundo (FREIRE, 1985).

Essa pequena concentração de material em suspensão se deve a baixa taxa de chuva que ocorre no Estado do Ceará, diminuindo o transporte de material em suspensão do continente até a plataforma. A maior concentração do material em suspensão no fundo reflete uma maior influência das correntes litorâneas, a uma profundidade relativamente pequena (15 m).

A Corrente do Brasil (BC) flui na borda Oeste do Giro Tropical do Atlântico Sul. Este fluxo contorna margens brasileiras pela bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSEq) (SILVEIRA *et al.*, 2000). A CSEq varia de 20°S para 4°N e bifurca-se em Sul (sCSEq), Central (cCSEq), Equatorial Ramos (eCSEq) e Norte (nCSEq) da Corrente Sul Equatorial (STRAMMA & SCHOTT, 1999; LUMPKIN & GARZOLI, 2005). Na Margem Equatorial Brasileira, a Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) junta-se ao cCSEq e ao CNB que flui para o norte para os mares do Caribe (SCHOTT *et al.*, 2002; CINTRA *et al.*, 2015; DAMASCENO *et al.*, 2022). As posições da bifurcação SEC variam sazonalmente de acordo com o Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), e isso afeta diretamente o transporte SCNB, onde a bifurcação se move em direção ao sul aumenta o transporte e para norte diminui

(RODRIGUES *et al.*, 2007). A plataforma continental do Ceará sofre influência da Corrente Norte Brasileira (CNB) (Figura 3).

Figura 3 - Correntes Norte do Brasil (CNB) e Subcorrente Norte do Brasil (SCNB) formadas a partir da bifurcação da corrente Sul Equatorial (CSEq).



Fonte: Maia de Almeida *et al.*, (2021) adaptado de Bischof *et al.*, (2003)

O padrão de ondas e marés dominantes na região também é bem conhecido a partir de estudos realizados, como os de Moraes (1980) e Maia (1998). Deste modo, as ondas que ocorrem na região são de período curto, padrão alterado somente entre os meses de dezembro a março, que coincide com a chegada de ondas de período bem mais longo, atingindo com mais força e velocidade determinadas áreas costeiras do Ceará. As marés que atuam na região apresentam periodicidade semidiurna, isto é, com duas preamares e duas baixa-mares em um único ciclo de maré, o que a caracteriza como uma região de meso-marés, conforme Maia (1998).

O clima da região costeira inserida na área é o tropical chuvoso, quente e úmido - de acordo com a classificação de Köppen (1948), com média anual de temperatura de 26°C, e precipitações irregulares e forte influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Trata-se de uma região de intensa nebulosidade e baixa pressão atmosférica, diretamente relacionada ao padrão de chuvas, pois sua movimentação entre os hemisférios norte e sul gera precipitações nas áreas subjacentes no momento de sua passagem.

O estado do Ceará incluindo a sua faixa litorânea está submetido a estes processos, fato que condiciona, de uma maneira geral, o comportamento das paisagens submetidas à condição de semiaridez. Dessa forma, também há uma significativa influência

nas principais bacias hidrográficas do estado, como o rio Jaguaribe que uma vez sujeita as variações sazonais e temporais tem tido os seus regimes de transporte e deposição de sedimentos afetados, fatores que, entre outros, repercutem no balanço sedimentar da zona costeira (MORAIS, PINHEIRO, 2011; PAULA *et al.*, 2009; PINHEIRO *et al.*, 2020; MEDEIROS, 2020; MIOLA, 2017).

2.5 Cobertura sedimentar da plataforma continental do Ceará

A cobertura sedimentar marinha atual reflete a natureza predominante de seus componentes (terrígena ou carbonática), a ação dos mecanismos de transporte e o retrabalhamento dos sedimentos promovida pela atividade hidrodinâmica, como ondas, marés e correntes. Na plataforma continental do Ceará, os sedimentos de natureza siliciclástica (terrígenos) são representados principalmente pelo quartzo, fragmentos de rochas, minerais pesados, micas, feldspatos e argilominerais (FREIRE & CAVALCANTI, 1998; MORAIS, 1998; MORAIS *et al.*, 2006; AGUIAR NETO *et al.*, 2016) (Figura 4 A). A sua distribuição predominante ocorre no setor mais raso, denominado de plataforma interna (<20 m), sendo que conforme Freire e Cavalcanti (1998) a plataforma interna do Ceará é a mais siliciclástica do nordeste, em especial a região metropolitana de Fortaleza, e isso é observado na presença de uma reserva de areias siliciclásticas na forma de um banco submerso a Noroeste do porto do Mucuripe (MAIA, 1998; SOARES *et al.*, 2011; XIMENES NETO *et al.*, 2018b; LIMA FILHO *et al.*, 2018). Tendo como base os trabalhos de Freire (1985) e Freire e Cavalcanti (1998), pode-se afirmar que as principais fácies siliciclásticas da plataforma continental do Ceará são as seguintes: cascalho quartzoso, areia quartzosa e lama.

Figura 4 - Dois principais tipos de coberturas sedimentares na Plataforma Semiárida Cearense: A) Carbonática e B) Siliciclástica. Na figura (A) é evidenciada um substrato rico em artículos da alga calcária verde do Gênero *Halimeda*. Na figura (B) o substrato siliciclástico é predominante com presença dispersa nas calhas de ripples de fragmentos bioclásticos



Fonte: (A) de Ximenes Neto *et al.* (2018a) e (B) de Ximenes Neto (2018).

Os sedimentos de natureza bioclásticos (carbonática) são representados principalmente pelas algas calcárias vermelhas e verdes, foraminíferos, moluscos, briozoários, equinodermos, artrópodes e esponjas (COUTINHO & MORAIS, 1970; XIMENES NETO *et al.*, 2018a; MORAIS *et al.*, 2019), (Figura 4 B). A sua distribuição ocorre predominantemente acima da isóbata de 15 m, no entanto, em alguns setores como em Icapuí, é verificado em áreas rasas (<10 m) (BARROS, 2014; XIMENES NETO *et al.*, 2018a; LIMA, 2019). Em substratos rígidos como ambientes recifais, é verificada a presença de esponjas, corais, vermetídeos (MONTEIRO, 2011; MORAIS *et al.*, 2019). Moraes *et al.* (2019) asseveram que as algas calcárias (verdes/Chlorophyta e vermelhas/Rhodophyta) fornecem a maior contribuição sedimentar, representadas predominantemente por rodolitos (Lithothamnion), Halimeda e coralináceas geniculadas. Freire *et al.* (2007) identificaram na plataforma leste do estado, as cinco principais associações carbonáticas dos sedimentos bioclásticos são formados por: Mäerl (predomínio de algas coralíneas); areia e/ou cascalho de Halimeda; foraminíferos; vermetídeos e biodetritos (mistura de fragmentos de moluscos, briozoários e algas calcárias).

2.6 Economia Azul na Plataforma Continental Leste do Ceará

A PCLC apresenta uma diversidade de ecossistemas importantes em termos de produtividade tendo como ponto de vista os recursos renováveis e não renováveis. No contexto da economia do mar, ocupa uma posição de destaque devido às suas características ambientais e que envolvem aspectos socioeconômicos, ambientais, culturais e geopolíticos. Nesse contexto, apresentam-se diferentes possibilidades de exploração dos recursos por intermédio de diferentes atividades econômicas relacionadas ao mar, tais como o turismo, a pesca, a indústria energética (petróleo e eólicas offshore) e a mineração submarina (MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2023).

A energia eólica vem ganhando destaque por se tratar de uma importante alternativa para ao alcance das metas de diminuição da emissão de gases de efeito estufa, e, no caso das eólicas offshore, é uma diversificação das fontes da matriz elétrica renovável, ganhando cada vez mais destaque no cenário nacional e internacional (DECASTRO *et al.*, 2019; EPE, 2020).

A produção de energia pelos parques eólicos offshore pode ser convertida em combustível limpo na forma de hidrogênio verde. O hidrogênio verde é produzido a partir de

fontes renováveis de energia, como dos ventos, solar, nuclear, energia das marés e etc (LI, 2017), sendo a energia solar e a eólica as mais comuns até o presente momento (D'AMORE-DOMENECH; LEO, 2019). Como as energias renováveis dependem de condições climáticas e consequentemente das instabilidades ambientais, o armazenamento por meio da produção de hidrogênio é um forte aliado às energias limpas, pois ele retém grandes quantidades dessa energia renovável produzida, podendo ser transportada, possibilitando assim o comércio desse hidrogênio e exportado (GANIYU; MARTÍNEZ-HUITLEA; RODRIGO, 2020; ALMUTAIRI *et al.*, 2021). Nesse contexto, pode configurar uma importante via alternativa do uso de combustíveis fósseis e descarbonização da matriz energética (MIRANDA, 2019).

Como parte de estratégias para desenvolver a indústria offshore sustentável e robusta, o Brasil lançou, também em 2016, a Estratégia Nacional de Energia Eólica Offshore de modo a identificar as principais ações para atingir a meta de 86 GW a ser implantada até 2050. O país se destaca dentre os cinco mercados globais que mais cresceram em 2020, juntamente com China, Estados Unidos, Alemanha e Países Baixos recebendo investimentos que equivalem ao acréscimo de 3% na matriz (ZHAO & LEE, 2021).

Os parques eólicos offshore no Ceará representam uma área de interesse crescente devido ao potencial eólico significativo da região e à mudança global para fontes de energia renováveis. Os recursos eólicos offshore do Ceará são substanciais, com velocidades médias do vento excedendo 8 m/s e densidades de potência acima de 720 W/m², principalmente durante a estação seca. A batimetria rasa da região e as rotas de navegação distantes a tornam um local favorável para parques eólicos offshore (DE LIMA *et al.*, 2015). Diversas áreas estão atualmente em processos de licenciamento junto ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) ocupando áreas consideráveis na PCLC (IBAMA, 2024).

A energia eólica offshore pode gerar diversos impactos positivos e negativos que podem afetar o ambiente marinho nos componentes biótico, físico e socioeconômico. Efeitos negativos, como mudanças comportamentais, desorientação e morte de animais, podem ser observados em mamíferos marinhos, tartarugas e peixes em geral, devido ao ruído excessivo dos parques eólicos promovidos desde a fase de implantação, passando pela fase de operação (a menos ruidosa) até o descomissionamento (EPE, 2020; HAMMAR; PERRY; GULLSTRÖM, 2016; MADSEN *et al.*, 2006; TOUGAARD *et al.*, 2009). Os parques eólicos podem atuar direta ou indiretamente na conservação, já que o substrato duro das estruturas artificiais das torres atrai espécies e pode contribuir no enriquecimento da fauna local (LANGHAMER, 2012), atuando como um recife artificial em ambientes inconsolidados.

Experiências em outros países mostram que esses ambientes podem favorecer o desenvolvimento de comunidades de peixes, pois é criado um ambiente abrigado e a pressão de pesca é diminuída (HAMMAR; PERRY; GULLSTRÖM, 2016). No entanto, um grande desafio pode surgir em decorrência do novo habitat formado. Espécies invasoras que já impactam o litoral brasileiro, como o coral sol e o peixe leão, podem ser atraídas pela disponibilidade de habitat e alimento (SOARES *et al.*, 2021), ocasionando desafios para o equilíbrio da região tropical do Atlântico Sul.

Embora se apresente como uma fonte de energia limpa e renovável, os parques eólicos apresentam uma série de impactos socioambientais em todo o mundo (SNYDER & KAISER, 2009). Por isso, é importante que os riscos ambientais sejam identificados, evitados e mitigados desde o início do projeto, passando pela instalação, operação e descomissionamento dos aerogeradores.

Além do potencial para os recursos renováveis, a exploração de recursos não-renováveis também avança cada vez mais para o ambiente marinho, que se revela como um ambiente rico em diversos tipos de recursos minerais que poderiam ser explorados. A mineração marinha tem se mostrado cada vez mais viável economicamente, principalmente com o advento de novas tecnologias de detecção e exploração do fundo marinho de baixo custo (WEDDING *et al.*, 2015). Contudo, o grande desafio é permitir a exploração de modo que a sustentabilidade seja garantida, já que os fundos oceânicos são ambientes frágeis e com baixo conhecimento científico, havendo risco para a biodiversidade (WEDDING *et al.*, 2015). Consequentemente, existe um risco para a integridade dos bens e serviços ecossistêmicos prestados pelos oceanos, o que compromete a possível existência de uma Economia efetivamente Azul.

De acordo com Freire & Cavalcanti (1998), na plataforma continental leste do Ceará predominam, entre os bioclásticos, os depósitos de areias e/ou cascalhos de *Halimeda*, podendo ocorrer subordinadamente depósitos de areias e cascalhos biodetríticos, compostos por fragmentos de algas coralíneas, moluscos e briozoários, ocorrendo, geralmente, a profundidades superiores a 15 metros. Segundo Dias (2000), somente as formas livres das algas calcárias tais como rodolitos, nódulos, e seus fragmentos são viáveis para a exploração econômica, pois constituem depósitos sedimentares inconsolidados, facilmente coletáveis através de dragagens.

Freire *et al.* (2007) afirmam que os granulados bioclásticos da plataforma continental do CE possuem composição química adequada para a fabricação do cimento, devendo, entretanto, ser controlado o teor de fósforo. Além disso, os granulados mostram-se

apropriados e atendem as especificações para: fabricação de cal para argamassa e indústria siderúrgica, com atenção dada à dimensão dos grãos devido ao processo de calcinação; a indústria do açúcar; a indústria do vidro e de tintas. Ademais, os bioclásticos podem ainda ser aplicados na indústria de ração animal, sendo fonte de cálcio, fósforo, sódio e magnésio, além de outros oligoelementos importantes na nutrição animal.

Outras aplicações dos granulados bioclásticos são para a neutralização do solo, corrigindo sua acidez e provendo elementos que favoreçam o crescimento das plantas e na indústria de termoplásticos, principalmente da fabricação de PVC (poli cloreto de vinila), PP (polipropileno) e PE (polietileno) que tem como fonte os calcários cristalinos ou as conchas calcárias (Freire *et al.*, 2007).

Os granulados bioclásticos podem ser considerados habitats para muitas espécies (FOSTER *et al.*, 2007; BROOM *et al.*, 2008; HALFAR & RIEGL, 2013; RIOSMENA-RODRÍGUEZ, 2017), provendo inúmeros serviços ecossistêmicos como áreas de berçário, além de estocar carbono (HEIJDEN, 2015; HORTA; AMADO-FILHO & GURGEL, 2016; MOURA *et al.*, 2021). Por isso, é fundamental que os projetos de exploração destes recursos sejam desenvolvidos e monitorados de forma responsável e sustentável, levando em consideração os impactos ambientais e sociais associados.

3 MATERIAIS E MÉTODO

A base de dados utilizada nesse trabalho constitui-se de dados batimétricos, satelitais e sedimentológicos. A seguir detalha-se sobre.

3.1 Dados Processamento digital de imagens

Foram utilizadas duas imagens LANDSAT 8 do sensor OLI. A primeira de órbita/ponto 216/63 de 16 junho de 2016 e a segunda de órbita/ponto 217/62 de 08 de agosto 2020. Essas imagens foram adquiridas a partir do acervo de imagens do banco de dados dos *United States of Geological Survey* (USGS) e foram processadas no *software* QGIS 3.34

Os produtos OLI das imagens Landsat 8 consistem de nove bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 m (bandas de 1 a 7 e 9) e 15 m (banda 8). A banda 8 do instrumento OLI é a banda pancromática que possui resolução espacial de 15 m (USGS/NASA, 2018). A Tabela 1 apresenta as principais características do sensor OLI a bordo do satélite Landsat-8. Foi utilizado mosaico de composição colorida com as bandas RGB_432 ao longo da plataforma continental estudada.

Tabela 1 - Principais características do satélite Landsat-8

Landsat-8 (OLI)		
Banda	Comprimento de Onda (nm)	Resolução Espacial
1 - Aerosol	435-451	30 m
2 - Azul	452-512	30 m
3 - Verde	533-590	30 m
4 - Vermelho	636-673	30 m
5 - NIR	851-879	30 m
6 - SWIR 1	1.566-1.651	30 m
7 - SWIR	2 2.107-2.294	30 m
8 - Pancromática	503-676	15 m
9 - Cirrus	1.363-1.384	30 m
10 - TIR 1	10.600-11.190	100 m
11 - TIR 2	11.500-12.510	100 m

Fonte: (USGS, 2018).

3.2 Dados batimétricos

Os dados batimétricos usados foram obtidos através do *General Bathymetric Chart of Oceans* (GEBCO) em 2021 os quais apresentam uma resolução de 30 segundos de arco (aproximadamente 925 m x 925 m). Com estes dados foi realizada a análise da morfologia da plataforma continental estudada. Os dados do grid do GEBCO foram interpolados usando o método Krigagem no software QGIS. Os perfis batimétricos foram confeccionados e tiveram como objetivo a visualização da morfologia da plataforma continental e a identificação de feições que foram observadas nas imagens Landsat 8 (item 3.2). Aplicou-se diferentes exauros verticais para melhor visualização da diferença de amplitude de relevo.

3.3 Análises dos Sedimentos

As 385 amostras sedimentológicas utilizadas foram do acervo do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Aplicada à Energia (LGMA) as quais foram coletadas através dos projetos Granmar, REMAC, REMPLAC, GEOCOSTA I, II, III e Geomar (MAIA DE ALMEIDA *et al.*, 2021), através de amostrador de fundo do tipo *Van Veen*.

Para as análises granulométricas, o procedimento iniciou-se com o quarteamento e pesagem de 100 g de amostra. Seguiu-se com o peneiramento úmido para a separação da fração fina (silte e argila) das frações cascalho e areia. Cada amostra foi lavada com água corrente sobre uma peneira com malha de abertura de 0,062 mm sendo posteriormente levada à estufa (60°C) permanecendo ali em torno de 24 horas. Após seca, seguiu-se com peneiramento seco com jogo de peneiras no intervalo de 0,062 mm e 2 mm. Desta forma, foram obtidas as frações cascalho, areia e lama (SHERPARD, 1954; WENTWORTH, 1922). Cada fração foi pesada e os resultados obtidos foram anotados para os cálculos dos parâmetros estatísticos utilizando software ANASED 5.0 (LIMA, 2001).

Para a geração do mapa faciologico, adaptou-se o mapa de fácies de Maia de Almeida *et al.* (2021), que utiliza a classificação de Larssonneur (1977), adaptada por Dias (1996) e Freire *et al.* (1997).

Para a triagem dos componentes bióticos, 22 amostras das fácies bioclástica e biolitoclástica foram selecionadas. Essas amostras foram coletadas em profundidades variando entre 7 e 51 m. Após o peneiramento a seco, 300 espécies foram selecionadas na

fração areia (0,177 e 0,125 mm), conforme a metodologia proposta por Tinoco (1989). Os componentes bióticos foram analisados por meio de estereomicroscópio binocular para identificar os principais constituintes da assembleia bentônica dos sedimentos. Contou-se com o apoio do Laboratório de Invertebrados Marinhos do Departamento de Biologia da UFC.

Já a identificação dos foraminíferos bentônicos foi realizada no Laboratório de Micropaleontologia Aplicada da Universidade Federal de Pernambuco (LMA/UFPE) e seguiu a metodologia de Tinoco (1989) e Loeblich e Tappan (1988).

A primeira etapa consistiu na pesagem de 100g de cada amostra de sedimento, onde se fez o peneiramento úmido em água corrente para a separação do material fino e grosso, passando por duas peneiras, 0,62 e 1 μm . Os sedimentos que ficaram retidos nas peneiras foram colocados em *beckers* e lavado para secar em estufa por 24 horas a uma temperatura de 60 °C. Utilizando uma lupa *edulab*, onde foram tirados de forma aleatória 300 espécies da fração 0,177 a 0,125 mm por amostra seguindo a metodologia proposta por Tinoco (1989).

Na segunda fase foi realizada a triagem em frações entre $>63 \mu\text{m}$ e $<500 \mu\text{m}$ e identificação de foraminíferos bentônicos por meio de estereomicroscópio. Imagens digitais das principais espécies foram fotografadas usando um Stereo Zeiss Discovery V16. Em seguida a etapa de contagem baseou-se na recuperação dos espécimes de foraminíferos bentônicos através da peneira superior a 63 μm utilizando lupa binocular. Vale ressaltar que, amostra com pouca abundância de foraminíferos, a contagem foi feita em todas as peneiras das amostras; e nas demais amostras com maior abundância a contagem foi feita em 300 exemplares de foraminíferos.

3.4 Análises estatísticas

Análises univariadas (índice de diversidade, de equitabilidade, de abundância relativa) e multivariadas (PCA biplots) foram feitas afim de quantificar e compreender o modo de agrupamento dos diferentes componentes bióticos. As análises estatísticas foram feitas usando o software PAST afim de classificar o modo de agrupamentos das diferentes espécies. Em relação aos foraminíferos, além do cálculo da frequência relativa, também foi calculado o índice de dominância (D), a riqueza (S), os índices ecológicos de Shannon (H') e os parâmetros ecológicos de equitabilidade (E) nas espécies de foraminíferos que foram quantificadas a fim de determinar o nível de diversidade das espécies em cada amostra.

4 BENTHONIC ASSEMBLY AND ITS CORRELATION WITH THE GEODIVERSITY OF THE EAST CONTINENTAL SHELF OF CEARÁ (BRAZILIAN EQUATORIAL MARGIN)

ASSEMBLEIA BENTÔNICA E SUA CORRELAÇÃO COM A GEODIVERSIDADE DA PLATAFORMA CONTINENTAL LESTE DO CEARÁ (MARGEM EQUATORIAL BRASILEIRA)

RESUMO

Os sedimentos bioclásticos possuem valor econômico devido à sua alta concentração de minerais de cálcio e podem ser utilizados como corretivo de solos em agricultura, fábrica de cimento, formulação de ração animal e indústria cosmética. No Brasil são amplamente explorados na plataforma continental. Embora as fácies sedimentares da plataforma continental cearense sejam conhecidas, não há informações sobre a composição dos constituintes bioclásticos, sua diversidade e distribuição. Este estudo tem como objetivo identificar os constituintes das comunidades bentônicas marinhas e sua relação com fatores abióticos, tais como, profundidade, morfologia e fácies sedimentares. Para tanto, foram realizadas análises de dados de sensores remotos, batimetria e amostras de sedimentos. Feições como dunas submersas (oblíquas, paralelas e transversais), arenitos de praia e paleocanais foram observadas e, de acordo com os aspectos fisiográficos e morfológicos, cinco zonas foram interpretadas (1. zona de dunas longitudinais e sedimentos em suspensão, 2. zona de dunas transversais, 3. zona de dunas oblíquas, 4. zona de construções recifais e 5. zona de leito plano). A análise sedimentológica permitiu identificar componentes com as respectivas frequências relativas: briozoários (35,5%), algas calcárias (27%), foraminíferos (12,3%), moluscos (12%), cnidários (4%), equinodermos (3,9%), poríferos (3,5 %) e artrópodes (1,7%). As análises das componentes principais biplots (ACP) apresentaram correlação positiva entre os componentes bióticos (algas calcárias, poríferos e cnidários) e os abióticos (profundidade 20 - 40 m, zonas 2 e 4 (Z2 e Z4) e a fácies areia bioclástica (BS). Já os artrópodes tendem a ocorrer de 40 a 60 m, na zona 3 (Z3) e comumente associado à fácies areia biolitoclástica (BLS), enquanto que os equinodermos e moluscos tendem a ocorrer em regiões mais rasas (0 - 20 m), associados à zona 1 (Z1) e às fácies cascalho bioclástico (BG) e areia bioclástica com cascalho (BSG). Esta pesquisa comprova a relação entre a geologia, a geomorfologia e a vida marinha bentônica da região e apresenta uma base de dados preciosa

para mensurar e monitorar a área que tem atraído atenção de vários setores da Economia Azul principalmente durante a Década dos Oceanos.

Palavras-chave: Mapeamento do fundo marinho, plataforma continental semiárida, componentes bióticos, Análise de Componentes Principais, nordeste brasileiro.

ABSTRACT

Bioclastic sediments have economic value due to their high concentration of calcium minerals and can be used as soil amendments in agriculture, in cement factories, for animal feed formulation, and in the cosmetic industry. In Brazil, they are widely exploited on the continental shelf. Although the sedimentary facies of the Ceará continental shelf are known, there is no information about the composition of bioclastic constituents, their diversity, and distribution. This study aims to identify the constituents of marine benthic communities and their relationship with abiotic factors such as depth, morphology, and sedimentary facies. To this end, analyses of remote sensing data, bathymetry, and sediment samples were conducted. Features such as submerged dunes (oblique, parallel, and transverse), beach sandstones, and paleochannels were observed, and, according to physiographic and morphological aspects, five zones were interpreted (1. suspended sediment zone, 2. transverse dune zone, 3. oblique dune zone, 4. reef construction zone, and 5. flatbed zone). Sedimentological analyses identified components with their respective relative frequencies: bryozoans (35.5%), calcareous algae (27%), foraminifera (12.3%), molluscs (12%), cnidarians (4%), echinoderms (3.9%), sponges (3.5%), and arthropods (1.7%). Principal component analyses biplots (PCA) showed a positive correlation between the biotic components (calcareous algae, sponges, and cnidarians) and the abiotic factors (depth 20-40 m, zones 2 and 4 (Z2 and Z4), and the bioclastic gravelly sand facies (BGS)). Otherwise, arthropods tend to occur from 40 to 60 m depth and are commonly associated with the biosiliciclastic sand facies (BLS), while echinoderms and molluscs tend to occur in shallower regions (0-20 m), associated with zone 1 (Z1) and to the bioclastic gravel (BG) and bioclastic sand with gravel (BSG). This research demonstrates the relationship between geology, geomorphology, and benthic marine life in the region and provides a valuable database for measuring and monitoring the area, which has attracted attention from various sectors of the Blue Economy, especially during the Decade of the Oceans.

Keywords: Seabed mapping, semi-arid continental shelf, biotic components, Principal Component Analysis, Brazilian Northeast.

4.1 Introduction

The bioclastic components habitually are produced in situ and conditioned by the sedimentary environment. The main part of the carbonate sediments is developed in the sea and the recognition of the physical and biological parameters is necessary to characterise the environment (Poggio et al., 2009; Rebouças, 2010).

The sedimentation in shallow environments is generally related to the interaction between sediment supply, hydrodynamic regime (waves, tides, and currents), climate settings, relative sea-level changes, coastal morphology, and rock resistance (Nittrouer et al. 2007, Campos & Dominguez 2010, Muehe 2010). The continental margin of the western equatorial Atlantic (Northeast Brazil) presents a unique climate setting among regions on earth.

The continental shelf of Northeast Brazil is considered a tropical semi-arid shelf due to the climate, characterized by low annual temperature variation (26 to 30°C), low annual precipitation ($< 1000 \text{ mm year}^{-1}$) and strong swell waves (6 to 11 m. s^{-1}) during most of the year (Coutinho & Morais 1970, Ximenes Neto et al. 2018a, 2018b, Morais et al. 2019, Pinheiro et al. 2020, Maia de Almeida et al. 2021, Soares et al. 2021).

The low input in the continental shelf has favoured the development of a mixed deposition system on the shelf (Morais et al. 2019). Then, this semiarid continental shelf is characterized by a mixed siliciclastic carbonate sedimentation, showing evidences of modern supply of carbonates sediments (calcareous algae, molluscs and foraminifera) and siliciclastic relict sediments (quartz and lithic fragments) (Morais et al. 2019). The low influx of water from continent to ocean is a good factor to the development of bioclastic components specially the calcareous algae which require appropriate ecological conditions such as depth, light, temperature, salinity, currents, substrate and grain size (Coutinho 1976, Costa 2015).

These carbonate sediments have attracted the mineral sector that aims to explore these granulates (Paiva et al. 2023, Maia et al. 2024) due to its high concentration of calcium minerals which can be used as a soil improver in agriculture, cement plants, animal feed formulation and cosmetic industry (Dias 2000). Besides that, the energy sector also has been attracted aiming to install offshore wind farms due to the excellent wind potential of the region (Ortiz & Kampel 2011).

Although, several researches were carried out on the abiotic aspects of the continental shelf of Ceará to understand the seabed morphology and sedimentation (Freire & Cavalcanti 1998, Maia et al. 1997, 2008, Silva Filho et al. 2007, Maia de Almeida et al. 2016, Lima et al. 2018, Ximenes Neto et al. 2018a, Morais et al. 2019, Maia de Almeida et al. 2021), then the regional geomorphology and the distribution and composition of sedimentary facies of the Ceará continental shelf is regionally known (Freire 1985, Silva Filho et al. 2007, Cavalcanti 2011, Maia de Almeida et al. 2016, Morais et al. 2019, Maia de Almeida et al. 2021), the Ceará semiarid shelf is very poorly known in respect to its geohabitats and marine benthic communities.

It is worth highlighting that Pinheiro et al. (2019) studied the marine habitats of a very local area (the continental shelf of Iracema beach in Fortaleza, Ceará). They affirm that integrating the biotic and abiotic components is essential for conservation and management of marine areas, especially those with anthropogenic activities.

Recognizing the benthic community of the continental shelf east of Ceará is very important, as it will help in identifying marine biodiversity, which can be considered as an indicator of the health of the ecosystem (Salas et al 2006, Rice 2003). Changes in the composition and abundance of these communities may reflect environmental impacts (Noble-James et al. 2017). Furthermore, they provide important ecosystem services as they have pharmaceutical potential, as they have medicinal properties, as well as in agriculture and cosmetics (Dias 2000, Cavalcanti 2020, Maia et al. 2024). Therefore, understanding and monitoring the benthic community is essential for the sustainable management of marine ecosystems and to ensure long-term human well-being.

The nature of the substrate, the geomorphology and the depth are most important factors that may help to understand the way of distribution and abundance of the marine benthic organisms. Mapping the geomorphic features on the seafloor is useful to understand the benthic habitats which can be considered as a powerful surrogate for associated communities (Harris et al. 2014, Jerosch et al. 2015). Currently, there is no comprehensive information combining spatial data to explain the geo and biodiversity and the distribution of the marine benthic communities of the Ceará continental shelf. Quantitative information about diversity, relative abundance, frequency of occurrence, and the relationship between the types of organisms and the abiotic factors does not exist.

This study aims to identify and quantify the constituents of the benthic community of the eastern Ceará continental shelf and understand its geodiversity, in order to comprehend the relationship between the benthic marine life and its geohabitats. This can provide

important information for the sustainable use, the conservation and management of the marine ecosystem along the semi-arid continental shelf of Ceará.

4.2 Study area and regional setting

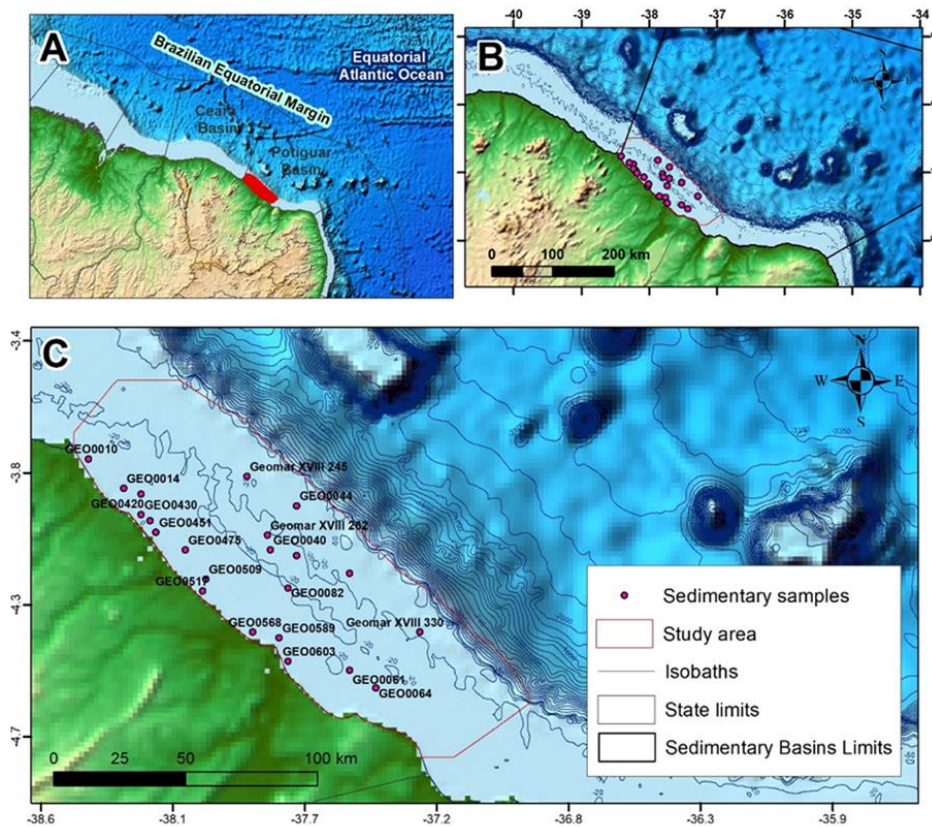
The study area is located in the Potiguar Basin on Northeast Brazilian continental shelf, between the capital city of Ceará (Fortaleza) and the municipality of Icapuí with a width of approximately 63 Km. The limits of the study area are: on the West by the city of Fortaleza, to the East by the State of Rio Grande do Norte, to the South by the coastline of Ceará; and on the North by shelf break occurring at in 60 - 70 m (Figure 1).

The Northeast Brazilian continental shelf represents one of the few areas in the world with an open and stable shelf almost completely covered by biogenic calcium carbonate sediments with a mixed sedimentological pattern, including a modern carbonate supply and relict siliciclastics grains (Manso et al. 2004, Cavalcanti 2011).

Coutinho & Morais (1970) subdivided the continental shelf of Ceará into three parts according to their sedimentological and morphology characteristics: the inner shelf, from coastline up to 20 m, the middle shelf from 20 to 40 m, and the outer shelf, from 40 m until the shelf break which occurs around 60-70 m of water depth.

Morais et al. (2019) divided the continental shelf of Ceará into three sectors with the study area located within the Jaguaribe sector, characterized by a high number of high-energy unconsolidated bedforms. Maia de Almeida et al. (2016) mapped several zones in the Ceará continental shelf (suspended sediment zone, oblique dunes and flatbed zone, transverse dunes zone, carbonate sediments zone, besides reef construction and beach sandstone). However, their study area is restricted to the shelf adjacent to the Jaguaribe River.

Figure 1 Map showing the study area with 22 sediments samples data available for this research along the eastern continental shelf of Ceará, Brazilian Equatorial Margin. Source: Marine and Energy-applied Geology and Geophysics Laboratory (LGMA), ETOPO, Brazilian National Agency of Petroleum (ANP), Brazilian Geological Survey (SGB).



Source: Done by the author

For the eastern continental shelf of Ceará, Assis et al. (2007) defined two sedimentary provinces (carbonate and siliciclastic) based on several parameters, including texture, CaCO_3 content, carbonate associations, relative proportion of feldspar and mineralogical composition of siliciclastic components. Maia de Almeida et al. (2021) presents the sedimentary facies of the Ceará continental shelf. The main facies of the eastern continental shelf are bioclastic sand (BS), bioclastic sand with granules (BSG), bioliticlastic sand (BLS), litobioclastic sand (LBS), litoclastic sand (LS), litoclastic sand with gravel (LSG), bioclastic gravel (BG), litobioclastic gravel (LBG), litoclastic gravel (LG), terrigenous mud (TM) and carbonate mud (CM).

4.3 Materials and methods

4.3.1 Acquisition and processing of bathymetry data

The bathymetric data were obtained through the pre-existing data of the General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) in 2021. These data were processed using QGIS

software in order to produce the bathymetric map and profiles. They were very useful to characterize the marine relief and geomorphology of the study area.

4.3.2 Acquisition and Treatment of Landsat 8 images data

Two images of Landsat were acquired from the USGS (United States Geological Survey) database site with the Path/Row reference of 216/63 and 217/62. The choice of this sensor was due to the existence of the ultra-blue band (band 1), which is most commonly used for coastal studies and submerged environments (USGS 2018). The images were processed and georeferenced using QGIS software. Digital image processing was used to improve the visual analysis of submerged features. Shelf zones were interpreted based on works of Maia de Almeida et al. (2016) which were modified according the present results.

4.3.3 Acquisition and processing of the sedimentological samples

At all, 22 marine sedimentary samples were collected from 1993 to 2003 by Geocosta I, Geocosta III, and Geomar XVIII projects in partnership with the of Marine and Energy-applied Geology and Geophysics Laboratory (LGMA) of the Federal University of Ceará (UFC). These samples are distributed along the entire eastern continental shelf of Ceará with depths varying from 7 to 51 m (Figure 6). The grain-size analyses were realized using 100g of each sediment sample which were washed and dried at 60°C. Subsequently, the samples were sieved in an interval from 0.062 to 4 mm, in order to keep only the gravel and sand fractions. After the dry sieving, 300 species were selected on the sand fraction (0.177 and 0.125 mm) conforming the methodology proposed by Tinoco (1989). The biotic components were analysed through a binocular stereomicroscope in order to identify the main constituents of the sediments. The benthic communities were plotted on the geohabitat map and the facies map that uses the classification adapted of Larssonneur (1977) adapted by Dias (1996) and Freire et al. (1997). The facies map was adapted from Maia de Almeida et al. (2021).

4.3.4 Statistical treatment

Statistical analyses were made conforming the classification of Dajoz (1983) in order to show the mode of distribution and abundance of the species using relative analysis and frequency of abundance.

The interpretation of the results was carried out based on the values obtained for each component according to Dajoz (1983): principal (frequency above 5%); accessory (between 5 and 1%) and trace (less than 1%).

After these calculations, the species were grouped into three categories according to the Dajoz classification (1983): Constants (species present in over 50%); accessories (occurring between 25 to 49% of the samples) and accidental (present in less than 25% of the samples).

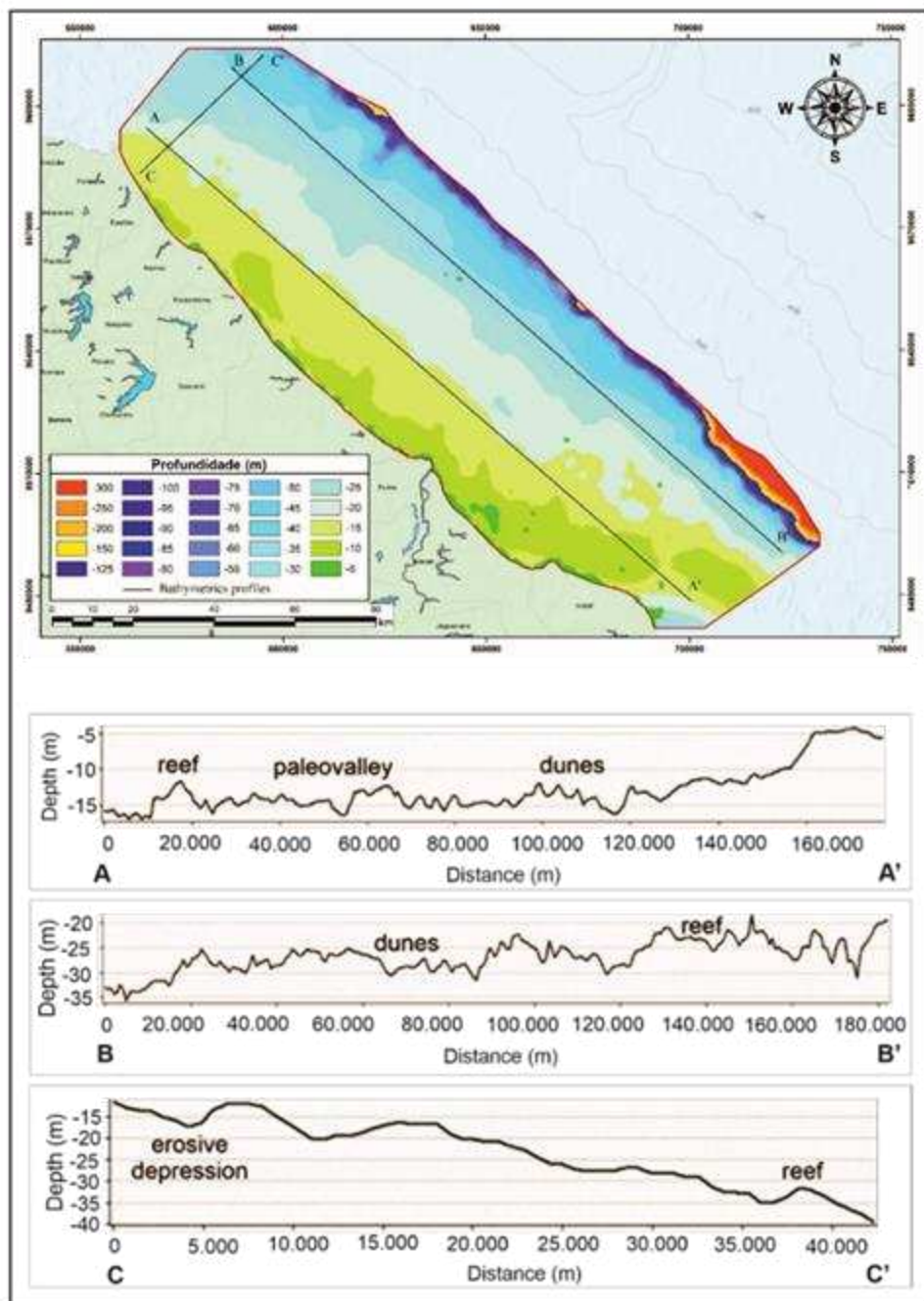
Multivariate statistical analyses were used to show how the constituents are related to each other as well as to evaluate their correlations with abiotic factors such as depth, sedimentary facies and shelf zones. The biplots principal component analysis (PCA) method was performed using Past software (HAMMER et al. 2001).

4.4 RESULTS

4.4.1 Seabed geomorphology as an indicator of marine geodiversity

The bathymetric model and profiles show the irregularity of the seabed morphology of the eastern Ceará Continental Shelf (Figure 2). Some features are also observed in Landsat images. The A-A' profile presents morphologies that are a dune field (15 m), a submerged reef (15 m) and a paleovalley (18 m) which displays a U-shape. The B-B' profile presents submerged dunes distributed between depths of 25 and 32 m and a reef construction at 25 m. The C-C' is transversal profile that shows an irregular relief with the presence of features like an erosive depression surface at the depth of 15 m and a reef construction at 35 m of depth.

Figure 2 - Bathymetric model of the eastern continental shelf of Ceará using GEBCO 2021 data. Longitudinal (A-A', B-B') and transversal (C-C') bathymetric profiles are presented highlighting features such as dunes, reef and paleovalley.

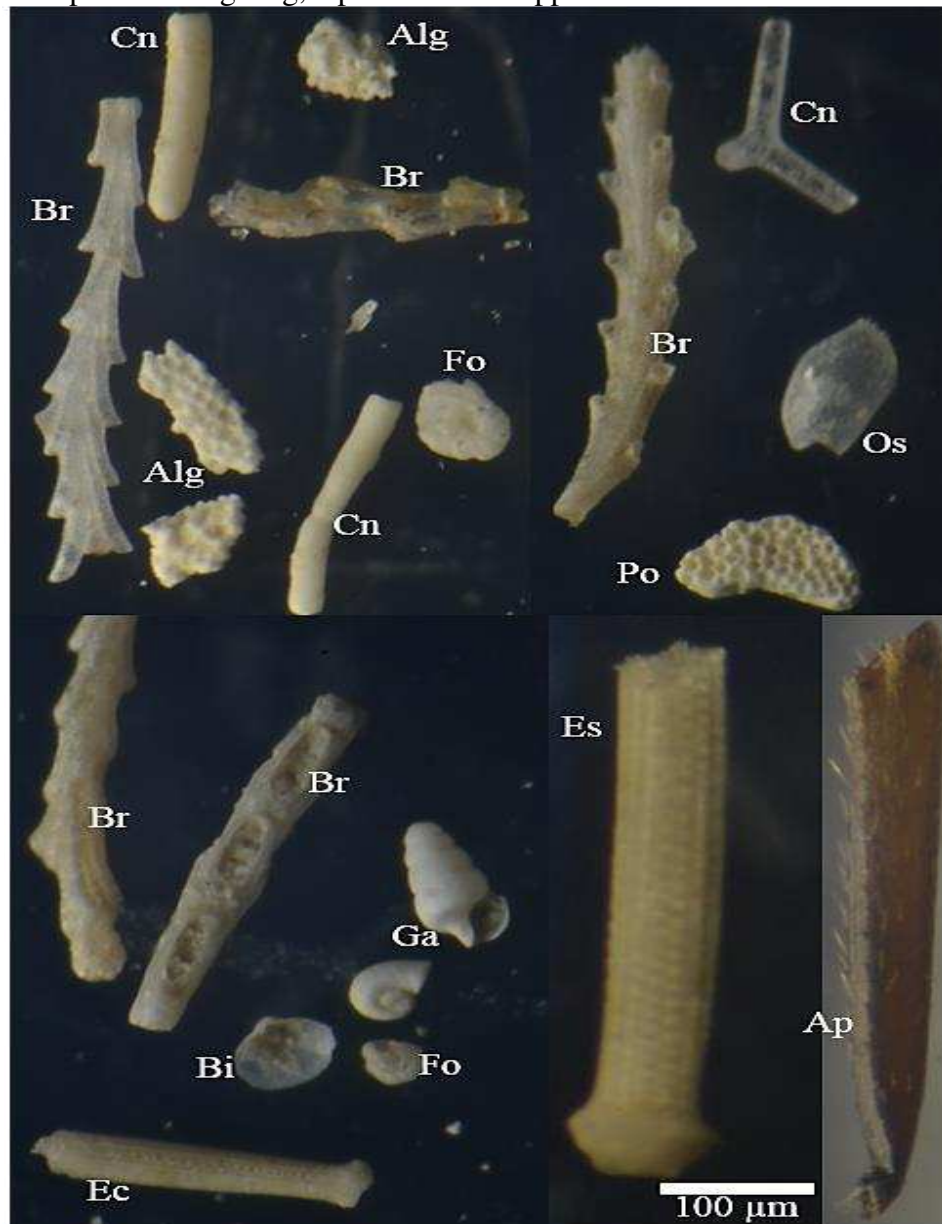


Source: Done by the author

Benthic community analyses revealed eight taxonomic groups along the study area: calcareous algae fragment of the genus *Halimeda* and *Lithothamnium*, Bryozoa (fragments), Cnidaria (coral fragments), Arthropoda (crustacea and ostracoda), Echinodermata (echinoidea - sea urchin spines), Foraminifera, Molluscs (bivalvia and gastropoda) and porifera (sponge spikes) (Figure 3 and Table 1).

Figure 3 - Biogenic components found on the eastern shelf of Ceará. Alg: Calcareous alga, Br: Bryozoa, Fo: Foraminifera, Cn: Cnidaria, Os:

Ostracoda, Po: Porifera, Ga: Gastropoda, Bi: Bivalve, Ec: Echinoidea, Es: Spine of Hedgehog, Ap: Crustacean appendix.



Source: Done by the author

Table 1 - Qualitative analyses performed on 22 biogenic sediments showing what biotic components are present in each sample.

Taxonomic Grup	Samples																					
	10	14	40	44	47	61	64	82	246	262	318	330	420	430	439	451	475	509	517	568	589	603
Calcareous algae			X	X	X		X	X	X	X		X	X				X	X	X	X		
Bryozoa	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cnidaria (fragment of coral)				X	X		X	X	X	X	X	X	X		X		X	X	X			
Arthropoda (Crustacea, Ostracoda)				X	X			X		X	X											
Arthropoda (apêndice de Crustacea)														X								
Echinodermata	X	X												X	X	X	X		X		X	X
Foraminifera	X			X			X			X	X	X	X	X	X		X		X	X	X	X
Mollusca (Bivalvia)	X																					X
Mollusca (Gastropoda)	X	X					X						X	X	X	X	X	X	X		X	X
Porifera					X			X	X	X		X	X							X		

Source: Done by the author

Five zones were identified based on the depth and the seabed morphology based on Maia de Almeida et al. (2016) (Figure 4). In this research, we expanded the area to englobe all the eastern continental shelf of Ceará:

Zone 1 includes the inner continental shelf (0 - 20 m). It is characterized by being a zone of sediment in suspension (Maia De Almeida et al. 2016) and it presents a longitudinal dune field in front of Icapuí. In this zone, all eight taxonomic groups of the benthic community (calcareous algae, arthropoda, bryozoa, echinodermata, foraminifera, cnidaria, molluscs and porifera) were identified in the study area. The facies map indicates that this zone presents BS, BSG, BLS, LBS and LS.

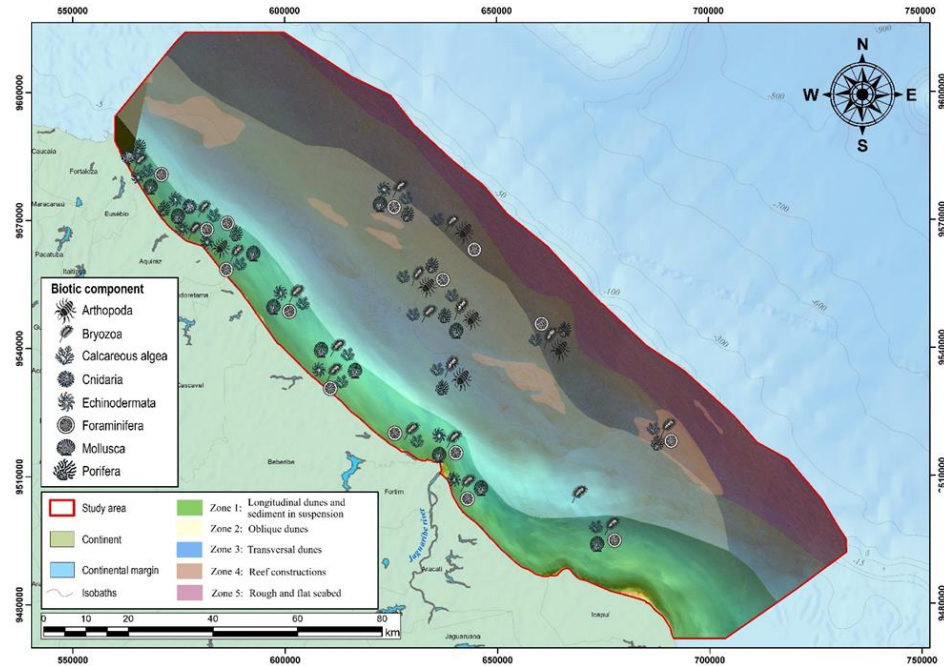
Zone 2 is constituted of oblique dunes observed between the depth of 15 and 25 m (Maia De Almeida et al. 2016). There are seven of the eight biotic components. Only cnidaria is not present in this zone. This region is extremely heterogeneous and Monteiro (2011) identified features like sandy plain, sandy patches and reefs. The sedimentary facies are mainly BS, BSG, BS, LBS and LS.

Zone 3 is composed of transversal dunes which have a good representation along the continental shelf between 25 and 40 m (Maia De Almeida et al. 2016). The biotic components are represented in this zone by five taxonomic groups: arthropoda, calcareous algae, bryozoa, foraminifera and porifera. BS, BSG, BLS and LBS facies constitute the seabed.

Zone 4 is classified as a zone of reef constructions and presents cnidaria assembly near to Fortaleza. It also can be found near to municipality of Icapuí at the outer continental shelf, a reef with the occurrence of foraminifera, calcareous algae and bryozoa.

The last one, zone 5 at 40 - 60 m is characterized by a seabed with a rough texture and reflectance with dark tones. No sample was collected in this zone. There is an extensive carbonate bank in a flatbed (Maia De Almeida et al. 2016). The facies are mainly BSG and BS, LBS also occurs in the NW of the area.

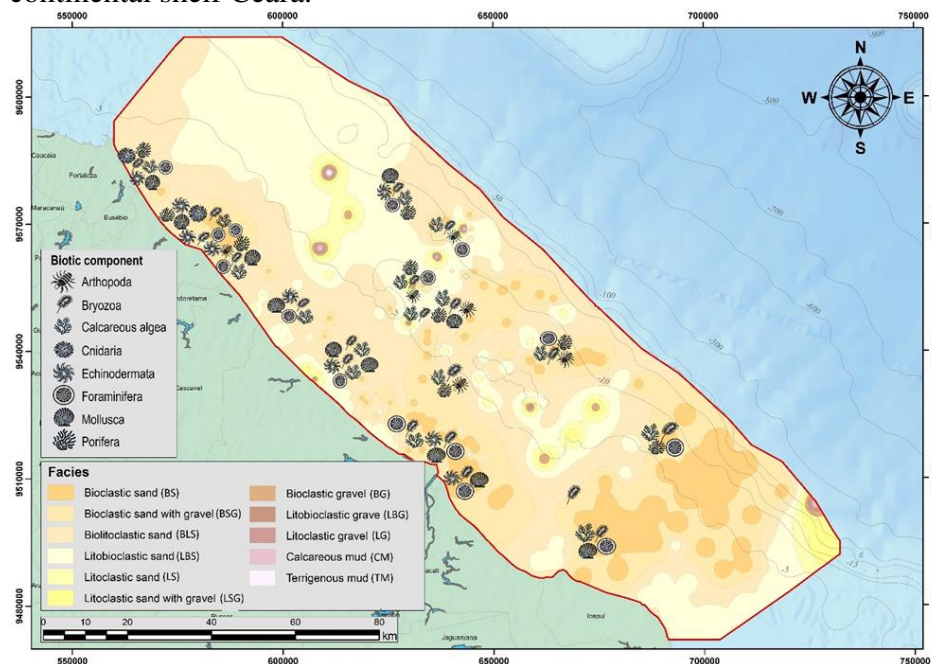
Figure 4 - Geohabitat map of the continental shelf of Ceará adapted of Maia de Almeida et al. 2016. Different zones present diverse morphological and sedimentary features such as oblique and transversal dunes and reef constructions.



Source: Done by the author

The sedimentary facies map analysis shows the occurrence of the biotic components (calcareous algae, bryozoa, arthropoda, cnidaria, echinodermata, foraminifera, molluscs and porifera) in very different sedimentary facies mainly Bioclastic Sand (BS), Biolitoclastic Sand (BLS), Bioclastic sand with gravel (BSG) and Bioclastic gravel (BG) (Figure 5).

Figure 5 - Facies map adapted of Maia de Almeida et al. (2021) showing the distribution of eight biogenic components identified along the eastern continental shelf Ceará.

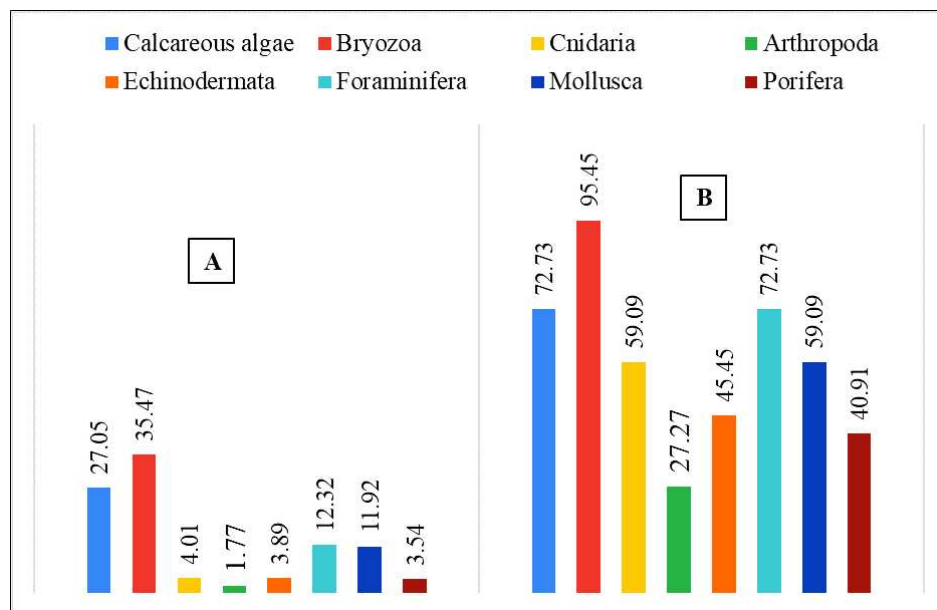


Source: Done by the author

4.4.2 Representation and distribution of the benthic communities in the Ceará continental shelf

Eight different groups of organisms were identified on the analysed samples with predominance of bryozoa (35.5%), calcareous algae (27%), foraminifera (12.3%), molluscs (12%), cnidaria (4%), echinodermata (3.9%), porifera (3.5%) and arthropoda (1.7%) (Figure 6A). Four of them (bryozoa, calcareous algae, foraminifera and molluscs) were the most abundant and classified as principal (5%) according to Dajoz (1983). The other components were classified as accessory (4.99 and 1%): cnidaria, echinodermata, porifera and arthropoda.

Figure 6 - Distribution of the biotic components. A) Relative frequency (RF) of the main groups of organisms identified on the analysed bioclastic sediments; B) Occurrence frequency (OF) of biotic components showing the predominance of each group.



Source: Done by the author

By examining the frequency of occurrence of each biogenic component, it was observed that five groups were classified as constant: bryozoa (95.45%), calcareous algae (72.73%), cnidaria (59.09%), foraminifera (72.73%) and molluscs (59.09%) according Dajoz (1983). While the echinoderms (45.45%), porifera (40.91%) and arthropoda (27.27%) were classified as accessory (Figure 6B and Table 2).

Table 2 -Occurrence frequency (%) and classification (Dajoz 1983) of the biotic components. p = number of stations in which each of the biogenic occurred; P= total number of stations; FO= occurrence frequency.

Biogenic components	p	P	FO (%)	Classification
Calcareous algae	16	22	72,73	constant
Bryozoa	21	22	95,45	constant
Cnidaria	13	22	59,09	constant
Arthropoda	6	22	27,27	accessory
Echinodermata	10	22	45,45	accessory
Foraminifera	16	22	72,73	constant
Molluscs	13	22	59,09	constant
Porifera	9	22	40,91	accessory

Source: Done by the author

The bryozoa is very abundant in the study area with a percentage of 35.5% of relative frequency (Figure 6A) and a frequency of occurrence of 95.45% (Figure 6B).

Calcareous algae are the second most abundant with 27.06% (accessory) of relative frequency and 72.73% (constant) of occurrence frequency. They can be branched or not, free or fixed and are the most abundant on northeastern Brazil with an important role of carbonate production (Dias 2000, Lemos & Terra 2005). In the study area, they are type Rhodophyta (red algae) and Chlorophyta (green algae). In accordance, Pinheiro et al. (2019) found mainly shells and biodebris mostly constituted of calcareous algae and fragments of molluscs (bivalves) in the continental shelf of Iracema, Fortaleza.

Foraminifera are the third most abundant in the study area with a representation of 12.32% and 72.73% conforming of the relative and occurrence frequency, respectively. Benthonic foraminifera are a group that contributes considerably to the composition of the biogenic sediment on the Eastern continental shelf of Ceará. It is classified as a constant and principal group.

The molluscs are represented by the gastropods and bivalve classes. They present a relative frequency of 11.62% that classified it as a principal group. In relation to the occurrence frequency, they represent 59.09% being classified as a constant group. Similar studies developed on continental shelf of Rio Grande of Sul, Santa Catarina, Bahia and Pernambuco have found molluscs as the most abundant group (Lopes & Buchmann 2008, Gré 1989, Poggio et al. 2009, Oliveira 2012).

Cnidarians constitutes 4.01% and 59.09 % of relative and occurrence frequency, respectively, being classified as an accessory and constant group.

Echinodermata presents 3.88% of RF and 45.45% of being considered an accessory both related to its frequency and its occurrence. Similarly, Porifera is classified as an accessory group in both frequencies with a percentage of 3.54% and 40.91% (OF).

Finally, the Arthropods represent 1.77% (RF) and 27.27% (OF) and also is considered accessory in both frequencies. They were identified by the subclasses Crustacea and Ostracode.

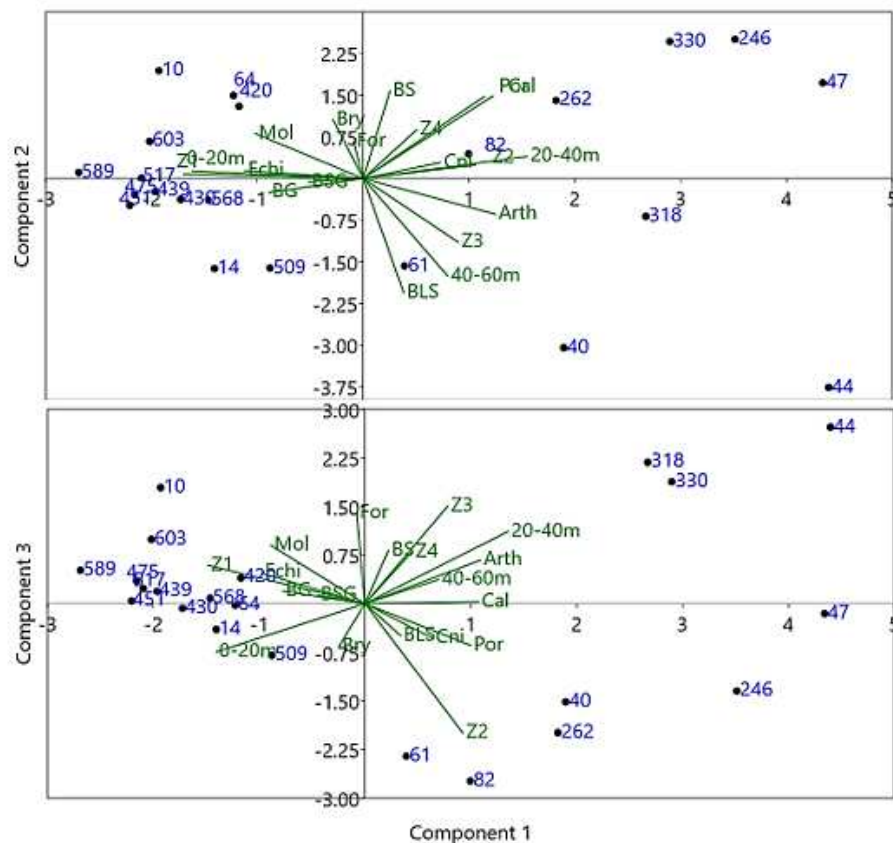
4.4.3 PCA: how the geodiversity and the benthic communities are related?

Quantitative analyses were carried out to understand what are the dominant and determinant variables which control the distribution of the benthic organisms. The PCA biplot of the variables (biotic components, depth, facies and zones) permit the interpretation of the correlation between them (Table 3 and Figure 7).

Table 3 - Factorial axes resulted of the PCA showing 3 axes with the eigenvalue >1. Cal: calcareous algae; Cni: cnidaria; Arth: arthropoda; Por: porifera; Bry: bryozoa; For: foraminifera; Echi: Echinodermata; Mol: molluscs, BSG: Bioclastic sand with gravel, BLS: Biolitoclastic Sand, BS: Bioclastic Sand, BG: Bioclastic Gravel, Z1: zone 1; Z2: zone 2; Z3: zone 3; Z4: zone 4.

Variable	PC 1	PC 2	PC 3	Variable	PC 1	PC 2	PC 3
Cal	0.66	0.561	0.0101	40 – 60 m	0.430	-0.663	0.137
Cni	0.39	0.108	-0.197	BSG	-0.277	-0.0221	0.048
Arth	0.67	-0.24	0.248	BLS	0.206	-0.776	-0.18
Por	0.61	0.557	-0.239	BS	0.136	0.596	0.303
Bry	-0.15	0.398	-0.245	BG	-0.480	-0.0953	0.071
For	-0.04	0.251	0.517	Z1	-0.916	0.0293	0.219
Echi	-0.60	0.053	0.174	Z2	0.572	0.0917	-0.74
Mol	-0.54	0.304	0.332	Z3	0.483	-0.432	0.55
0 – 20 m	-0.87	0.049	-0.277	Z4	0.27	0.331	0.29
20 – 40 m	0.83	0.150	0.412				

Figure 7 - Principal Component Analysis (PCA) biplot for the biotic and abiotic variables of the eastern continental shelf of Ceará. PC1 explains 29,50% of the variation, PC2 14,50% and PC3 10,64%. Cal: calcareous algae; Cni: cnidaria; Arth: arthropoda; Por: porifera; Bry: bryozoa; For: foraminifera; Echi: Echinodermata; Mol: molluscs, BSG: Bioclastic sand with gravel, BLS: Biolitoclastic Sand, BS: Bioclastic Sand, BG: Bioclastic Gravel, Z1: zone 1; Z2: zone 2; Z3: zone 3; Z4: zone 4.



Source: Done by the author

The PCA biplot diagram indicates that the PC1 holds the account for 29,50% of dataset variance. Some biotic components (calcareous algae, porifera and cnidaria), BS facies, 20 - 40 m depth and zone (Z2, Z4) are positively correlated according to PC1. The calcareous algae and porifera variables present the best correlations between them. On the other hand, the echinodermata, molluscs, 0 – 20 m depth, BSG and BG facies and zone 1 (Z1) are negatively correlated.

PC2 presents positive correlations between bryozoan, foraminifera, and bioclastic sand (BS). Differently, Arthropoda, 40 - 60 m depth, zone 3 and bioliticlastic sand facies (BLS) are negatively correlated.

The PC3 accounts for 10,64% of variance and show a positive correlation between calcareous algae and depth of 20 - 40 m. The arthropoda, 40 - 60 m depth and zone 3 are also positively correlated. It is worth mentioning that molluscs, echinodermata, zone 1 (Z1), BG and BSG facies are positively correlated. In addition, the PC3 presents negative correlation between porifera, cnidaria and zone 2 (Z2).

Some groups of samples were identified conforming the positive and negative correlations. Samples of group A (47, 82, 246, 262, 330) reflect the association which is strongly correlated with PC 1. It means that those samples are mostly enriched of calcareous

algae, porifera and cnidaria and can be found on depth of 20 - 40 m and are well distributed in zone of oblique dune (Z2) and zone of reef constructions (Z4).

The group B (10, 64, 420, 517, 589, 603) presents echinodermata and molluscs and tends to occur in depths of 0 – 20 m, in the zone 1 (Z1) correlated to the BG and BSG facies. The group C (40, 44, 61 and 318) presents a negative correlation in PC2 and presents arthropoda, in an environment of 40-60 m with transversal dunes (zone 3), constituted of BLS facies. This means that groups B and C have an inverse correlation in PC1 which mean that the group B are poorly represented by the variables identified in group C and inversely.

4.5 DISCUSSION

The spatial distribution of the biogenic components showing the different geohabitats of the area. The figure shows that with the increasing depth and the variety of shelf zones, there is a differentiation in composition and abundance of the benthic communities. Considering that the bryozoans are the most abundant biotic component found on the Eastern Ceará continental shelf, this result is similar to the study of Santos et al. (2019) which showed that the most abundant biogenic components of another continental shelf in South Atlantic (Sergipe and Alagoas states) are foraminifera, red algae and bryozoans. According to Almeida (2011), the continental shelf environments are the place where highest values of diversity and richness of bryozoans occur. Then, this research is in conformity with Almeida (2011). The same results are notified in the continental shelf of Santa Catarina and Bahia by Gré (1989) and Poggio et al. (2009) who registered values of bryozoans in abundance. In contrast, other authors (Oliveira 2012, Nascimento 2016) found less than 5% in the continental shelf of Pernambuco.

Depth plays a significant role on the distribution of each variable. Group A occurs on the medium shelf (20 - 40 m). In contrast, group B is localized at 0 - 20 m in the inner shelf and the group C occurs in the outer shelf at depth of 40 - 60 m. The environmental conditions at each sample point (depth, temperature, pressure, currents, characteristics of the bottom of the water column, turbidity, among others) promote conditions for reproduction of that determined biotic groups. Group A is distributed in two specific zones which are zone 2 (zone of oblique dunes) and zone 4 (zone of reef constructions), while the group B occurs in the zone 1 (zone of longitudinal dunes and sediments in suspension) and group C in zone 3 (zone of transversal dunes). Then, the depth and seabed morphology have influence in the distribution of the benthic organisms of the eastern Ceará continental shelf.

Similarly, the abiotic factor of the sedimentary facies also contributes to the heterogeneous distribution of the benthic communities. Porifera, calcareous algae, and cnidaria tend to occur in BS facies. In addition, the BSG and BG facies are favorable to the development of molluscs and echinodermata while the BLS, to the arthropoda. As mentioned before, the groups B and C show an inverse correlation with each other. This means that, if one group exists, the other group tends not to exist or exist in a small amount. These results show that the physical environment (abiotic factors) can allow the development of only certain groups. The benthic communities can be influenced by environmental factors (Lundblad et al. 2006, Jerosch et al. 2015, Goes et al. 2019). Another hypothesis is that these two groups may generate some competition in the environment, not allowing the other group to exist or to reproduce (biotic factor) (e.g. Peterson 1980, Quinn 1982, Kohler 1992).

It is known that the benthic community distribution is controlled by physical (environmental) and biological processes (Cartes & Carrasson 2004, Locker et al. 2010, Kaskela et al. 2017). However, in the study area, localized in a tropical semiarid climate which has a particularity of low input of sediment, this research is the first approach about the heterogeneity and diversity of the seafloor and of the benthic community of the eastern Ceará continental shelf and their correlation.

The results of the present study reveal the importance for ecological studies, considerate by Dartnell & Gardner (2004) as a basic data set, which describes the superficial characteristics of the seafloor as the baseline for habitat study. The combination of bathymetric data, seabed morphology and sedimentary facies reveals the great geodiversity of the eastern continental shelf of Ceará. Correlated to the knowledge about the benthic communities and their distribution influenced by environmental settings, this research may be considered an important study on the distribution of geohabitats throughout the studied area. Here, the first map of the benthic distribution of the eastern Ceará continental shelf was presented.

Similar to what was observed by Matthews-Cascon et al. (2018) regarding marine benthic communities affected by the Doce River (southwestern Atlantic), in Ceará continental shelf with the increasing distance from the coast, in addition to increasing depth, there is a differentiation in composition and abundance of the benthic communities. Furthermore, depth, seabed morphology and sedimentary facies are important factors that explain variations in composition and diversity across the continental shelf. The results provide an invaluable baseline for measuring the possible future effects on shallow and mesophotic communities of the anthropogenic activities related to Blue Economy.

4.6 Conclusions

This research presents the main constituents of the benthic assembly of the eastern Ceará continental shelf that are: bryozoans, calcareous algae, foraminifera and molluscs. These organisms are responsible for the majority of the carbonate sedimentation of the study area. The calcareous algae are mainly of type Rhodophyta (red algae) and Chlorophyta (green algae) and the molluscs are represented by Gastropods and Bivalvia classes. Bryozoa showed the highest relative frequency of occurrence followed by calcareous algae, cnidaria, foraminifera and molluscs. These groups are constant while Cnidaria, Arthropods, Echinoderms, and Porifera are considered accessory constituents.

The PCA biplot analyses presented a positive correlation between calcareous algae, porifera, cnidaria, 20-40 m depth, zones 2 and 4 (longitudinal dunes and reef constructions), and BS facies (group A). In addition, Echinodermata, molluscs, 0-20 m depth, BSG and BG facies and zone 1 (sediment in suspension) (group B). Arthropoda, 40-60 m depth, zone 3 (transversal dunes) and the BLS facies also present correlation (group C). Groups B and C tend not to occur together.

This research identifies, for the first time, the relationships between the benthic community distribution and the abiotic factors of the marine environment. It presents essential results for quantitatively and qualitatively analyses about the composition, frequency of occurrence, diversity of the benthic community of the Eastern continental shelf of Ceará. Depth, seabed morphology and sedimentary facies are important factors that explain variations in composition and diversity across the continental shelf.

These analyses revealed the real composition of the benthic assembly and its correlation with the geodiversity. Therefore, these results are considered an invaluable baseline for measuring and monitoring the impacts of possible future anthropogenic and industry activities related to Blue Economy in the semiarid continental shelf, subsidizing sustainable development.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001 provided by the Geology Graduate Program (PPGG) of the Federal University Ceará (UFC). The authors thank the Marine and Energy-

applied Geology and Geophysics Laboratory (LGMA) and the Geoprocessing Laboratory (GEOCE) of Geology Department. It is very important to thank the Ceará Marine Invertebrate Laboratory of the Biology Department, especially in the person of Barroso C.X., for the great help with equipment, helpful insights for the progress of this work which is a part of PhD thesis of the principal author.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA V. E. S. Influência da Latitude na distribuição geográfica dos Briozoários (Ordem Cheilostomata) da Plataforma Continental da Bahia, Brasil. 2011. Tese (Doutorado), Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.
- ASSIS H. M. B., FREIRE G. S. S. [et al.]. 2007. Recife. Informe de Recursos Minerais – Programa Geologia do Brasil. Série Recursos Minerais Marinhos, Nº 01 – Avaliação dos Recursos Não Vivos da Plataforma Continental Brasileira.
- BAUCH, H.A.; MUELLER-LUPP, T.; TALDENKOVA, E.; SPIELHAGEN, R.F.; KASSENS, H.; GROOTES, P.M.; THIEDE, J.; HEINEMEIER, J.; PETRYASHOV, V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Global and Planetary Change*, 31(1-4), 125–139, 2001. [https://doi.org/10.1016/s0921-8181\(01\)00116-3](https://doi.org/10.1016/s0921-8181(01)00116-3).
- BROOKS, G.R.; DOYLE, L.J.; SUTHARD, B.D.; LOCKER, S.D.; HINE, A.C. Facies architecture of the mixed carbonate/siliciclastic inner continental shelf of west-central Florida: Implications for Holocene barrier development. *Marine Geology*, 200, 325-349, 2003.
- CARNEIRO, P.B. DE M.; MORAIS, J. O. Carbonate sediment production in the equatorial continental shelf of South America: quantifying *Halimeda incrassata* (Chlorophyta) contributions. *J. South Am. Earth Sci.*, 72, 1–6, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.011>.
- CARTES, J.E.; CARRASSON, M. Influence of trophic variables on the depth-range distribution and zonation rates of deep-sea megafauna: the case of the Western Mediterranean assemblages. *Deep Sea Research Part I*, 51 :263-279, 200. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.10.001>
- CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H. R.; SOUSA, M. O. L.; FUCK, R. A. Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *Journal of Geodynamics*, v. 54, p. 29– 42, 2012.
- CAVALCANTI, V.M.M. O aproveitamento de granulados bioclásticos marinhos como alternativa para a indústria de fertilizantes no Brasil – Relatório Final. Brasília: DNPM 85, 2020.

- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2007. Potencialidades dos granulados marinhos da plataforma continental leste do Ceará. https://www.sgb.gov.br/documents/d/guest/rel_anual_2007-pdf Acesso em: 29 de novembro de 2024.
- COUTINHO, P.N., MORAIS, J.O. Distribución de los sedimentos en la plataforma Norte e Nordeste del Brasil. *Arquivos Ciências do Mar*, 10:79–90, 1970.
- COUTINHO, P. N. Geologia marinha da plataforma continental Alagoas-Sergipe. 1976. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 1976.
- CAVALCANTI, V.M.M. Plataforma continental: a última fronteira da mineração brasileira. Brasília: DNPM, 2011. 104 p, 2011.
- DARTNELL, P.; GARDNER, J. V. Predicted Seafloor Facies of Central Santa Monica Bay, California. USGS Open-file Report, 2004-1081, Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2004.
- DIAS, G.M.T. Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas. *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia*. Vol. 3., 1996.
- DIAS, G. T. M. Granulados Bioclásticos – Algas Calcárias. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18(3), 2000. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2000000300008>.
- DAJOZ, R. Ecologia geral. 4 eds., Petrópolis Rio de Janeiro, Vozes, 472p., 1983.
- ERDEY-HEYDORN M.D. 2008. An ArcGIS seabed characterization toolbox developed for investigating benthic habitats. *Mar Geod*, 31 :318 – 358. <https://doi.org/10.1080/01490410802466819>
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos Sungai Bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27 (1): 3-26, 1957.
- FONTES, L.C.S.; SUFFREDINI, M.; MENDONÇA, J.B.; QUEIROZ, E.V.; SILVA, D.S.; SANTOS, J.R. Sedimentos biodetríticos da Plataforma Continental Sul de Alagoas. *Anais do XIII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário ABEQUA III Encontro do Quaternário Sul-americano*. 2011.
- FREIRE, G. S. S. Geologia Marinha da Plataforma Continental do Estado do Ceará. 1985. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 1985.
- FREIRE, G.S.S.; CAVALCANTI, V.M.M.; L.P.; LIMA, S.F. Classificação dos sedimentos da plataforma Continental de Estado do Ceará. *In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*. FORTALEZA. *Anais [...]*. Fortaleza, 209-211 P, 1997.
- FREIRE, G. S. S.; CAVALCANTI, V. M. M. A cobertura sedimentar Quaternária da Plataforma Continental do Estado do Ceará. Fortaleza: DNPM 10º Distrito/UFC. Dep. Geol. Lab. de Geol. Mar. Apl., 42p., 1998.

- GISCHLER, E.; HUDSON, J. H.; HUMBLET, M.; BRAGA, J. C.; SCHMITT, D.; DOMINIK, S.; ISAACK, A.; EISENHAUER, A.; CAMOIN, G. F. Holocene and Pleistocene fringing reef growth and the role of accommodation space and exposure to waves and currents (Bora Bora, Society Islands, French Polynesia). *Sedimentology*, 2018. <https://doi.org/10.1111/sed.12533>
- GRÉ, J. C. R. Aspectos sedimentares da plataforma continental de Santa Catarina – Brasil. *Geosul*. 94 - 98p, 1989.
- GOES, E. R.; BROWN, C. J.; ARAÚJO, T. C. Geomorphological Classification of the Benthic Structures on a Tropical Continental Shelf. *Front. Mar. Sci.*, 6 :47, 2019. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00047> .
- GOMES, M. P.; VITAL, H.; BEZERRA, F. H. R.; DE CASTRO, D. L.; MACEDO, J. W. D. P. The interplay between structural inheritance and morphology in the equatorial Continental Shelf of Brazil. *Mar. Geol.*, v. 355, p. 150–161p, 2014.
- GOMES, M.P.; VITAL, H.; DROXLER, A.W. Terraces, reefs, and valleys along the Brazil northeast outer shelf: deglacial sea-level archives? *Geo-Marine Lett.*, 40, 699–711, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00367-020-00666-4>
- HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Paleontol Electron*, 4:1–9p, 2001.
- HARRIS, P.T.; DAVIES, P.J.; MARSHALL, J.F. Late Quaternary sedimentation on the Great Barrier Reef continental shelf and slope east of Townsville, Australia. *Marine Geology*, 94, 55-77p, 1990.
- HARRIS, P.T.; MACMILLAN-LAWLER, M.; RUPP, J.; BAKER, E.K. Geomorphology of the oceans. *Marine Geology*, 352:4, 24p, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.011>
- HOPLEY, D. Coral reef growth on the shelf margin of the Great Barrier Reef with special reference to the Pompey Complex. *Journal of Coastal Research*, 22, 150-174p, 2006.
- JACKSON, J. B. C.; KIRBY, M. X.; BERGER, W. H.; BJORDAL, K. A.; BOTSFORD, L. W.; BOURQUE, B. J.; et al. Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 293, 629–638p, 2001. <https://doi.org/10.1126/science.1059199>
- JEROSCH, K.; KUHN, G.; KRAJNİK, I.; SCHARF, F.K.; DORSCHER, B. A geomorphological seabed classification for the Weddell Sea, Antarctica. *Marine Geophysical Researches*, 37:127–141, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11001-015-9256-x>
- KASKELA, A.M.; ROUSI, H.; RONKAINEN, M.; ORLOVA, M.; BABIN, A.; GOGOBERIDZE, G. et al. Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: the role of geodiversity in Eastern Gulf of Finland ecosystems. *Cont. Shelf Res.*, 142 :1–13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.05.013>
- LEMONS, V. B.; TERRA, G. J.S. Bioelementos de Rochas Carbonáticas. Revisada e Ampliada, 2ª edição, UFRGS. Pág: 10, 2005.

- LARSONNEUR, C. La caryographie des dépôts meubles sur le plateau continental français : méthode mise du point et utilisée en Manche. *Journal de Recherche Oceanographique*, [S.l.]. 34–39p, 1977.
- LIMA FILHO, R.P.; GASTÃO, F.G.C.; CASTELO BRANCO, M.P.N.; PINHEIRO, L.S. Caracterização Geomorfológica e Sedimentológica da Plataforma Continental Interna de Fortaleza. In: SINAGEO, Paisagem e Geodiversidade, XII Crato, Anais Crato: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2018.
- LUNDBLAD, E.; 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. *Marine Geodesy*, 29(2):89–111p, 2006.
- KOHLER, S.L. Competition and the Structure of a Benthic Stream Community. *Ecological Monographs*, 62, No. 2: 165-188, 1992. <https://doi.org/10.2307/2937092>
- LOCKER, S.D.; ARMSTRONG, R.A.; BATTISTA, T.A.; ROONEY, J.J.; SHERMAN, C.; ZAWADA, D.G. Geomorphology of mesophotic coral ecosystems: current perspectives on morphology, distribution, and mapping strategies. *Coral Reefs*, 29 :329–345, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0613-6>
- LOPES, R.P.; BUCHMANN, F.S.C. Comparação tafonômica entre duas concentrações fossilíferas (shell beds) da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. *Journal of Geoscience*, 66 – 69p, 2008.
- MAIA, L.P.; FREIRE, G.S.S.; PESSOA, P.R.S.; RODRIGUES, A.C.B.; MAGALHÃES, S.H.O.; ARAÚJO, P.S.A. Transporte de sedimentos na região costeira do Ceará. Fluxo de sedimentos e caracterização granulométrica. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, XVII. [Anais...]. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Geologia, v. 15, 182-192p, 1997.
- MAIA, L.P.; VASCONCELOS, F.P.; MONTEIRO, L.H.V.; REBOUÇAS, R.B.M.; MARTINS, M.B. Projeto executivo emergencial de proteção/recuperação da praia de Iracema. Prefeitura Municipal de Fortaleza. Programa de Recuperação do Litoral da Cidade. Laboratório de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, 2008 (Documento restrito).
- MAIA, G.A.M.; Amaral, V.V.M.; FREIRE, G.S.S.; MAIA DE ALMEIDA; N. Carbonate granulates from the continental shelf of the State of Paraíba, NE Brazil. *Geo-Marine Letters*, 2024. In press. Accepted in May 8th, 2024.
- MAIA DE ALMEIDA, N.; FREIRE, G.S.S.; SOUTO, M.V.S.; NORMANDO, M.N. Mapeamento de Estruturas Submersas e Sedimentologia Utilizando Dados SRTMPlus e Landsat 8: Região Adjacente ao Rio Jaguaribe, Plataforma Leste do Ceará. *Revista de Geologia*, 29, 133-146p, 2016.
- MAIA DE ALMEIDA, N.; FREIRE, G.S.S.; MORAIS, J.O.; NETO, A.R.X.; NETO, J.C.A.; PESSOA, P.R.S.; FERRO, I.M.M.; PINHEIRO, L.S. Plataforma continental do Ceará.

- Livro Plataforma Continental Brasileira serie II PGGM 2021 Vital Sperle Bastos 2. 71-121p, 2021.
- MANSO, V.A.V.; VALENÇA, L.M.M.; COUTINHO, P.N. Sedimentologia da Plataforma Continental. In: ESKINAZI-LEÇA, E.; NEUMANN-LEITÃO, S.; COSTA, M. F. (org.). Oceanografia um cenário tropical. Universidade Federal de Pernambuco. Edições Bagaço, p.59, 2004.
- MATTHEWS-CASCON, H.; BEZERRA, L.E.A.; BARROSO, C.X.; RABAY, S.G.; MOREIRA, A.K.; ROCHA, V.P.; SOARES, M.O. Marine benthic communities affected by the Doce River (southwestern Atlantic): Baseline before a mining disaster. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 1000–100p, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.020>
- MONTEIRO, L.H.U. Feições Superficiais da Plataforma Continental Cearense entre o Litoral de Fortaleza e Icapuí. 2011. Tese (Doutoramento em Geociências), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2011.
- MORAIS, J.O.; NETO, A.R.X.; PESSOA, P.R.S.; PINHEIRO, L.S. Morphological and sedimentary patterns of a semi-arid shelf, Northeast Brazil. *Geo-Marine Letters*, pp.8, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00587-x>
- MOURA, F.J.M. Aspectos sedimentares e potencialidades da plataforma continental do Ceará, entre Cascavel e Beberibe. 2014. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2014.
- NASCIMENTO, V.F., Análise dos Bioclastos Marinhos da Região Sul da Plataforma Continental de Pernambuco, Brasil. 2016. Trabalho de conclusão de curso de Bacharel (Graduação). Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2016.
- NOBLE-JAMES, T.; JESUS, A.; MCBREEN, F. Monitoring guidance for marine benthic habitats. Peterborough, UK, JNCC: Joint Nature Conservation Committee, 110p. (JNCC Report; 598), 2017. <https://doi.org/10.25607/OBP-1452>
- OLIVEIRA, N.; BASTOS, A.C.; QUARESMA, V.S.; VIEIRA, F.V. The use of Benthic Terrain Modeler (BTM) in the characterization of continental shelf habitats. *Geo-Marine Letters*, volume 40, 1087–1097p, 2020.
- OLIVEIRA, D. H. Sedimentação Biogênica da Plataforma Continental interna e media de Pernambuco com base na Distribuição de Foraminíferos e Fauna Associada. 2012. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2012.
- ORTIZ, G. P.; KAMPEL, M. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. V Simpósio de Nacional de Oceanografia. Oceanografia e Políticas Públicas Santos, SP, Brasil – 2011.
- PAIVA, S.V. et al. Marine carbonate mining in the Southwestern Atlantic: current status, potential impacts, and conservation actions. *Marine Policy*, 148, 105435, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105435>

- PETERSON, C.H. Approaches to the Study of Competition in Benthic Communities in Soft Sediments. In: KENNEDY, V.S., *Estuarine Perspectives*, Academic Press, 1980, 291-302, 1980. ISBN 9780124040601. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404060-1.50032-0>.
- PINHEIRO, L. et al. 2020. A Plataforma Continental Semiárida do Brasil. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F. M.; PINHEIRO, L.S. (orgs.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, p. 129-152, 2020. ISBN 978-65-992571-0-0.
- POGGIO, C.A.; SOUZA, F.B.C.; ALVES, O.F.S.; DOMINGUEZ, J.M.L. Distribuição dos componentes biogênicos nos sedimentos da área do canal de Salvador, Baía de Todos os Santos, Bahia. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 01, n. 01, 10-15p, 2009.
- POGGIO, C.A.; SOUZA, F.B.C.; ALVES, O.F.S.; DOMINGUEZA, J.M.L. Distribuição dos componentes biogênicos nos sedimentos da área do Canal de Salvador, Baía de Todos os Santos, Bahia. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 01(1):10-15, 2009.
- PINARD, V.; DUSSAULT, C.; OUELLET, J-P.; FORTIN, D.; COURTOIS, R. Calving rate, calf survival rate, and habitat selection of forest-dwelling caribou in a highly managed landscape. *J Wildl Manag*, 76:189-199p, 2012. <https://doi.org/10.1002/jwmg.217>.
- PINHEIRO, L.S.; GASTÃO, F. G.; LOUSADA, Y. T.C.; JÚNIOR, W.F.; BRANCO, M. P.C. Mapeamento de habitats marinhos da plataforma continental interna da praia de Iracema-fortaleza – Ceará. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 38, n. 3, 813 – 825p, 2019.
- QUINN, J.F. Competitive Hierarchies in Marine Benthic Communities. *A ecologia*, vol. 54, no. 1: 129-135, 1982. <https://www.jstor.org/stable/4216737>
- RICE, J. Environmental health indicators. *Ocean & Coastal Management*, 46, 3–4: 235-259, 2003. ISSN 0964-5691 [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(03\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(03)00006-1).
- STERNBERG, R.W.; NOWELL, A.R.M. Continental shelf sedimentology: scales of investigation define future research opportunities. *J. Sea Res.*, 41 (1), 55-71, 1999.
- SALAS-SA AVEDRA, M.; DECHNIK, B.; WEBB, G.E.; WEBSTER, J.M.; ZHAO, J.X.; NOTHDURFT, L.D.; CLARK, T.R.; GRAHAM, T.; DUCE, S. Holocene reef growth over irregular Pleistocene karst confirms major influence of hydrodynamic factors on Holocene reef development. *Quat. Sci. Rev.* 180, 157–176, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.11.034>
- SALAS, F.; MARCOS, C.; NETO, J.M.; PATRÍCIO, J.; PÉREZ-RUZAF A.; MARQUES, J.C. User-friendly guide for using benthic ecological indicators in coastal and marine quality assessment. *Ocean & Coastal Management*, 49, 5–6: 308-331, 2006. ISSN 0964-5691. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2006.03.00>.
- SANTOS, J., R.; SOUZA, R.M.; ANDRADE, E.; FONTES, L. C. S. Componentes biogênicos como indicadores ambientais da plataforma continental do Estado de Sergipe e sul de Alagoas. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 38, n. 2, 409 – 425 p., 2019.

- SILVA FILHO, W.F. Domínios Morfoestruturais da Plataforma Continental do Estado do Ceará. 2004. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.
- SILVA FILHO, W.F.; CASTRO, D.L.; CORRÊA, I.C.S.; FREIRE, G.S. Estruturas Rasas na Margem Equatorial ao Largo do Nordeste Brasileiro (Estado do Ceará): Análise de Relevo e Anomalias Gravimétricas Residuais. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(Supl. 1): 65-77, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000500007>
- SILVA, L.L.N.; GOMES, M.P. Statistical approach on mixed carbonate-siliciclastic sediments of the NE Brazilian outer shelf. *Geo-Marine Letters*, 40:10011013, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00625-8>
- SOARES, M.O.; CAMPOS, C.C.; CARNEIRO, P.B.M.; BARROSO, H.S.; MARINS, R.V.; TEIXEIRA, C.E. P.; MENEZES, M.O.B.; PINHEIRO, L.S.; VIANA, M.B.; FEITOSA, C.V.; SANCHEZ-BOTERO, J.I.; BEZERRA, L.E.A.; ROCHA-BARREIRA, C.A.; MATTHEWS-CASCON, H.; MATOS, F.O.; GORAYEB, A.; CAVALCANTE, M.S.; MORO, M.F.; ROSSI, S.; BELMONTE, G.; MELO, V.M.M.; ROSADO, A.S.; RAMIRES, G.; TAVARES, T.C.L.; GARCIA, T.M. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 19 (3), 267–278p, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.001>
- SOUZA-LIMA, W.; MANSO, C.L.C. Equinodermas. In: CARVALHO, I. S. *Paleontologia*. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciências, Volume 1. 675-700p, 2004.
- TINOCO I. M. Introdução ao estudo dos Componentes Bióticos dos Sedimentos Marinhos Recentes. Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 220, 1989.
- USGS/NASA. United States Geological Survey/National Aeronautics and Space Administration. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/> Acesso em: 20 mar. 2018 e 19 out. 2018.
- XIMENES NETO, A.R.; MORAIS, J.O.; CIARLINI, C. Modern and relict sedimentary systems of the semi-arid continental shelf in NE Brazil. *J S Am Earth Sci*, 84:56–68p, 2018a.
- XIMENES NETO, A.R.; MORAIS, J.O.; PAULA, L.F.S.; PINHEIRO, L.S. Transgressive deposits and morphological patterns in the equatorial Atlantic shallow shelf (Northeast Brazil). *Reg Stud Mar Sci*, 24:212– 224p, 2018b.

5 BENTHIC FORAMINIFERA AS ENVIRONMENTAL INDICATORS: A CASE STUDY FROM THE EASTERN CONTINENTAL SHELF OF CEARÁ, EQUATORIAL MARGIN OF BRAZIL

Abstract

Despite the ecological potential of recent benthic foraminifera along the continental shelf of Ceará, their distribution remains poorly documented. This study aims to investigate the ecological environment based on benthic foraminifera from the Eastern continental shelf of the Equatorial Margin of Ceará. For that, 22 sediment samples were collected and processed using the standard methodology for Quaternary calcareous microorganisms. Statistical analyses were carried out to determine ecological indices of diversity. Results show 14 genus classified as epifaunal and six genera as infaunal. Eight species were distributed along the shelf as the most abundant in all the study area. The diversity index has a value that varies between 0.77 and 2.54. The majority of samples have a diversity index value between $1 \leq H' \leq 3$, which means moderate diversity. The uniformity index in all sediment samples varied between 0.27 and 1.08, which indicates that the community varies from low, moderate or high evenness of the population. The dominance index has a range of values between 0.11 and 0.4 which belong to the low category, suggesting that there are not very dominant foraminiferal species. This study provides critical insights into the ecological characteristics of benthic foraminifera along the Eastern continental shelf of the Ceará, Equatorial Margin, indicating a balanced and relatively stable benthic foraminiferal community, with the absence of overwhelmingly dominant species, reflecting a well-distributed community structure. These findings allowed the classification of the Ceara continental shelf as an oligotrophic and a well oxygenated environment. The diversity indices show that, the actual condition of water is even good for the growth or habitat of foraminifera. This knowledge is particularly important for assessing environmental change and supporting sustainable management strategies but also establish a valuable baseline for future research and monitoring efforts in this region.

Keywords: Foraminifera diversity; Marine ecology; Brazilian Equatorial Margin

1.1 Introduction

The continental shelf of northeastern Brazil is characterized by warm waters, typical of the tropical zone [1, 2], although the semiarid climate of this region of Brazil is reflected in reduced input from river discharge, and negligible accumulation of terrigenous sediment [3]. The Brazilian coast may host a unique habitat for unicellular eukaryotes, where foraminifera adapted to a wide range of marine microhabitats [4,5]. Information about the distribution and abundance of foraminiferal species carry a valuable record of past oceanic conditions, thus they are commonly used as tools in paleoclimatic and oceanographic reconstructions [6, 7]. Their distribution provides reliable information about organic matter flux [8, 9, 10, 11], bottom water oxygenation [12, 13, 14] and hydrodynamic conditions [15, 16, 17]. Therefore, understanding the distribution and ecological response of benthic foraminifera is crucial, as they can indicate past environmental changes in the oceans and current ocean conditions [18].

Benthic foraminifera are typically found in sediments, where they actively move between layers; however, many species are found on hard rock substrates, attached to seaweeds, or sitting atop the sediment surface [19]. In addition, benthic foraminifera are environmental bio-indicators, especially in polluted and contaminated environments where their sensitivity to stressors is expressed by their assemblages, to alterations of the community dynamics [20]. Their associations are controlled by environmental characteristics, such as temperature, oxygen, food availability, CO₂, pollution and salinity, so that different genus characterize different sub-environments [6, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Changes in these associations, diversity, and variation in shell morphology of these organisms provide evidence of change in ecological parameters [28, 29, 30, 31].

Benthic foraminifera are an important source of information on past environmental variability. This group occupies perched epibenthic to deep infaunal microhabitats, utilizing a variety of trophic mechanisms. They can be differentiated by epifaunal (they live on the substrate) microhabitat which live in the upper 1 cm of sediment, and infaunal (they bury themselves a few centimeters in the substrate), which burrow into soft sediment below 1 cm of the sediment [8, 32, 33, 23]. Another important characteristic of benthic foraminifera is that they are able to survive or to proliferate in a wide range of marine environments, including extreme ecosystems, such as oligotrophic abyssal plains [34] or hydrothermal vents [35], cold seeps [36, 37, 38] and deep-sea trenches [39].

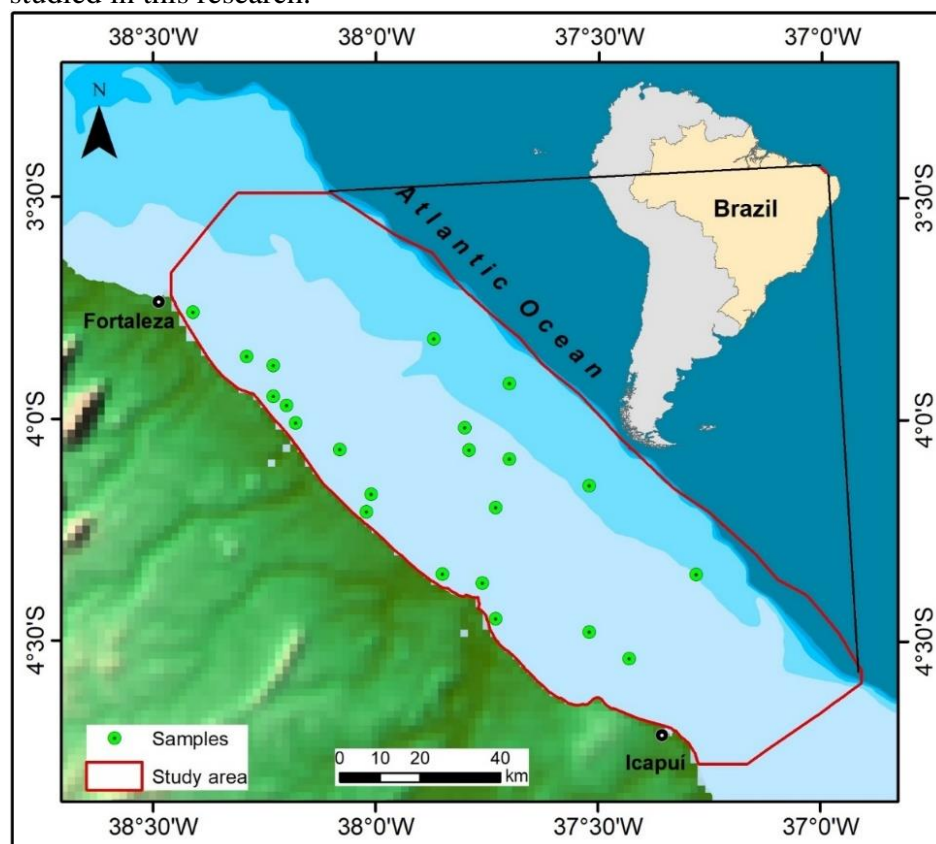
Despite their ecological potential, the distribution of recent benthic foraminifera on the eastern continental shelf of Ceará remains poorly documented. The main goal of this study is to show the pattern of distribution of benthic foraminifera based on qualitative and

quantitative analysis along the continental shelf of Ceará. This analysis may help for a better understanding of the species composition and diversity of benthonic foraminifera fauna in the study area.

5.1 Materials and Methods

A total of 22 sediment samples were collected during three projects Geocosta I, Geocosta III and Geomar XVIII from the year 1993 to 2003 (Figure 1) via Van Veen grab sampler and were archived at the Marine and Energy-applied Geology and Geophysics Laboratory of the Federal University of Ceará (UFC). Those samples were collected with varying depth from 5 to 51 m and were processed following the standard methodology for Quaternary calcareous microfossils (MURRAY,2006), which consists of washing in running water through a 0.062 mm mesh sieve and drying in an oven at 60°C.

Figure 1 - Map showing the study area, the eastern continental shelf of Ceará, in the Brazilian equatorial margin, with 22 sedimentological data studied in this research.



Source: Done by the author

Analysis was carried out on material retained on sieve $>63 \mu\text{m}$ using a binocular stereomicroscope. In samples with low abundances of foraminifera, all specimens were collected and in the other samples with greater abundance, was made quartered each sample and counted 300 specimens of foraminifera.

The micropaleontology analysis was carried out at the Applied Micropaleontology Laboratory of the Federal University of Pernambuco (LMA/LITPEG/UFPE), where the screening in fractions between $>63 \mu\text{m}$ and $<500 \mu\text{m}$ and identification of benthic foraminifera was carried out using a stereomicroscope. For the samples with few abundances, a screening was made in each of the granulometric fractions and in the other samples with greater abundance, 200 to 300 individuals of benthic foraminifera were divided and sorted.

The identification of benthic foraminifera follows the taxonomic classification of [41, 42, 43, 44] and the World Modern Foraminifera Database (www.marinespecies.org/foraminifera/). The ecological interpretation of benthic foraminifera was based on [6, 45, 43, 23]. The epifaunal and infaunal taxa classification of benthic foraminifera were based on bibliography and references of [33, 22, 23, 46, 47, 48, 49, 50]. Digital images of major species were photographed using a Zeiss Stereo Discovery V16.

After the preparation samples, foraminiferal counting and identification, statistical treatment of those data consisted of the following steps:

Calculus of Relative Abundance (RA) is the ratio between the number of individuals of a species (N) and the number of individuals of all species in the same sample (T) (1).

$$RA = (N \times 100) / T \quad (1)$$

Where N: number of individuals of a species; T: number of individuals of all species in the same sample. The RA result is in percentage and species that exceeded 5% were considered main species and those $\geq 10\%$ were abundant [51].

Dominance index (D), richness (S), Shannon ecological indices (H'), and equitability or evenness indices (E) ecological parameters were calculated using Past software on samples with more than 60 specimens.

The Shannon-Wiener diversity index is based on communication theory. The uncertainty is measured by the Shannon Function “H” noted as the define function (2):

$$H' = - \sum_{i=1}^p P_i (\ln P_i) \quad (2)$$

where H' is the diversity index, P_i represents the relative abundance of each species, Σ represents the sum of the calculations for each species, and $\ln P_i$ is the natural logarithm of

this proportion [52, 53, 54]. According [55, 56], the diversity index value depends of 3 categories which are:

$H' \leq 1$ mean low diversity

$1 \leq H' \leq 3$ mean moderate diversity

$H' \geq 3$ mean high diversity

The evenness index (E) is the distribution of species abundances within a community [57]. Denoted as E, this index is calculated as (3):

$$E = H / \ln(S) \quad (3)$$

where: H: The Shannon Diversity Index; S: The total number of unique species. The evenness index value ranges from 0-1 where 1 indicates complete evenness; furthermore, evenness index based on [58,56] is categorized as follows:

$E < 0.4$ signify low evenness of population

$0.4 < E \leq 0.6$ signify moderate evenness of population

$E > 0.6$ signify high evenness of population

Dominance index (D) is the opposite of evenness [59]; an uniformity index and small diversity indicates a high dominance of a species against other species. An uniformity index and small diversity indicates a high dominance of a species against other species. The dominance index is calculated by the formula (4) [55]:

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \right)^2 \quad (4)$$

Where n_i : total of species; N: total foraminifera at one sample. Index values range from 0-1 by the following categories:

$0 < D < 0.5$ Low of dominance

$0.5 < D \leq 0.75$ Moderate of dominance

$0.75 < D \leq 1$ High of dominance

Species richness is the number of different species represented in an ecological community, landscape or region [60]. Species richness is simply a count of species and it does not consider the abundances of them or their relative abundance distributions.

5.2 Results

5.2.1 Foraminifera diversity and ecology

Fifty-eight species of foraminifera were identified; belonging to 20 genus distributed among 4830 specimens. Regarding the ecological preferences, in terms of microhabitat, the epifaunal habitat has the most represented covering up to 70% of the genus of the study area. The infaunal microhabitat was represented by six genus which represent 30% of the genera of the study area (Table 1).

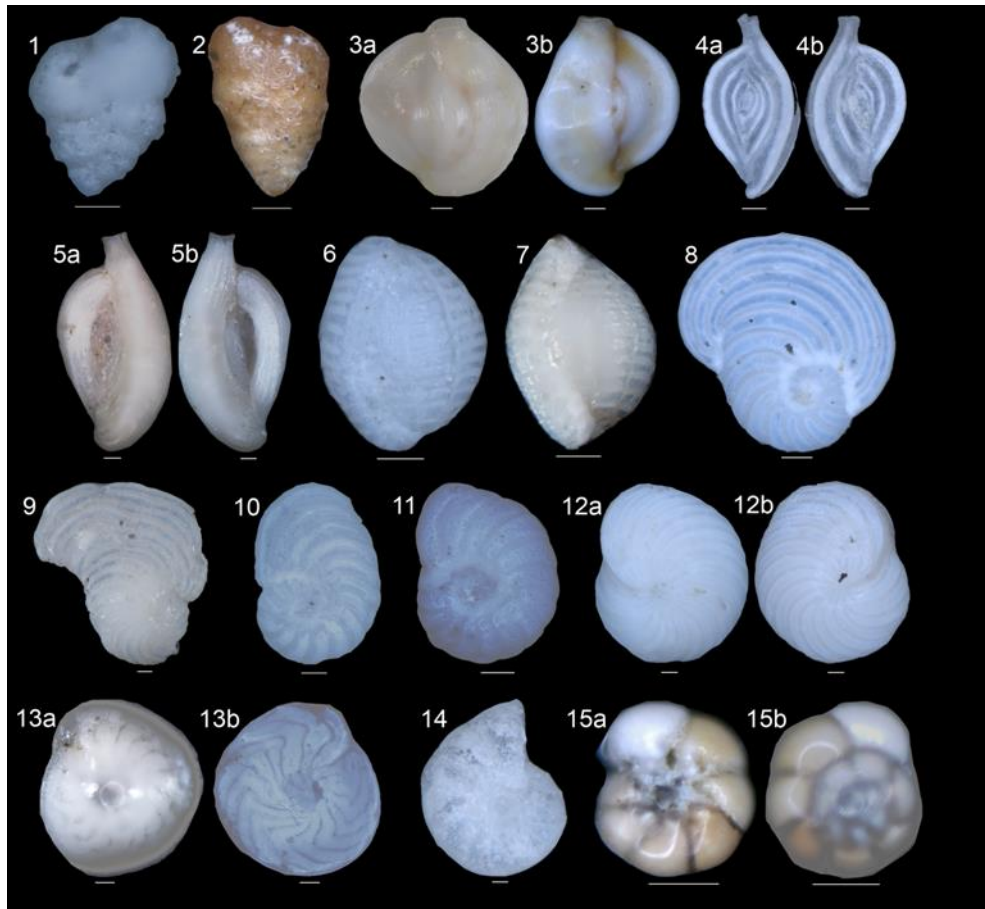
Table 1 - List of epifaunal and infaunal taxa reported along the continental shelf of Ceará. The epifaunal and infaunal taxa classification of benthic foraminifera is followed by [33, 22, 32, 23, 46, 49, 50]

Epifaunal genera	Infaunal genera
<i>Heterolepa; Borelis; Amphistegina; Archaias; Laevipeneroplis, Miliolites; Triloculina; Quinqueloculina; Peneroplis; Spiroloculina; Elphidium; Textularia; Pyrgo; Sahulia</i>	<i>Ammonia; Bolivina; Nonionella; Nonionoides; Nodosaria; Massilina</i>

Source: Done by the author

The microscopic analysis in all the 22 samples allowed the identification of a rich assemblage of foraminifera, of which the most important taxa were imaged and presented in Figure 2 with a white and brown color of tests. In terms of this coloration, the samples 568, 517, 509, 589, 451, 430, 420, 10, 14, 439, 603 and 475 appeared with the brown coloration and are located near the coast.

Figure 2. Photomicrographs of the most important foraminifera species identified on all the samples along the Ceará shelf are: 1. *Sahulia conica*, 2. *Textularia agglutinans*, 3(a, b). *Quinqueloculina bicostata*; 4(a, b). *Spiroloculina communis*, 5(a, b). *Spiroloculina excavata*; 6. *Borelis melo*, 7. *Borelis pulchra*, 8. *Archaias angulatus*, 9. *Laevipeneroplis proteus*, 10. *Peneroplis proteus*, 11. *Peneroplis bradyi*, 12(a, b). *Peneroplis carinatus*; 13(a, b). *Amphistegina gibbosa*; 14. *Elphidium discoidale*, 15(a, b). *Ammonia beccarii*.



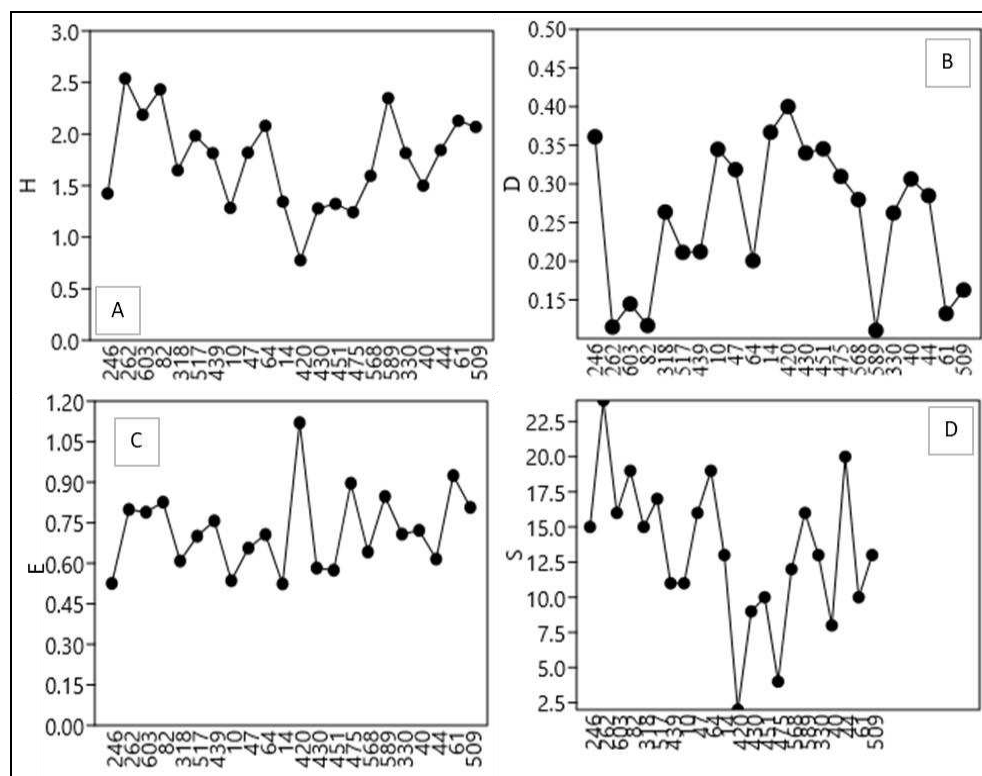
Source: Done by the author

5.2.2 Benthic foraminifera assemblages

In relation to the abundance of specimens, 1046 individuals of *Quinqueloculina bicarinata* were found in all the part of the continental shelf (Annex 1) classified as the most abundant of all the species. Of the total number of identified taxa, only 12 species classified in nine genus were considered consistently present with a relative abundance $\geq 10\%$ in a specific sample of the study area. Those species are: *Ammonia beccarii* (14.58%) identified in sample 5171, *Amphistegina gibbosa* (54.92%) identified in sample 246, *Archaias angulatus* (39.07%) identified in sample 318, *Peneroplis carinatus* (49.84%) at the sample 44, *Peneroplis* spp. (16.36%) located in sample 40, *Quinqueloculina bicarinata* (51.66%) identified in sample 14, *Quinqueloculina bicostata* (46.34) at sample 10, *Quinqueloculina* spp. (31.70%) observed at sample 568, *Sahulia conica* (16.81%) was observed at sample 82, *Textularia agglutinans* (30.66%) located at sample 14, *Triloculina* spp. (13.33%) located at sample and *Massilina pernambucensis* (10.55%) are located at sample 589.

The diversity index in all the samples has a value ranging between 0.77 - 2.5. Maximum index diversity value ($H' = 2.5$) was only found in sample 262 and the low Shannon index was found at sample 420 (Figure 3A). Most of the samples have a diversity index value between $1 \leq H' \leq 3$ which means a moderate diversity. The dominance index has a range of values between 0.11- 0.4 (Figure 3B) which belong to the low category. The evenness (E) index in all the sediment samples varied between 0.524 – 1.12 with the low diversity identified in sample 14 and the highest value at sample 420 (Figure 3C). Species richness was variable along the shelf with the highest species richness value (24) found at the sample 262 and the lowest value (2) in sample 420 (Figure 3D).

Figure 3 - Foraminifera diversity index distribution: Shannon diversity indices (H'), dominance index (D), evenness (E) and richness (S) along the continental eastern shelf of Ceará.

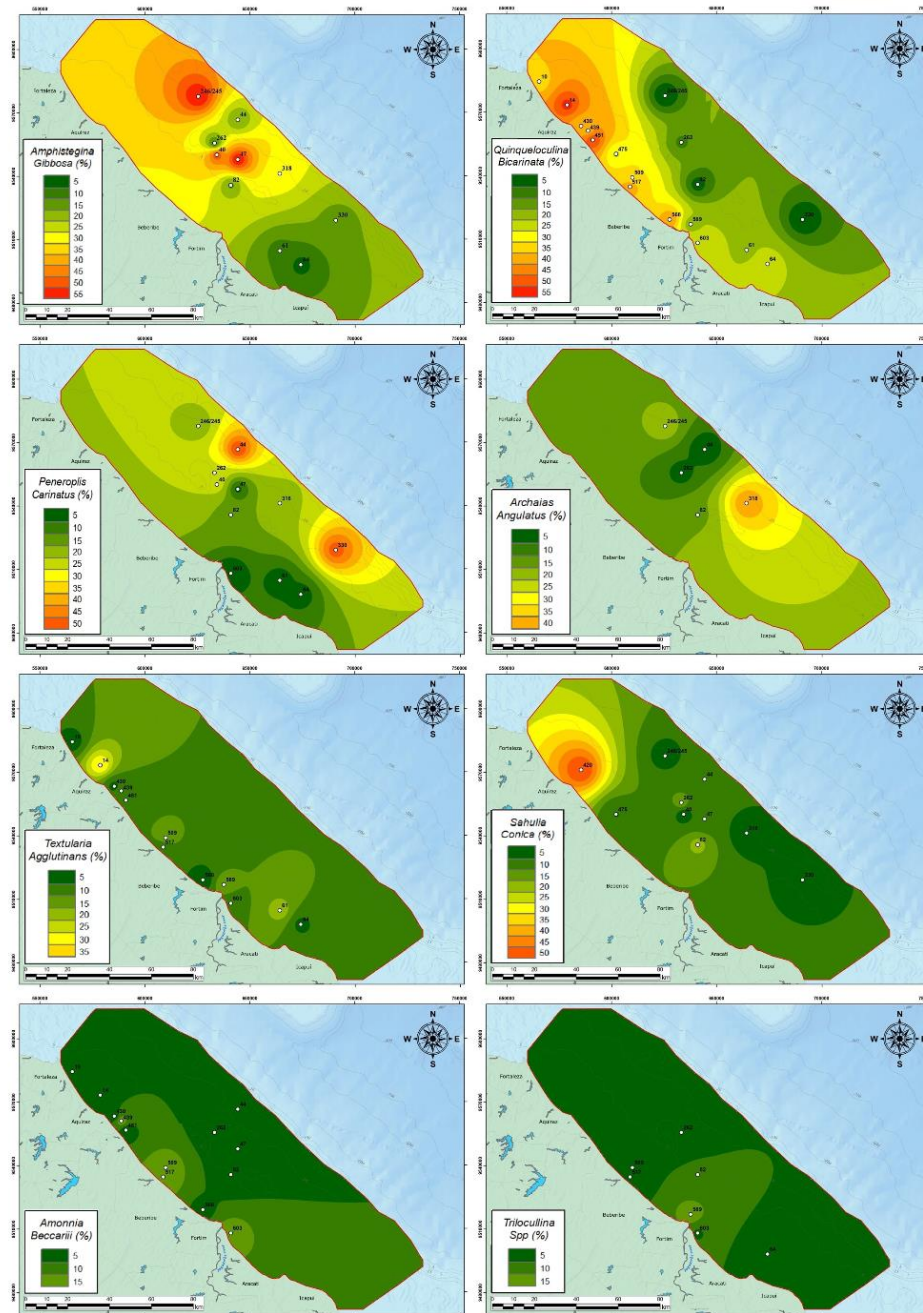


Source: Done by the author

For the paleoenvironmental analyses, one species from each genus was used (Figure 4) and the species *Amphistegina gibbosa* is the most abundant with a percentage of 54.92%, being present 10 samples of the study area (Figure 4A). The second most abundant is the specie *Quinqueloculina bicarinata* with a percentage of 51.66% (Figure 4B), it is found in almost all the samples of the study except the sample 318, 47, 420, 40, 44 which are located in the outer shelf except the sample 420. *Peneroplis carinatus* species with a value of 49.84%

is identified in low to abundant and is present in 11 samples and is more abundant in the outer shelf in sample 44 and 330 (Figure 4C). *Archaias angulatus* (39.07%) is poorly distributed (only in 5 samples) with a high percentage on the sample 318 (Figure 4D) located at the outer continental shelf. *Textularia agglutinans* species (30.66%) is moderately distributed along the inner continental shelf (Figure 4E). *Sahulia conica* species (16.81%) is identified in 10 samples with a high percentage located at the sample 420 near to the municipality of Fortaleza (Figure 4F). *Ammonia beccarii* species has an average abundance of 14.58% and is distributed mostly in the inner continental shelf of the study area with a greater representation on the sample 517 (Figure 4G). *Triloculina* spp. is found in only 7 from low to abundant, with an average abundance of 13.33% distributed only in the inner continental shelf (Figure 4H).

Figure 4 - Relative abundance of the main species to be identified in the study area: A. *Amphistegina gibbosa*, B. *Quiqueloculina bicarinata*, C. *Peneroplis carinatus*, D. *Archaias angulatus*, E. *Textularia agglutinans*, F. *Sahulia conica*, G. *Ammonia tepida*, H. *Triloculina* spp.



Source: Done by the author

5.3 Discussion

The trophic oxygen model (TROX), proposed by [8], predicts that the depth of foraminiferal microhabitats results from a combination of oxygen penetration and food availability in the sediment. Benthic environment is typically characterised by high organic carbon contents (high primary productivity), high sediment accumulation rates, fine grain size, low bioturbation and generally homogeneous habitats [61,62]. In well oxygenated sediments, the influx of organic matter is considered the main factor responsible for the bathymetric

distribution of benthic foraminiferal assemblages [8,63,10]. Epifaunal species of the study area represent 70% of the genera and those species are: *Amphistegina gibbosa*, *Archaias angulatus*, *Archaias* sp., *Archaias* spp., *Borelis melo*, *Borelis pulchra*, *Borelis* sp., *Elphidium crispum*, *Elphidium discoideale*, *Elphidium* sp., *Elphidium* spp., *Heterolepa dutemplei*, *Laevipeneroplis proteus*, *Pyrgo murrhina*, *Pyrgo quadrata*, *Pygo* sp., *Pyrgo* spp., *Quinqueloculina bicarinata*, *Quinqueloculina bicostata*, *Quinqueloculina microcostata*, *Quinqueloculina moynensis*, *Quinqueloculina pseudobuchiana*, *Quinqueloculina seminulum*, *Quinqueloculina stalker*, *Quinqueloculina* spp., *Sahulica conica*, *Spiroloculina depressa*, *Spiroloculina communis*, *Spiroloculina antillarum*, *Spiroloculina excavata*, *Spiroloculina aequa*, *Spiroloculina* sp., *Spiroloculina* spp., *Textularia agglutinans*, *Textularia candeiana*, *Textularia gramen*, *Triloculina sommeri*, *Triloculina* sp., *Triloculina* spp.

The species *Amphistegina gibbosa*, *Archaias angulatus*, *Borelis melo*, *Laevipeneroplis proteus*, *Peneroplis carinatus* classified as epifaunal, are symbionts (carry algae), typical of shallow environments up to 50 m, and are likely bioindicators of proximity of clean waters in reef environments [64, 65]. The dominance of epifaunal taxa is commonly related to the sediment surface of an oligotrophic and well oxygenated environment. The study area can be classified as an oligotrophic region which means a well oxygenated, poor nutrient availability environment and the distribution of benthic foraminifera are mainly restricted to the sediment surface [66]. Differences in the distribution of epifaunal and infaunal species could be explained in terms of preferences for the among and or the type of organic flux. Taxa living in infaunal microhabitat is common in mesotrophic to eutrophic environments where they feed on degraded organic matter, while epifaunal taxa are suspected to be phytodetritus feeders [67].

In general, ocean conditions affect the preservation of the benthic foraminifera and in this study area, the tests of the foraminifera along the continental shelf appear with low damage of the test which suggest a transport by suspension in a low energy environment [68]. However, some species were identified with damage tests which can be due to the environment influences or due the conditions of local water that affect organisms on the seabed including foraminifera as a constituent of the sediment particles. The sediment samples analysed here are typically bioclastic and according to [69], the carbonate grains colours may reflect the depositional history of sediment thus the predominance of white shell colour allow to infer that those sediments are young and were not buried at great depths. While the presence of foraminifera with black, yellow and mottled carapaces may be related to the infiltration of organic matter [70] or the deposition of iron and manganese in the

environment [71, 70, 72]. Samples 568, 517, 509, 589, 451, 430420, 10, 14, 439, 603, and 475 appear to be close to the shoreline. This suggests a possible reworking of sediments, which may explain the observed coloration. The other samples, farther from the coastline, have white tests, indicating a possible rapid burial. Samples which present a coloured observation appear to be close to the shoreline may suggest a possible reworking of sediments. Despite the predominance of well-preserved white tests, the presence of coloured tests that suffered breakage and abrasion suggests that the transport of the tests, in addition to occurring by suspension, can also occur by saltation or dragging, respectively [73] and a condition of moderate sedimentation and hydrodynamics. Those samples present a moderate to strong energy according to the ecological indices on current. Environments close to the coastline generally have stronger energy due to the action of waves and sea currents. In relation to the organic matter samples located near to the shoreline, organic matter may be more abundant due to the deposition of marine debris and coastal vegetation. The other samples, farther from the coastline, have white tests, indicating a possible rapid burial and this type of environment tends to have moderate to low energy depending on the depth and protection against strong currents. In the distance of the coastline, organic matter may be less abundant but better preserved due to rapid burial [20, 64, 65].

The continental shelf depths of the study area are shallow water between 8 and 51 m. Two types of environments were observed where the first environment is characterized as the environment near to the shoreline. In this zone, the most abundant of benthic foraminifera species was *Quinqueloculina bicarinata* with 1046 individuals distributed in the inner part of the continental shelf with a great representation six samples (10, 14, 64, 430, 439, 451). The genus *Quinqueloculina* is widely distributed in marine environments indicative of high hydrodynamic marine environments due to the resistance of its porcelaneous test and preferring to live at a shallow environment with moderate to high currents levels [74]. This genus is inhabitant in shallow waters and is highly mobile in fine grained sediments in both shallow [75] and deep waters [76]. A high abundance of *Quinqueloculina* may indicate ecological stress waters which is indicated by a high organic content matter [77] and the low level of brightness [78]. The second zone locate at the central region of the study area, represented by 10 samples as 40, 44, 47, 61, 82, 246, 262, 318, 330. This zone was identified as a favourable environment for reef growth, due to the predominance of the symbiont bearing species of genus *Amphistegina*. This genus indicates information related to waters with good conditions for coral reef as demonstrated in [40], on the outer continental shelf of the area. It means that, the presence of the genus *Amphistegina* proliferate in reef environment which

provide a favourable environment for its survival in that local. In the study area, the genus *Amphistegina* occurred mostly at depths of 25–51 m, which agrees with [79] who shows that *Amphistegina gibbosa* was always dominant at depths of 10–30 m at Florida reef. *Peneroplis* genus has an average abundance of 12.02% and is found in 11 samples with a low to very abundant, mostly found in common quantities of 11.5–49.84%. The species most abundant of this genus is *Peneroplis carinatus* (49.84%) identified at the sample 44 located at the outer continental shelf of the study area. The taxas *Ammonia beccarii*, *Amphistegina gibbosa*, *Archaias angulatus*, *Peneroplis carinatus*, *Quinqueloculina bicarinate*, *Sahulua conica*, *Textularia agglutinans*, *Triloculina* spp. are common. These species are distributed across the whole continental shelf, and are typical of the foraminiferal assemblages of the tropical Brazilian continental shelf [4, 5, 80, 81].

Ecological parameters, such as species diversity, are considered indicators of environmental stress in benthic foraminifera assemblages in marine environments worldwide [82]. The low expression of species diversity and the increased dominance of tolerant or opportunistic species are typically associated with pollute environments [83, 84, 82, 85]. In the study area, these species are represented by the genus *Ammonia* and *Elphidium* identified in majority at the inner continental shelf in all the samples. According to [86], several species of *Elphidium* characterize shallow water with relatively high current energy and this genus has high adaptability and can survive in depressed environmental conditions. *Ammonia* genus is known as a cosmopolitan species that can survive in a wide range of environmental fluctuation, contaminated area, or extreme environments and has a high life tolerance range in obtaining food or nutrition sources [87, 45, 88, 89, 90]. [91] relates opportunistic species to environments dominated by physical stress, associated, for example, with young habitats, with high environmental instability. The diversity index in all the bioclastic sediments has a value ranging between 0.77 - 2.54 with average 1.79 while Evenness index ranged from 0.27 – 1.08 (average 0.51) both signified moderate category which means that the presence of foraminifera in this local are evenly distributed. Furthermore, Dominance index ranged from 0.11- 0.4 (average 0.25) which belong to the low category suggesting that, there are no particular type of foraminifera species that is dominant [92]. The three indices suggest that the condition of water in the continental shelf of Ceara is still favourable for foraminiferal habitat. The low value of dominance index in contrast high value of evenness indicates that all types of shallow benthic foraminifera are able to live and develop with relatively equal abundances, no typical species is extremely dominant. Normally, the value of dominance index is inversely proportional to the evenness index. When the value of dominance index is high, the value of

evenness index is low, suggests that the abundance of foraminifera is unevenly distributed. In this condition an opportunist taxon will be exclusively dominant due to unfavourable environmental conditions for other genera, and vice versa.

The benthic species recorded are typical of the Brazilian Equatorial Margins especially in the tropical zone, near the equator, and in subtropical regions, and have many affinities with species originating from the Caribbean Sea in Central America [5, 93, 94,]. Based on the species recorded and their adaptations, the foraminiferal assemblages analysed from the carbonate shelf of Brazil is typical of tropical marine environments with warm, clear, and shallow waters, and moderate to high hydrodynamic energy [6, 95, 96]. This means that the distribution of benthic foraminifera depends on the water depth which is in conformity with [97] who have reported that in most studies, the water depth is an important factor in controlling the distribution of benthic foraminifera. This study also showed strong relationships between water depth and distribution patterns of benthic foraminifera. It is also clear that depositional energy plays an important role in transportation and deposition of sediments and foraminifera.

5.4 Conclusions

Benthic foraminifera found along the continental shelf of Ceará consist of 4,830 specimens represented by 59 species belonging to 20 genera. Epifaunal taxa had a marked presence in 14 genera comprising as much as 70% of the total population despite well oxygen conditions. Epifaunal species are: *Ammonia beccarii*, *Amphistegina gibbosa*, *Archaias angulatus*, *Peneroplis carinatus*, *Peneroplis* spp., *Quinqueloculina bicarinata*, *Quinqueloculina bicostata*, *Quinqueloculina* spp., *Sahulina conica*, *Textularia agglutinans*, *Triloculina* spp. and *Massilina pernambucensis*. Infaunal microhabitat is represented by 6 genera which represent 30% of the population which present an elongate morphologic of the shell. In general, benthic foraminifera identified along the study area characterises an environment of shallow water. The dominance of epifaunal taxa has permitted to classify the Ceará continental shelf as an oligotrophic and well oxygenated environment.

The study area was classified in two environments: the first one classified as a zone near the shoreline characterised as an environment which present coloured species located at the zone of high energy which suggests a possible reworking of sediments. The second zone, located at the central region of the study area, was identified as a favourable environment for reef growth, due to the predominance of the genus *Amphistegina*. This genus

indicates information related to waters with good conditions for the development of coral reefs in the study area. The predominance of foraminiferal symbiont carriers (e.g. *Peneroplis carinatus* and *Amphistegina gibbosa*) commonly found in reef environments, can be attributed to the presence of carbonate features that compose the reefs.

The data presented in this study allow us to infer that moderate to strong water current conditions can affect the distribution and abundance of foraminifera. This can be indicated by the diversity index value which ranged from 0.77 - 2.54 and belonged to the moderate category. Shannon-Wiener, Evenness and Dominance diversity indices, suggest that the condition of water in the continental shelf of Ceara is still favourable for foraminiferal habitat. The low value of dominance index in contrast to the high value of evenness indicates that shallow benthic foraminifera are able to live and no typical species is extremely dominant.

Acknowledgments:

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001 provided by the Geology Graduate Program (PPGG) of the Federal University Ceará (UFC). The authors thank the Marine and Energy-applied Geology and Geophysics Laboratory (LGMA) of UFC and the Micropaleontology Applied Laboratory (LMA) of Geology Department of Pernambuco (UFPE) for the great support with equipment, helpful insights for the progress of this work which is a part of PhD thesis of the principal author.

References

1. Leão, Z. M. A. N.; Dominguez, J. M. L. Tropical Coast of Brazil. *Marine Pollution Bulletin* **2000**, Vol. 41, Nos. 1-6, pp. 112-122. [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00105-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00105-3)
2. Domingues, E.D.C., Schettini, C.A.F., Truccolo, E.C., Oliveira Filho, J.C. Hydrography and Currents on the Pernambuco Continental Shelf. *Scientific/ Technical Article*. **2017**, Vol. 22., pp. 1–17. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170027>
3. Manso, V.A.V., Coutinho, P.N., Pedrosa, F.J., Macedo, R.J., Silva, A.C., Gois, L.A., Barcellos, R.L., Arruda, S.D.A., Soares, Jr. C. F. A., Madruga Filho, J.D., Arraia, M.S.M. C., Madruga, M.M.D. Pernambuco: In: Muehe, D., Org., Panorama da erosão costeira no Brasil, Pernambuco. *Biblioteca do Ministério do Meio Ambiente* **2018**, pp. 345–380.

4. Bérghamo, D.B., Oliveira, D.H., Rosa Filho, J.S., responses of foraminiferal assemblages to hydrodynamics and sedimentary processes on tropical coastal beachrocks. *J. S. Am. Earth Sci.* **2022**, Volume 120, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104051>
5. Bérghamo, D.B., Lacerda, J.N.L., Araripe, R.V.C., Júnior, A.V.F., Oliveira, D.H. Benthic foraminifera as depth estimators in the tropical carbonate shelf of northeastern Brazil. *Continental Shelf Research* **2024**, Volume 276. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2024.105246>
6. Murray, J.W. Deep Sea. In: Ecology and Applications of Benthic Foraminifera. *Cambridge University Press, Cambridge* **2006**, pp. 180–237.
7. Gooday, A. J., Jorissen, F. J. Benthic foraminiferal biogeography: Controls on global distribution patterns in deep-water settings. *Annu. Rev. Mar. Sci.* **2012**, Vol 4 (1), pp. 237–2625. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142737>.
8. Jorissen, F. J., de Stigter, H. C., Widmark, J. G. V. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Mar. Micropaleontol* **1995**, Vol 26 (1), pp. 3–155. [https://10.1016/0377-8398\(95\)00047-X](https://10.1016/0377-8398(95)00047-X)
9. Altenbach, A.V., Pflaumann, U., Schiebel, R., Thies, A., Timm, S., Trauth, M. Scaling percentages and distributional patterns of benthic foraminifera with flux rates of organic carbon. *J. Foraminifer. Res.* **1999**, Vol. 29, pp.173–185.
10. De Rijk, S., Jorissen, F.J., Rohlinga, E.J., Troelstra, S.R. Organic flux control on bathymetric zonation of Mediterranean benthic foraminifera. *Mar. Micropaleontol.* **2000**, Vol. 40, pp.151–166. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(00\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(00)00037-2).
11. Gooday, A.J. Biological responses to seasonally varying fluxes of organic matter to the ocean floor: a review. *J. Oceanogr.* **2002**, Vol. 58, pp. 305–332. <https://doi.org/10.1023/A:1015865826379>.
12. Kaiho, K. Benthic foraminiferal dissolved-oxygen index and dissolved oxygen levels in the modern ocean. *Geology* **1994**, Vol. 22, pp. 719–722. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)0222.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)0222.3.CO;2) .
13. Bernhard, J.M., Sen Gupta, B.K. Foraminifera of oxygen depleted environments. In: Sen Gupta, B.K. (Ed.), Modern Foraminifera. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht*, 1999; pp. 201–216.
14. Kaminski, M.A. Calibration of the benthic Foraminiferal oxygen index in the Marmara Sea. *Geol. Q.* **2012**, Vol. 56, pp. 757–764.
15. Lohmann, G.P. Abyssal benthonic foraminifera as hydrographic indicators in the western South Atlantic Ocean. *J. Foraminifer. Res.* **1978**, Vol. 8, pp.6–34.
16. Mackensen, A., Schmiedl, G., Harloff, J., Giese, M. deep-sea foraminifera in the south Atlantic Ocean: ecology and assemblage generation. *Micropaleontology* **1995**, Vol. 41, pp. 342–358. <https://doi.org/10.2307/1485808>.

17. Schmiedl, G., Mackensen, A., Müller, P.J. Recent benthic foraminifera from the eastern South Atlantic Ocean: dependence on food supply and water masses. *Mar. Micropaleontol.* **1997**, Vol.32, pp. 249–287. [https://doi.org/10.1016/S0377-8398\(97\)00023-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8398(97)00023-6).
18. Sen Gupta, B.K. Introduction to modern foraminifera. In: Sen Gupta, B.K. (Ed.), *Modern Foraminifera*. Kluwer Academic Publishers 1999, Dordrecht, pp. 3–6.
19. Sen Gupta, Barun, K. *Modern Foraminifera*. Springer **2002**, p. 16. ISBN 978-1-4020-0598-5.
20. Beck Eichler, P. P., Barker, C. P. Benthic Foraminiferal Ecology. Springer **2020**, P1-27. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61463-8_1.
21. Brasier, M. D. *Microfossils*: Unwin Hyman, London, 1980, 193 p.
22. Corliss, B.H. Microhabitats of benthic foraminifera within deep-sea sediments. *Nature* **1985**, Vol. 314, pp. 435–438. <https://doi.org/10.1038/314435a0>.
23. Murray, J.W. Ecology and Palaeocology of benthic foraminifera. *Longman Scientific & Technical* **1991**, 397p.
24. Jorissen, F. J., de Stigter, H. C., Widmark, J. G. V. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. *Mar. Micropaleontol* **1995**, Vol. 26 (1), pp. 3–155. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(95\)00047-X](https://doi.org/10.1016/0377-8398(95)00047-X).
25. Thomas, E., Booth, L., Maslin, M., and Shackleton, N. J. Northeastern Atlantic benthic foraminifera during the last 45,000 years: Changes in productivity seen from the bottom up. *Paleoceanography* **1995**, Vol. 10 (3), pp. 545–5625. <https://doi.org/10.1029/94PA03056>
26. Rasmussen, T. L., and Thomsen, E. Ecology of deep-sea benthic foraminifera in the north Atlantic during the last glaciation: Food or temperature control. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* **2017**, Vol. 472, pp. 15–32. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.02.012>
27. Melaniuk, K., Szytybor, K., Treude, T., Sommer, S., Zajączkowski, M., Rasmussen, T.L. Response of benthic foraminifera to environmental successions of cold seeps from Vestnesa Ridge, Svalbard: Implications for interpretations of paleo-seepage environments. *Front. Mar. Sci.* **2022**, Vol. 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.999902>
28. Buzas, S. P., Pessagno, E. A., Jr., and Bowen, C. J. Foraminiferal response to habitat disruption: Arroyo Colorado, Texas. *Journal of Foraminiferal Research* **2003**, Vol. 33, pp. 294–308.
29. Nagendra, R., Sathiyamoorthy, P., Reddy, A. N., and Ramachandran, A. Spatial distribution of benthic foraminifera in the Palar Estuary, Tamil Nadu, India. *Journal of the Geological Society of India* **2015**, Vol. 86, pp. 305–316.
30. Pati, P., and Patra, P. Benthic foraminiferal response to coastal pollution: A review: International Journal of Geology. *Earth and Environmental Sciences* **2012**, Vol. 2, pp. 42–56.

31. Sreenivasulu, G., Jayaraju, N., Sundara Raja Reddy, B. C., Lakshmi Prasad, T., Nagalakshmi, K., Lakshmanna, B. Organic matter from benthic foraminifera (*Ammonia beccarii*) shells by FTIR spectroscopy: a study on Tupilipalem, Southeast coast of India: *MethodsX* **2017**, Vol. 4, pp. 55–62.
32. Corliss, B.H., Chen, C. Morphotype patterns of Norwegian Sea deep-sea benthic foraminifera and ecological implications. *Geology* **1988**, Vol. 16(8), pp. 716-719. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1988\)016%3C0716:MPONSD%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1988)016%3C0716:MPONSD%3E2.3.CO;2).
33. Corliss, B.H. Morphology and microhabitat preferences of benthic foraminifera from the northwest Atlantic Ocean. *Marine Micropaleontology* **1991**, Vol. 17(3-4), pp. 195-236. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(91\)90014-W](https://doi.org/10.1016/0377-8398(91)90014-W)
34. Coull, B.C., Ellison, R.L., Fleege, J.W. Quantitative estimates of the meiofauna from the deep sea off North Carolina, USA. *Marine Biology* **1977**, Vol. 39, pp. 233–240.
35. Sen. Gupta, B.K., Aharon, P. Benthic foraminifera of bathyal hydrocarbon vents of the Gulf of Mexico: Initial report on communities and stable isotopes. *Geo-Marine Letters* **1994**, Vol. 14, pp. 88–96.
36. Rathburn, A.E., Levin, L.A., Held, Z. & Lohmann, K.C. Benthic foraminifera associated with cold methane seeps on the northern California margin: Ecology and stable isotopic composition. *Marine Micropaleontology* **2000**, Vol. 38, pp. 247–266.
37. Bernhard, J.M., Buck, K.R., Barry, J.P. Monterey Bay cold-seep biota: Assemblages, abundances, and ultrastructure of living foraminifera. *Deep-Sea Research I* **2001**, Vol. 48, pp. 2233–2249.
38. Robinson, C.A., Bernhard, J.M., Levin, L.A., Mendoza, G.F., Blanks, J.K. Surficial Hydrocarbon Seep Infauna from the Blake Ridge (Atlantic Ocean, 2150 m) and the Gulf of Mexico (690–2240 m). *Marine Ecology* **2004**, Vol. 25, pp.313–336.
39. Akimoto, K., Hattori, M., Uematsu, K. & Kato, C. The deepest living foraminifera, Challenger Deep, Mariana Trench. *Marine Micropaleontology* **2001**, Vol. 42, pp.95–97.
40. Nemzoue, P.N.N., Maia de Almeida, N., Freire, G.S.S., Tchouankoue, J.P., Noucoucouk, A.A., Medeiros, L.R. Benthonic assembly and its correlation with the geodiversity of the east continental shelf of Ceará (Brazilian equatorial margin). *Quaternary and Environmental Geosciences* **2024**, Vol. 15, pp. 49-61. <http://dx.doi.org/10.5380/qeg.v15i0.93438>
41. Loeblich, A., Tappan, H. *Foraminiferal Genera and Their Classification: Van Nostrand Reinhold*. Springer, New York, 1988, 970 p.
42. Loeblich, A.R.Jr., Tappan, H. Present status of foraminiferal classification, in Studies in Benthic Foraminifera. In: Y. Takayanagi & T. Saito. Eds. Proceedings of the Fourth International Symposium on Benthic Foraminifera, Sendai, 1990 (Benthos 90) Tokai University Press, Tokyo, Japan, 1992.

43. Van Morkhoven, F.M., Berggren, W.A., Edwards, A.S. Cenozoic cosmopolitan deep - water benthic foraminifera. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration* **1986**, Vol. 11, pp. 1-421.
44. Boltovskoy, E., Giussani, G., Watanabe, S., and Wright, R. *Atlas of Benthic Shelf Foraminifera of the Southwest Atlantic: Dr. W. Junk bv Publishers*, The Hague-Boston-London, **1980**, 131 p.
45. Boltovskoy, E., Wright, R.C. Recent Foraminifera. *Springer* **1976**, 520 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-2860-7> .
46. Gooday, A.J. Epifaunal and shallow infaunal foraminiferal communities at three abyssal NE Atlantic sites subject to differing phytodetritus input regimes. *Deep-sea Res.* **1996**, Vol. 1 43(9), pp. 1395-1421.
47. Fontanier, C., Jorissen, F.J., Chaillou, G., David, C., Anschutz, P., Lafon, V. Seasonal and interannual variability of benthic foraminiferal faunas at 550 m depth in the Bay of Biscay. *Deep-Sea Research I* **2003**, Vol. 50(4), pp. 457-494. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(02\)00167-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(02)00167-X).
48. Schweizer, M. Evolution and molecular phylogeny of Cibicides and Uvigerina (Rotaliida, Foraminifera). Doctoral dissertation, University of Utrecht, Utrecht, 2006.
49. Rodrigues, A.R., Pivel, M.A.G., Schmitt, P., de Almeida, F.K., Bonetti, C. Infaunal and eoifaunal benthic foraminifera species as proxies of organic matter paleofluxes in the Pelotas Basin, south-wersteren Atlantic Ocean. *Mar. Micropaleontol.* **2018**, Vol. 144, pp. 38-49.
50. Venturelli, R.A., Rathburn, A.E., Burkett, A.M., Ziebis, W. Epifaunal foraminifera in an infaunal world: insights into the influence of heterogeneity on the benthic ecology of oxygen-poor, deep-sea habitats. *Mar. Sci.* **2018**, Vol. 5, pp. 1-72.
51. Boltovskoy, E., and Totah, V. Diversity, similarity and dominance in benthic foraminiferal fauna along one transect of the Argentine shelf. *Revue de Micropaléontologie* **1985**, Vol. 28, pp. 23–31.
52. Shannon, C. E., Weaver, W. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana: University of Illinois Press., 1949.
53. SPellerberg, I. F., and Fedor, P. J. A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the ‘Shannon – Wiener’ Index. *Global Ecology and Biogeography* **2003**, Vol. 12, pp.177–179
54. Magurran, A. *Measuring Biological Diversity*. Oxford: Blackwell, 2004.
55. Odum, E.P. *Fundamental of Ecologi*, 3th Edition Toppan Compani, Ltd, 1971.
56. Ulfah, M.; Fajri, S.N.; Nasir, M.; Agustina, S.; Purnawan, S. Temporal of reef fish communities in the coastal water of Krueng Raya, Aceh Besar Regency, Indonesia. *Aceh Journal of Animal Science* **2019**, Vol. 5 (1), pp. 11-17.

57. Buzas, M., Gibson, G., T. Species Diversity: Benthonic Foraminifera in Western North Atlantic. *Science* (New York, NY) **1969**, 163 72–5.
58. Krebs, C.H.J. Ecological methodology. Univ. of British Columbia, Harper Collins Publisher ,1989 ,645p.
59. Hayek, L.C.; Buzas, M.A. On the proper and efficient use of diversity measures with individual field samples. *The journal of Foraminiferal Research* **2013**, Vol. 43(3), pp. 305-313.
60. Colwell, Robert K. Biodiversity: Concepts, Patterns and Measurement. In Simon A. Levin (ed.). *The Princeton Guide to Ecology*. Princeton: Princeton University Press., 2009, pp. 257–263.
61. Reichart, G. -J., Lourens, L., Zachariasse, W. Temporal variability in the northern arabian sea oxygen minimum zone (OMZ) during the last 225,000 years. *Paleoceanography* **1998**, Vol.13, pp.607–621. <https://doi.org/10.1029/98PA02203>
62. Levin, L.A. ecology of cold seep sediments: Interactions of fauna with flow, chemistry and microbes. In *Oceanography and marine biology: An annual review*, Eds. R.N. Gibson, R.J.A. Atkinson and J.D.M. Gordon (Boca Raton: CRC Press-Taylor & Francis Group), 2005, pp.1-46. <https://doi.org/10.1201/9781420037449.ch1>
63. Jorissen, F.J., Fontanier, C., Thomas, E. Paleoceanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics. In: Hillaire-Marcel, C., Vernal, A. (Eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography* (Pt. 2): Biological Tracers and Biomarkers. *Elsevier* **2007**, pp. 263–326. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01012-3](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01012-3)
64. Gomes, M.P., Vital, H., Eichler, P.P.B., et al. The investigation of a mixed carbonate-siliciclastic shelf, NE Brazil: side-scan sonar imagery, underwater photography, and surface-sediment data. *Ital J Geosci.* **2015**, Vol. 134(1), pp.9–22.
65. Eichler, P.P.B., Vital, H., Gomes, M.P. Marine sediments from mesophotic reefs as indicators of offshore vortex in the Açu reef (Northeast, Brazil). *J Aquac Mar Biol.* **2024**, Vol.13(1), pp. 1–6. <https://doi.org/10.15406/jamb.2024.13.00389>
66. K. de Almeidaa,F., M. de Mello, R., Rodriguesa, A.R., Bastos, A.C. Bathymetric and regional benthic foraminiferal distribution on the Espírito Santo Basin slope, Brazil (SW Atlantic). *Deep-Sea Research Part I* **2022**, Vol. 181. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2022.103688>
67. Schmiedl, G., Mitschele, A., Beck, S., Weldeab, S., Schulz, H., Hemleben, C., Sperling, M.R., Emeis, K.C. Benthic foraminiferal record of ecosystem variability in the eastern Mediterranean Sea during times of sapropel S5 and S6 formation. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* **2003**,190, pp.139-164. [https://doi.org/10.1016/S00311-0182\(02\)00603-X](https://doi.org/10.1016/S00311-0182(02)00603-X)

68. Alve, E., Murray, J.W. High benthic fertility and taphonomy of foraminifera: a case study of the Skagerrak, North Sea. *Marine Micropaleontology* **1997**, [S.l.] Vol. 31, pp. 157–175.
69. Duleba, W. Interpretações paleoambientais obtidas a partir das variações na coloração das carapaças de foraminíferos da Enseada do Flamengo, SP. *Boletim do Instituto Oceanográfico* **1994**, Vol. 42, pp. 63–72.
70. Carboni, M.G.; Mandarino, G., Matteucci, R. Foraminiferids of Todos os Santos Bay (Bahia Brazil). *Geologica Roma* **1982**, Vol. 20: pp. 133–124.
71. Ward, W.C.; Folk, R.L. Wilson, J.L. Blackening of eolianite and caliche adjacent to saline lakes, Isla Mujeres, Quintana Roo. Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* **1970**, [S.l.], Vol. 40(2), pp.548–555.
72. Leão, Z.M.A.N., Machado, A.J. Variação de cor dos grãos carbonáticos de sedimentos marinhos atuais. *Revista Brasileira de Geociências* **1989**, Vol. 19(1), pp. 87–91.
73. Moraes, S.S. Interpretações da hidrodinâmica e dos tipos de transporte a partir de análises sedimentológicas e do estudo dos foraminíferos recentes dos recifes costeiros da Praia do Forte e de Itacimirim, litoral norte do Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia. 2001, 64 p.
74. Woo, H.J., Culver, S.J., Oertel, G.F. Benthic foraminifera communities of a barrier-lagoon system, Virginia, USA. *Journal of Coastal Research* **1997**, Vol. 13(4), pp. 1192-1200. <http://www.jstor.org/stable/4298728>.
75. Severin, K.P., Culver, S.J., Blanpied, C. Burrows and trails produced by *Quinqueloculina impressa* Reuss, a benthic foraminifer, in fine-grained sediment. *Sedimentology* **1982**, Vol. 29(6), pp.897-901. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3091.1982.TB00093.X>
76. Gross, O. Influence of temperature, oxygen and food availability on the migrational activity of bathyal benthic foraminifera: evidence by microcosm experiments. In: Liebezeit G., Dittmann S., Kröncke I. (eds.), *Life at interfaces and under extreme conditions* Dordrecht: Springer, 2000, p. 123-137.
77. Barbosa, C.F., Prazeres, M.F., Ferreira, B.P., Seoane, J. C. S. Foraminiferal assemblage and reef check census in coral reef health monitoring of East Breasilian Margin. *Marine Micropaleontology* **2009**, Vol. 73, pp. 62-69.
78. Natsir, S.M. Kelimpahan foraminifera resen pada sedimen permukaan di Teluk Ambon. *Jurnal LIlmu dan Teknologi Kelautan Tropis* **2010**, Vol. 2(1), pp. 9-18.
79. Baker, R.D., Hallock, P., Moses, E.F., Williams, D.E., Ramirez, A: Larger foraminifera of the Florida reef tract, USA: distribution patterns on reef-rubble habitats. *J. Foram. Res.* **2009**, Vol. 39, pp.267-277.
80. Araripe, R.V.C., Oliveira, D.H., Assis, H.M.B., Barreto, A.M.F., Caracterização da fauna de foraminíferos bentônicos da plataforma continental de Itamaracá, PE – Brasil.

Estudos Geológicos **2016**, Vol. 26 (2), pp. 91-107. <https://doi.org/estudosgeologicos.18190/1980-8208>.

81. Alves, B.M., Nogueira Junior, M., Foraminiferal assemblage structure from Brazilian tropical urbanized beaches (~7°S). *Biological Sciences An. Acad. Bras. Ciênc.* **2020**, Vol. 92 (2), pp. 1-15. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190486>
82. Lei, Y.L., Li, T.G., Bi, H., Cui, W.L., Song, W.P., Li, J.Y., Li, C.C., Responses of benthic foraminifera to the 2011 oil spill in the Bohai Sea, PR China. *Mar. Pollut.* **2015**, Vol. 96, pp. 245–260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.020>
83. Yanko, V., Ahmad, Mahadir, Kaminski, M.A., Ahmad, Muna, Kaminski, M., Morphological deformities of benthic foraminiferal tests in response to pollution by heavy metals: Implications for pollution monitoring Meiobenthos of methane outlets of the Black Sea View project Barremian-Aptian foraminifera of Gorgo a Cerbara (OAE1a). *Artic. J. Foraminifer. Res.* **1998**, Vol. 28, pp. 177–200.
84. Burone, L., Venturini, N., Sprechmann, P., Valente, P., Muniz, P., Foraminiferal responses to polluted sediments in the Montevideo coastal zone, Uruguay. *Mar. Pollut. Bull.* **2006**, Vol. 52, pp. 61–73. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.08.007>.
85. El-Kahawy, R.M., Mabrouk, M.S. Benthic foraminifera as bioindicators for the heavy metals in the severely polluted Hurghada Bay, Red Sea coast, Egypt. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2023**, Vol. 1, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27242-4>.
86. Gustiantini, L., Usman, E., Distribusi foraminifera bentik sebagai indikator kondisi lingkungan di perairan sekitar Pulau Batam- Riau Kepulauan. *Jurnal Geologi kelautan*, **2008**, 6(1) : 43-52.
87. Alves, E. Benthic foraminiferal responses to estuarine pollution: A review. *Journal of Foraminiferal Research*, **1995**, 25(3) :190-203.
88. Sharifi, A.R., Croudace, I.W., Austion, R.L., Benthic foraminiferids as pollution indicators in Southampton Water, Southern England, U.K. *journal of Micropalaeontology*, **1991**, 10(1):109-113.
89. Yanko-Hombach, V., Kondariuk, T., Motnenko, I. Benthic foraminifera indicate environmental stress from river discharge to marine ecosystems: Example from the Black Sea. *The journal of Foraminifera Research*, **2017**, 47: 70-92/ 10/2113/gsjfr.47.1.70.
90. Jatiningrum, R.S., Mutika; A., Gustiantini, L., Gerhaneu, N.Y., Latuputty, G., Divina, A.R. Distribution of benthic foraminifera in the waters from Off Putri Island, Northern Batam, Riau Archipelago. *Bulletin of Marine Geology*; **2022**, Vol. 37, No. 2, pp. 81-95.
91. Levinton, J.S. The palaeoecological Significance of Opportunistic Species. *Lethaia*, **1970**, V.13, p. 69-78.
92. Culver, S.J., Buzas, M.A. Distribution of recent benthic foraminifera in the Gulf of Mexico Smithsonian Contrib. *Mar. Sci.* **1981**, Vol. 8 (1), 411p. <https://doi.org/10.5479/si.01960768.8>

93. Bawol, J.F., Kusen, J.D., Rimper, J.R.T.S.I. struktur komunitas foraminifera benthic berdasarkan habitat di perairan Sulawesi Utara. *Jurnal Pesisir dan Laut Tropis* **2017**, Vol. 2(1), pp.6-12.
94. Levy, A., Mathieu, R., Poignant, A., Rosset-Moulinier M., D. Ambroise Benthic foraminifera from the Fernando de Noronha Archipelago (Northern Brazil). *Mar. Micropaleontol.* **1995**, Vol. 26, pp. 89-97. [https://doi.org/10.1016/0377-8398\(95\)00027-5](https://doi.org/10.1016/0377-8398(95)00027-5)
95. Madeira-Falcetta, M., Contribuição ao estudo dos foraminíferos bentônicos da plataforma continental brasileira. *Pesqui. em Geociencias* **1977**, Vol. 8 (8), pp. 133-150.
96. Armstrong, H.A., Brasier, M.D. Microfossils (2 ed.), Blackwell Publishing, 2005, 306p. <https://doi.org/10.1002/9781118685440>.
97. Szarek, R., Kuhnt, W., Kawamura, H., Kitazato, H. distribution of recent benthic foraminifera on the Sunda Shelf (South China Sea). *Marine Micropaleontology* **2006**, 61 (4), pp. 171-195.

CONCLUSÕES

Esta pesquisa revela, pela primeira vez, as relações entre a distribuição da comunidade bentônica e a geodiversidade do ambiente marinho da plataforma continental leste do Estado do Ceará. Os principais constituintes da assembleia bentônica são: briozoários, algas calcárias, foraminíferos e moluscos. Esses organismos são responsáveis pela maioria da sedimentação carbonática da área de estudo, enquanto Cnidários, Artrópodes, equinodermos e poríferos são considerados constituintes acessórios. As algas calcárias são principalmente do tipo Rhodophyta (algas vermelhas) e Chlorophyta (algas verdes) e os moluscos são representados pelas classes Gastrópodes e Bivalvia.

Cinco zonas foram identificadas com base na literatura, batimetria e na morfologia do fundo marinho: a zona 1 caracteriza-se por ser uma zona de sedimentos em suspensão, a zona 2 é constituído por dunas oblíquas observadas entre a profundidade de 15 e 25 m, a zona 3 com dunas transversais que ocorrem entre profundidades de 25 e 40 m, a zona 4 é uma zona de construções recifais, e a zona 5 ocorre entre 40 e 60 m e é caracterizada por um fundo do mar com refletância de tons escuros.

O biplot da análise de componentes principais das variáveis permitiu a interpretação da correlação entre os constituintes da assembleia bentônica e os componentes abióticos que caracterizam a geodiversidade (profundidade, morfologia do leito marinho e fácies sedimentares). Há uma correlação positiva entre algas calcárias, poríferos, cnidários, profundidade de 20-40 m, dunas longitudinais e construções de recifes, e a fácies areia bioclástica (grupo A). Além disso, Echinodermata, moluscos, profundidade de 0-20 m, fácies areia bioclástica com cascalho e cascalho bioclástico, e zona 1 (sedimento em suspensão) também estão correlacionados (grupo B). Já o grupo C constitui-se principalmente de Arthropoda, em profundidade de 40-60 m, zona 3 (dunas transversais) e na fácies areia biolitoclástica. Os grupos B e C tendem a não ocorrer juntos.

Os foraminíferos bentônicos encontrados ao longo da plataforma continental do Ceará são constituídos por 4830 espécimes representados por 59 espécies pertencentes a 20 gêneros. Os táxons epifaunais tiveram uma presença marcante em 14 gêneros, compreendendo até 70% da população total. As espécies epifaunais são: *Ammonia beccarii*, *Amphistegina gibbosa*, *Archaias angulatus*, *Peneroplis carinatus*, *Peneroplis* spp., *Quinqueloculina bicarinata*, *Quinqueloculina bicostata*, *Quinqueloculina* spp., *Sahulina conica*, *Textularia agglutinans*, *Triloculina* spp. e *Massilina pernambucensis*. O microhabitat infaunal é representado por 6 gêneros que representam 30% da população. Em geral, a

maioria dos foraminíferos bentônicos identificados ao longo da área de estudo estão localizados em águas rasas. A dominância de táxons epifaunais permitiu classificar a plataforma continental cearense como um ambiente oligotrófico e bem oxigenado. A distribuição de foraminíferos bentônicos vivos na coluna sedimentar segue alguns parâmetros, como a disponibilidade de oxigênio e alimento, refletindo na profundidade habitada e na morfologia da carapaça.

A área mais próxima à linha de costa, uma zona de alta energia, apresenta espécies coloridas o que sugere um possível retrabalhamento dos sedimentos. A região mais profunda, localizada na região central da área de estudo, foi interpretada como um ambiente favorável ao crescimento recifal, devido à predominância do gênero *Amphistegina*. Este gênero indica informações relacionadas a águas com boas condições para recifes na plataforma continental da área. A predominância de portadores de simbioses foraminíferos (por exemplo, *Peneroplis carinatus* e *Amphistegina gibbosa*) comumente encontrados em ambientes recifais, pode ser atribuída à presença de feições carbonáticas.

Os dados apresentados neste estudo permitem inferir que condições de correntes moderada a forte podem afetar a distribuição e abundância de foraminíferos. Isso pode ser indicado pelo valor do índice de diversidade, que variou de 0,77 - 2,54 e pertence à categoria moderada. Os índices de diversidade de Shannon-Wiener, Uniformidade e Dominância, sugerem que a atual condição da água na plataforma continental do Ceará é favorável para o habitat de foraminíferos.

A identificação de 14 gêneros epifaunais e 6 infaunais, juntamente com os valores moderados do índice de diversidade ($1 \leq H' \leq 3$), indica uma comunidade de foraminíferos bentônicos equilibrada e relativamente estável. O baixo índice de dominância sugere ainda a ausência de espécies predominantemente dominantes, refletindo uma estrutura de comunidade bem distribuída.

Em conclusão, este estudo fornece insights sobre as características ecológicas dos foraminíferos bentônicos ao longo da plataforma continental oriental da Margem Equatorial do Ceará. Este trabalho é relevante às ciências à medida que apresenta resultados essenciais relacionados às correlações entre a distribuição da macrofauna bentônica e a geodiversidade, através de diferentes componentes abióticos (tais como, profundidade, fácies sedimentares, morfologia de fundo). Além disso, apresenta informações inéditas sobre a composição, diversidade, uniformidade e dominância dos foraminíferos.

Essas descobertas não apenas aumentam a compreensão das condições ecológicas prevalentes neste ambiente, mas também estabelecem uma linha de base valiosa para

pesquisas futuras e esforços de monitoramento de qualquer empreendimento offshore que seja instalado na região (eólicas offshore, mineração de bioclásticos, ou outros). Esse conhecimento é particularmente importante para avaliar possíveis mudanças ambientais e apoiar estratégias de manejo nesta região da plataforma continental semiárida, subsidiando seu desenvolvimento sustentável no âmbito da Economia Azul.

REFERÊNCIAS

- ABREU NETO, João Capistrano. **Geodiversidade da plataforma continental de Icapuí, Ceará: uma proposta de identificação de áreas chave em ambientes marinhos**. 2017. 124 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- AGER, Derek Victor. **Principles of Paleoecology**: an introduction to the study of how and where animals and plants lived in the past. New York: McGraw-Hill, 1963. p. 1-371.
- AGUIAR NETO, Antônio Borges de ; MARQUES, Wanessa Sousa; FREIRE, George Satander Sá. Distribuição espacial de minerais pesados nos sedimentos superficiais da plataforma continental oeste do Ceará, nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 1, p. 69-83, 2016.
- ALMUTAIRI, Khalid et al. Technical, economic, carbon footprint assessment, and prioritizing stations for hydrogen production using wind energy: a case study. **Energy Strategy Reviews**, v. 36, p. 1-17, 2021.
- ANTUNES, Rogério Laureiro, MELO, José Henrique Gonçalves. Micropaleontologia e estratigrafia de sequências. In: RIBEIRO, Hélio Jorge Portugal Severiano (Ed.) **Estratigrafia de sequências fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: Editora Unisinos, 2001. p. 137-218.
- ASSIS, Hortencia Maria Barboza et al. **Potencialidade dos granulados marinhos da plataforma continental leste do Ceará**. Recife: CRPM Serviço Geológico do Brasil, 2007.
- BARRETO, Leopoldo Melo et al. Northern Brazil. In: MILLIMAN, John Donohue; SUMMERHAYES, Colin Peter (eds.). **Upper continental margin off Brazil**. Stuttgart: Schweizerbart, 1975. p. 11-43.
- BARRETTO, Henyo Trindade; SUMMERHAYES Colin Peter. Oceanography and suspended matter off northeastern Brazil. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 45, p. 822-833.
- BARROS, Eduardo Lacerda. **Caracterização faciologica da plataforma continental interna de Icapuí, Ceará**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências Marinhas e Tropicais) Instituto de Ciências do mar – Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2014.
- BASTOS, Alex Cardoso et al. Bryozoans are major modern builders of south atlantic oddly shaped reefs. **Sci. Rep.**, v. 8, p. 1-11, 2018. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-27961-6> .
- BOSENCE, Daniel. Coralline algal reef frameworks. **Journal of the Geological Society**, v. 140, n. 3, p. 365-376, 1983. <http://dx.doi.org/10.1144/gsjgs.140.3.0365>
- BÔAS, Alexandre Bigio Villas; FIGUEIREDO, Marcia Abreu de Oliveira; VILLACA, Roberto Campos. Colonization and growth of crustose coralline algae. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 53, p. 147-156, 2005.
- BISCHOF, Barbie; MARIANO, Arthur; EDWARD, Ryan. **The north brazil current**. Ocean Current Brazil, 2003. <http://oceancurrents.rsmas.miami.edu/atlantic/northbrazil.html>.

BROOKS, Anthony et al. **Accessing and developing the required biophysical dataset and data layers for marine protected areas network planning and wider marine spatial planning purposes**. Task 2A: Mapping of Geological and Geomorphological Features, 2009.

BROOKS, Anthony et al. **Characterizing Scotland's marine environment to define search locations for new Marine Protected Areas**. Scottish Natural Heritage Commissioned Report n. 431, 2012. Disponível em: <http://www.snh.gov.uk/publications-data-and-research/publications/search-the-catalogue/publication-detail/?Id=1870>. Acesso em: 12 out. 2012.

BROOM, Judith Ellen Sutherland et al. Utility of psbA and nSSU for phylogenetic reconstruction in the corallinales based on New Zealand taxa. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 46, n. 3, p. 958-973, 2008.

BUREK, Cynthia et al. Marine geoconservation in the United Kingdom. **Proceeding of the Geologist Association**, v. 124, n. 2013, p. 581-592, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jgeola.2012.10.003>. Acesso em: 27 dez. 2012.

BURONE, Leticia et al. Foraminiferal responses to polluted sediments in the Montevideo coastal zone, Uruguay. **Mar. Pollut. Bull.**, vol. 52, p. 61-73, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.08.007>.

CASTRO, Clovis Barreira; PIRES, Debora de Oliveira. Brazilian coral reefs: What we already know and what is still missing. **Bull. Mar. Sci.**, v. 69, p. 357-371, 2001.

CINTRA, Marcio Machado et al. Physical processes that drive the seasonal evolution of the southwestern tropical atlantic warm pool. **Dyn. Atmos. Oceans**, v. 72, p. 1-11, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2015.08.001>.

CINTRA, Marcio Machado; GOMES, Moab Praxedes; VITAL, Helenice. Interactions between the north brazilian undercurrent (NBUC) and the southwest atlantic margin. Implications for brazilian shelf-edge systems. **Regional Studies in Marine Science**, v. 54, p. 1-15, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102486>

COLTMAN, Natalie; GOLDING, Neil; VERLING, Emma. **Developing a broadscale predictive EUNIS habitat map for the MESH study area**. 2008. p. 1-16. <https://www.emodnet-seabedhabitats.eu/resources/mesh-archive/>.

COUTINHO, Paulo da Nóbrega; MORAIS, Jader Onofre de. Distribucion de los sedimentos en la plataforma continental norte y nordeste del Brasil. **Arq. Ciên. Mar**, v. 10, n. 1, p. 79-90, 1970.

COUTINHO, Paulo da Nóbrega. **Levantamento do estado da arte da pesquisa dos recursos vivos marinhos do Brasil-oceanografia geológica. região nordeste**. Programa Revizee: Ministério do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, 1996. p. 1-97.

CONNOR, David et al. **The marine habitat classification for britain and ireland version 04.05**. Peterborough: JNCC, 2004. p. 1-49.

D'AMORE-DOMENECH, Rafael; LEO, Teresa. Sustainable hydrogen production from offshore marine renewable farms: techno-energetic insight on seawater electrolysis technologies. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 7, n. 9, p. 8006-8022, 2019.

DE LIMA, Danielle et al. Estimating the offshore wind resources of the state of Ceará in Brazil. **Renewable Energy**, v. 83, p. 203-221, 2015.
<https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.04.025>.

DECASTRO, Maite et al. Europe, China and the United States: three different approaches to the development of offshore wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 55-70, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.025>.

DIAS, Gilberto Tavares de Macedo. Granulados bioclásticos das algas calcárias. **Rev. Bras. Geofis.**, v. 18, p. 307-318, 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-261x2000000300008>.

DIAS, Gilberto Tavares de Macedo; SILVA, Rafael Cuellar de Oliveira; SANTOS FILHO, João Regis dos. Manoel Luiz reefs morphology unveiled by high resolution images of worldview-3 satellite (north brazilian continental shelf). **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 12, n. 1, p. 46-59, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v12i1.76577>.

EPE. **Roadmap eólica offshore Brasil**: perspectivas para a energia eólica marítima. Rio de Janeiro, 2020. p. 1-140.

FINCO, Jessica; BONETTI, Jarbas. Caracterização da geodiversidade da plataforma continental interna a noroeste da ilha do arvoredo - sc através de dados geoacústicos e sedimentológicos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 24, n. 2, p. 1-9, 2020.

FONTES, Luiz Carlos da Silva et al. Sedimentos superficiais da plataforma continental de Sergipe - Alagoas. In: FONTES, Luiz Carlos da Silva; KOWSMANN, Renato Oscar; PUGA-BARNABÉU, Angel (Eds.). **Geologia e geomorfologia da Bacia de Sergipe-Alagoas**. São Cristóvão: Editora UFS, 2017. p. 62-96.

FONTES, Vanessa et al. Reefs distribution and inter reef sedimentation on Tamandaré continental shelf, northeast Brazil. In: HARRIS, Peter Townsend; BAKER, Elaine (Eds.). **Seafloor geomorphology as benthic habitat**: geohab atlas of seafloor geomorphic features and benthic habitats. Elsevier Sciences, 2020. p. 561-569. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814960-7.00033-6>.

FOSTER, Micheal Simmler et al. Diversity and natural history of a lithothamnion muelleri-sargassum horridum community in the gulf of California. **Ciencias Marinas**, v. 33, n. 4, p. 367-384, 2007.

FREIRE, George Satander Sá. **Geologia marinha da plataforma continental do estado do Ceará**. 1985. 134 f. Dissertação (Mestrado em Geociência) Centro de Tecnologia – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, 1985.

FREIRE, George Satander Sá et al. Classificação dos sedimentos da plataforma continental do estado do Ceará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 1997, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: UFC, 1997. p. 209-211.

FREIRE, George Satander Sá; CAVALCANTI, Vanessa Maria Mamede. A cobertura sedimentar quaternária da plataforma continental do estado do Ceará. Fortaleza: DNPM 10, 1998.

FREIRE, George Satander Sá et al. **Potencialidade dos Granulados Marinhos da Plataforma Continental Leste do Ceará**. Recife: CRPM – Serviço Geológico do Brasil, 2007. 45p.

GANIYU, Soliu Oladejo; MARTÍNEZ-HUITLE, Carlos Alberto; RODRIGO, Manuel Andres. Renewable energies driven electrochemical wastewater/soil decontamination technologies: a critical review of fundamental concepts and applications. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 270, 2020.

GORDON, John Edward et al. **Links between geodiversity and biodiversity on upland plateaux in Scotland**: the importance of terrain sensitivity in managing change. British: Scottish Natural Heritage, 2006. Disponível em: http://www.cms.uhi.ac.uk/conferences/upland_biodiversity_Dec2006/Gordon_extendedabstract.pdf . Acesso em : 12 out. 2012.

GORDON, John Edward; BARRON, Hugh. **Scotland's geodiversity**: development of the basis for a national framework. British: Scottish Natural Heritage Commissioned Report n. 417, 2011. Disponível em: http://www.snh.org.uk/pdfs/publications/commissioned_reports/417.pdf. Acesso em: 1 jul. 2012.

GRAY, Murray. **Geodiversity**: valuing and conserving abiotic nature. 1st ed. New York: John Wiley & Sons. 2004.

GRAY, Murray. Geodiversity: a new paradigm for valuing and conserving geoheritage. **Geoscience Canada**, v. 35, n. 2, p. 51-59, 2008.

HALFAR, Jochen; RIEGL, Bernhard. From coral framework to rhodolith bed: Sedimentary footprint of the 1982/1983 ENSO in the galápagos. **Coral Reefs**, v. 32, n. 4, p. 1-985, 2013.

HAMMAR, Linus; PERRY, Diana; GULLSTRÖM, Martin. Offshore Wind Power for Marine Conservation. **Open Journal of Marine Science**, v. 06, n. 01, p. 66-78, 2016.

HARRIS, Peter Townsend et al. Geomorphology of the oceans. **Marine Geology**, v. 352, n. 4, p. 4-24, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.01.011>

HEIJDEN, Luuk Van Der; KAMENOS, Nicholas Andreas. Reviews and syntheses: calculating the global contribution of coralline algae to total carbon burial. **Biogeosciences**, v. 12, n. 10, p. 6429-6441, 2015.

HORTA, Paulo Antunes et al. Rhodoliths in Brazil: current knowledge and potential impacts of climate change. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n.2, p. 117-136, 2016.

IBAMA. **Mapas de projetos em licenciamento - Complexos Eólicos Offshore**. 2024.

Acessado em 8 de agosto de 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/laf/consultas/mapas-de-projetos-em-licenciamento-complexos-eolicos-offshore>

JORISSEN, Franciscus Josephus, DE STIGTER, Henko., WIDMARK, Joen. A conceptual model explaining benthic foraminiferal microhabitats. **Marine Micropaleontology**, vol. 26, n. 1, p. 3-15, 1995. [https://10.1016/0377-8398\(95\)00047-X](https://10.1016/0377-8398(95)00047-X).

JORISSEN, Frans Josephus ; FONTANIER, Christophe ; THOMAS, Ellen. Paleooceanographical proxies based on deep-sea benthic foraminiferal assemblage characteristics. In: HILLAIRE-MARCEL, Claude; VERNAL, Anne de (Eds.). **Proxies in late cenozoic paleoceanography**. Developments in Marine Geology, 2007. p. 263-313.

KAYANO, Mary Toshie; ANDREOLI, Rita Valeria. Clima da região nordeste do Brasil. In: CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque et al. (Orgs.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 213-233.

KASKELA, Anu Mari et al. Seabed geomorphic features in a glaciated shelf of the baltic sea. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 100, p. 150-161, 2012.

KASKELA, Anu Marii et al. Linkages between benthic assemblages and physical environmental factors: the role of geodiversity in eastern gulf of Finland ecosystems. **Continental Shelf Research**, v. 142, p. 1-13, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2017.05.013>

KELLER, David R, GOLLEY, Frank. **The philosophy of ecology: from science to synthesis**. Athens: University of Georgia Press, 2000.

KÖPPEN, Wladimir. **Climatología con un estudio de los climas de la Tierra**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948.

LANGHAMER, Olivia. Artificial reef effect in relation to offshore renewable energy conversion: State of the art. **The Scientific World Journal**, v. 2012, n. 1, p. 1-8, 2012. <https://dx.doi.org/10.1100/2012/386713>

LEÃO, Zelinda Margarida de Andrade Nery et al. Brazilian coral reefs in a period of global change: a synthesis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 64, n. 2, p. 97-116, 2016. <https://doi:10.1590/S1679-875920160916064>

LEOPOLDINO OLIVEIRA, Karen Maria et al. Seismic stratigraphic patterns and characterization of deepwater reservoirs of the Mundau sub-basin, brazilian equatorial margin. **Mar. Petrol. Geol.**, v. 116, p. 1-22, 2020. <https://doi:10.1016/j.marpetgeo.2020.104310>.

LI, Rengui. Latest progress in hydrogen production from solar water splitting via photocatalysis, photoelectrochemical, and photovoltaic-photoelectrochemical solutions. **Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis**, v. 38, n. 1, p. 5-12, 2017.

LIMA, Sávio Freire. ANASED: programa de análises, classificação e arquivamento de parâmetros metodológicos. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE

ESTUDO QUARTENÁRIOS (ABEQUA), VIII, 2001, Rio Grande do Sul. **Anais [...]**. Rio Grande do Sul: Mariluz-Imbé, 2001. p. 458-459.

LIMA, Jadson Pinto de. **Taxa de crescimento e produção de CaCO_3 de rhodolitos na costa semiárida brasileira**. 2019. 35 f. Dissertação (Mestrado em ciências marinhas e tropicais) – Instituto de Ciências do mar, Universidade Federal do Ceará, 2019.

LIMA FILHO, Regimário Pereira et al. Caracterização geomorfológica e sedimentológica da plataforma continental interna de Fortaleza. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, PAISAGEM E GEODIVERSIDADE, XII, 2018, Crato. **Anais [...]**. Crato, 2018.

LIRA, Marco Antonio Tavares et al. Estimativa dos Recursos eólicos no litoral Cearense usando a teoria da regressão linear. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, p. 349-366, 2011.

LOEBLICH, Alfred; TAPPAN, Helen. **Foraminiferal genera and their classification**. New York: Van Nostrand Reinhold. 1988.

LUCATELLI, Debora et al. Geodiversity as an indicator to benthic habitat distribution: an integrative approach in a tropical continental shelf. **Geo-Marine Letters**, v. 40, p. 911-923, 2019.

LUMPKIN, Rick; GARZOLI, Silvia Laura. Near-surface circulation in the tropical atlantic ocean. **Deep Sea Res. I**, v. 52, n. 3, p. 495-518, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2004.09.001>.

MADSEN, Peter Teglberg et al. Wind turbine underwater noise and marine mammals: Implications of current knowledge and data needs. **Marine Ecology Progress Series**, v. 309, p. 279-295, 2006.

MAIA, Luís Parente. **Processos costeros y balance sedimentário a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral**. 1998. 288 f. Tese (Doutorado en Geologia) – Universitat de Barcelona, Baelona, 1998.

MAIA, Maria Adelaide Mansini. **Geodiversidade das áreas adjacentes à cadeia submarina de Vitória-Trindade**: construção e aplicação de um modelo de compartimentação em macroescala do assoalho oceânico. 2013. 153 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MAIA DE ALMEIDA, Narelle et al. Mapeamento de Estruturas Submersas e Sedimentoloa Utilizando dados srtpmplus e landsat 8: região adjacente ao rio jaguaribe, plataforma leste do Ceará. **Revista de Geologia**, v. 29, p. 133-146, 2016.

MAIA DE ALMEIDA, Narelle et al. A three-dimensional (3D) structural model for an oil-producing basin of the Brazilian equatorial margin. **Marine and Petroleum Geology**, v. 122, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104599>

MAIA DE ALMEIDA, Narelle et al. Plataforma continental do Ceará. *In*: Helenice, Vital; Dias, Marcelo Sperle; Bastos, Alex Cardoso (Orgs.). **Livro Plataforma Continental Brasileira serie II**. Rio de Janeiro: Editora PGGM, 2021. p. 71-121.

MAIA DE ALMEIDA, Narelle et al. Granulados siliciclasticos. *In*: MELLO, Sidney Luiz de Matos; CALLIARI, Lauro Júlio; HORN FILHO, Norberto Olmiro; CORREA, Iran Carlos Stalliviere; DIAS, Marcelo Sperle (Orgs.). **Recursos minerais marinhos**. Rio de Janeiro: SBGf, 2023. p. 1-8. <http://dx.doi.org/10.22564/sbgfbook.cad5.2023.cap7>

MARTINS, Luiz Roberto Silva; COUTINHO, Paulo da Nóbrega. The Brazilian continental margin. **Earth-Science Reviews**, v. 17, p. 87-107, 1981. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90007-6](http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(81)90007-6).

MEDEIROS, David Hello Miranda de. **Influência da salinidade na heterogeneidade de paisagens estuarinas do domínio morfoclimático do semiárido Brasileiro**. 2020. 237 f. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Programa de Pós Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.

MIRANDA, Paulo Emilio Valdao de. **Hydrogen energy**: sustainable and perennial. science and engineering of hydrogen-based energy technologies: hydrogen production and practical applications in energy generation. 1st. ed. Elsevier: Academic press, 2019.

MIOLA, Brigida. **Proveniência de sedimentos para os ecossistemas estuarinos do litoral oeste do Ceará**. 2017. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Tropicais Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

MÖBIUS, Karl. Die auster und die austernwirtschaft. *In*: KELLER, David; GOLLEY, Frank (Eds.). **Philosophy of ecology**: from science to synthesis. Berlin: Hemple & Parey, 1877. p. 683-751.

MOLION, Luiz Carlos Baldicero; BERNARDO, Sergio de Oliveira. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MONTEIRO, Leonardo Hislei Uchoa. **Feições Superficiais da Plataforma Continental Cearense entre o Litoral de Fortaleza e Icapuí**. 2011. 181 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MORAIS, Jäder Onofre. Aspectos do transporte de sedimentos no município de Fortaleza, Estado do Ceará, Brasil. **Arquivo de Ciências do Mar**, v. 20, n. 2, p. 71-100, 1980.

MORAIS, Rute Maria Oliviera de. Fácies sedimentares e ambientes deposicionais associados aos depósitos da formação Barreiras no estado do Rio de Janeiro . **Série Científica**, v. 6, n. 2, p. 19-30, 2006.

MORAIS, Jäder Onofre; PINHEIRO, Lidriana de Sousa. The effect of semi aridity and damming on sedimentar dynamics in estuaries – Northeastern region of Brazil. **Journal of Costal Research**, v. 64, p. 1540-1544, 2011.

MORAIS, Jáder Onofre et al. Morphological and sedimentary patterns of a semi-arid shelf, Northeast Brazil. **Geo-Marine Letters**, v. 40, p. 835-842, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s00367-019-00587-x>

MOURA, Rodrigo Leão et al. Tropical rhodolith beds are a major and belittled reef fish habitat. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 1-10, 2021. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-80574w>

MUSSI, Carolina Schmanech. **Mapeamento da geodiversidade e análise de bens e serviços ecossistêmicos prestados pela plataforma continental de Santa Catarina, Brasil**. 2017. 111 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

ORTIZ, Gustavo Prouvot; KAMPEL, Milton. Potencial de energia eólica offshore na margem do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, 5, 2011, São Paulo. **Anais [...]. Oceanografia e Políticas Públicas** Santos: SP, 2011. p. 1-4.

PAIVA, Eduardo França et al. Reescrevendo histórias do Brasil: conexões e dinâmicas internas no centro-norte (séculos XVIII e XIX). **Belo Horizonte: Caravana**, v. 7, p. 1-781, 2023.

PAULA, Davis Pereira de; MORAIS, Jáder Onofre; PINHEIRO, Lidriana de Souza. Longitudinal suspended sediments transport in the Jaguaribe river estuary, Brazil. **Arquivos de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 15-38, 2009.

PESSOA, Fernando Amaro et al. Geodiversidade e serviços ecossistêmicos em trilhas de montanha na travessia Petrópolis -Teresópolis (parque nacional da serra dos órgãos, RJ). In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 12, 2018, Crato. **Anais [...]. Crato: CE**, 2018. Available from: <http://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/5/5-324-194.html>

PIELOU, Evelyn Chrystalla. **An introduction to mathematical ecology**. Wilwy-Intercience: New York, 1969.

PIELOU, Evelyn Chrystalla. **Ecological diversity**. John Wiley & Sons: New York, 1975.

PINHEIRO, Lidriana de Souza et al. A Plataforma Continental Semiárida do Brasil. In: DIETER MUHER, Flávia Moraes Lins-de-Barros, PINHEIRO, Lidriana de Souza. (Org.). **Geografia marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: Programa de geologia e geofísica Marinha, 2020. p. 129-153.

PITTMAN, Simon James; BROWN, Kerry Ann. Multi-Scale approach for predicting fish species distributions across coral reef seascapes. **PLOS ONE**, v. 6, n. 5, 2011.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020583>

PONZI, Vera Regina Abelin. Sedimentação marinha. In: NETO, José Antônio Baptista; PONZI, Vera Regina Abelin; SICHEL, Susanna Eleonora. (Ed.). **Introdução à geologia marinha**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. p. 219-241.

RICKLEFS, Robert Eric. **A economia da natureza**. 5ª ed. Guanabara-Koogan SA: Rio de Janeiro, 2003.

RIOSMENA-RODRÍGUEZ, Rafael. Natural history of rhodolith/maërl beds: Their role in near-shore biodiversity and management. *In*: RIOSMENA-RODRÍGUEZ, Rafael; NELSON Wendy; AGUIRRE, Julio. (Org.). **Rhodolith/Maërl Beds: A Global Perspective**. Coastal Research Library, 2017. p. 3-26.

ROFF, John; TAYLOR, Mark; LAUGHREN, Josh. Geophysical approaches to the classification, delineation and monitoring of marine habitats and their communities. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v 13, n. 1, p. 77-90, 2003.

ROFF, John; TAYLOR, Mark. National frameworks for marine conservation – a hierarchical geophysical approach. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v 10, p. 209-223, 2000.

ROVERE, Alessio et al. Bringing geoheritage underwater: methodological approaches to evaluation and mapping. *In*: REGOLINI-BISSIG, Géraldine; REYNARD, Emmanuel. (Eds.). **Mapping Geoheritage**. Lausanne : Institut de géographie, Géovisions, 2010. p. 65-80. http://www.unil.ch/webdav/site/igul/shared/Geovisions/Geovisions35/Geovisions35_I_UL_Rovere.pdf. Acesso em: 6 out. 2012.

ROVERE, Alessio et al. Bringing geoheritage underwater: definitions, methods, and application in two Mediterranean Marine areas. **Environmental Earth Sciences**, v. 64, n. 1, p. 133-142, 2011.

SANTOS FILHO, João Regis dos. **Geomorfologia e sedimentologia da plataforma continental brasileira com base na estruturação de um banco de dados como subsídio ao estudo de ambientes carbonáticos mesofóticos e da evolução sedimentar**. 2022. 157 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geofísica Marinha) – Instituto de Geociências, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

SCHOTT, Friedrich et al. On the boundary flow off Brazil at 5-10°S and its connection to the interior tropical atlantic. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 17, p. 1-21, 2002. <http://dx.doi.org/10.1029/2002gl014786> .

SIEMENSMA, Ferry et al. Taxonomic revision of freshwater foraminifera with the description of two new agglutinated species and genera. **European Journal of Protistology**, v. 60, p. 28-44, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejop.2017.05.006>

SILVA FILHO, Wellington Ferreira da. **Domínios morfoestruturais da plataforma continental do Estado do Ceará**. 2004. 303 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SILVA FILHO, Wellington Ferreira et al. Estruturas rasas na margem equatorial ao largo do nordeste brasileiro (estado do Ceará): análise de relevo e anomalias gravimétricas residuais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 25, n. 1, p. 65-77, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000500007>

SILVA PESSOA, Paulo Roberto. Análise integrada da evolução da paisagem no estuário do rio Acaraú–CE. **Revista GeoUECE**, v. 4, n. 7, p. 210-210, 2021. Disponível em :<https://revistas.uece.br/index.php/GeoUECEj.pecon.2021.06.001/article/view/6938>. Acesso em 9 maio.2025.

SILVEIRA, Ilson Carlos Almeida et al. A Corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Rev Bras. Oceanogr.**, v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.j3567>

SILVA, Luzia Liniane do Nascimento; GOMES, Moab Praxedes. Statistical approach on mixed carbonate-siliciclastic sediments of the NE brazilian outer shelf. **Geo-Marine Letters**, v. 39, n. 165, p. 1-13, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00367-019-00625-8>

SNYDER, Brian; KAISER, Mark. Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy. **Renewable Energy**, v. 34, n. 6, p. 1567-1578, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.11.015>

SOARES, Marcelo de Oliveira et al. Management of marine protected areas: the case of pedra da risca do meio marine park, NE - Brazil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 11, n. 2, p. 257-268, 2011.

SOARES, Marcelo de Oliveira et al. Challenges and perspectives for the Brazilian semi-arid coast under global environmental changes. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 3, p. 267-278, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.06.001>.

STRAMMA, Lothar; SCHOTT, Friedrich. The mean flow field of the tropical atlantic ocean. **Deep Sea Research Part II**, v. 46, p. 279-304, 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0645\(98\)00109-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0645(98)00109-X)

TINOCO, Ivan de Medeiros. **Introdução ao estudo dos componentes bióticos dos sedimentos marinhos recentes**. Recife: Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco. 1989.

TOUGAARD, Jakob; CARSTENSEN, Jacob; TEILMANN, Jonas. Pile driving zone of responsiveness extends beyond 20 km for harbor porpoises (*Phocoena phocoena* (L.)). **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 126, n. 1, p. 11-14, 2009.

USGS/NASA. United States Geological Survey/National Aeronautics and Space Administration. **Sentinel-2 A launches-our compliments & our complements**. 2018. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/sentinel-2a-launches-our-compliments-our-complements/> Acesso em: 20 mar. 2018 e 19 out.

VILELA, Claudia Gutterres. Foraminíferos. In: CARVALHO, Ismar de Souza. (Org.). **Paleontologia: microfósseis, paleoinvertebrados**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 53-69.

WEDDING, Lisa et al. Managing mining of the deep seabed. **Science**, v. 349, n. 6244, p. 144-145, 2015.

WENTWORTH, Chester Keeler. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **Journal Geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392, 1922.

WRIGHT, Victor Paul; BURGESS, Peter. The carbonate factory continuum, facies mosaics and microfácies: an appraisal of some of some of the key concepts underpinning carbonate sedimentology. **Facies**, v. 51, p. 17-23, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10347-005-0049-6>

XIMENES NETO, Antonio Rodrigues. **Evolução do sistema de paleocanais na plataforma continental rasa de CAMocim, Ce-Brasil, durante o Quaternário Superior**. 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado Acadêmico ou Profissional em 2018) – Universidade Estadual do Ceará, 2018.

XIMENES NETO, Antonio Rodrigues; MORAIS, Jäder Onofre; CIARLINI, Clairton. Modern and relict sedimentary systems of the semi-arid continental shelf in NE Brazil. **J. S. Am. Earth Sci.**, v. 84, p. 56-68, 2018b.

XIMENES NETO, Antonio Rodrigues et al. Transgressive deposits and morphological patterns in the equatorial atlantic shallow shelf, Northeast Brazil. **Reg. Stud. Mar. Sci.**, v. 24, p. 212-224, 2018a.

ZHAO, Feng; LEE, Joyce. **GWEC: global wind report 2021**. Bélgica: Global Wind Energy Council, 2021. p. 1-80. Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>. Acesso em: 14 nov. 2021.