



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

**MÁRIO SILVA CHACANZA**

**PROCESSOS EROSIVOS E DEPOSICIONAIS COSTEIROS NO MUNICÍPIO DE  
ICAPUÍ-CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL**

**FORTALEZA**

**2023**

MÁRIO SILVA CHACANZA

PROCESSOS EROSIVOS E DEPOSICIONAIS COSTEIROS NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ-  
CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL

Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geologia. Área de concentração: Geologia.

Orientador: Prof. Dr. George Satander Sá Freire  
(*In: Memory*).

Coorientadora: Profa. Dra. Narelle Maia de Almeida.

FORTALEZA

2023

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)

---

- C422p Chacanza, Mário Silva.  
Processos erosivos e deposicionais costeiros no município de Icapuí-Ceará, Nordeste do Brasil /  
Mário Silva Chacanza. – 2023.  
142 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em  
Geologia, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. George Satander Sá Freire.  
Coorientação: Profa. Dra. Narelle Maia de Almeida.
1. Erosão costeira - Icapuí (CE). 2. DSAS. 3. RPA. 4. Variação de volume. 5. IVC. I. Título.  
CDD 551
-

MÁRIO SILVA CHACANZA

PROCESSOS EROSIVOS E DEPOSICIONAIS COSTEIROS NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ-  
CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL

Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação  
em Geologia da Universidade Federal do Ceará,  
como parte dos requisitos para obtenção do título  
de Doutor em Geologia. Área de concentração:  
Geologia.

Aprovada em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

Prof. Dr. André Giskard Aquino da Silva  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

---

Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes  
Universidade de Pernambuco (UPE)

---

Prof. Dr. Eduardo Lacerda Barros  
Secretaria do Meio Ambiente e Mudança do Clima (SEMA)

---

Profa. Dra. Mary Lúcia da Silva Nogueira  
Universidade Federal Ouro Preto (UFOP)

Aos meus pais, Manuel Charles Chacanza (*In memory*) e Helena Silva Dongué Chacanza.

A minha esposa Scálete Lourinho e as minhas filhas, Aryanna Chacanza e Narelle Chacanza.

Aos meus irmãos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus pais Manuel Charles Chacanza e Helena Silva Dongué Chacanza, por me terem trazido ao mundo, pela educação e apoio moral que sempre me deram. Aos meus irmãos, por terem me dado algum suporte.

A minha esposa Scálete Lourinho e as minhas filhas Aryanna e Narelle, por estarem sempre comigo, apesar da distância nos separou durante os quatro anos.

Ao meu orientador Prof. Dr. George Satander Sá Freire (*In memory*), pela confiança que depositou em mim e com isso ter aberto sua mão e ter aceito como seu orientando e me ter integrado como membro do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA).

A minha coorientadora Profa. Dra. Narelle Maia de Almeida, pela força, confiança e todo apoio depositado em mim desde da etapa inicial do trabalho até a conclusão.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes, Prof. Dr. Andre Giskard Aquino da Silva, Profa. Dra. Mary Lúcia da Silva Nogueira e Prof. Dr. Eduardo Lacerda Barros, pelo tempo disponibilizado na leitura do trabalho e das ricas sugestões para a melhoria do mesmo. A Prof. Dr. João Capistrano de Abreu Neto, integrante da banca como membro suplente e pelos dados disponibilizados que foram bastante úteis na execução da pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a *The Academy of Sciences for the Developing World* (TWAS), pela concessão da bolsa de pesquisa sob o processo N° 166322/2018-0.

A Universidade Federal do Ceará, através do Programa de Pós-Graduação em Geologia. A CAPES, financiadora do programa do Pós-Graduação. Aos professores do programa, entre efetivos e visitantes que direta ou indiretamente contribuíram na minha formação com aulas, palestras e demais atividades científicas.

A Universidade Púnguè – Moçambique (UniPúnguè), instituição de origem e de vínculo empregatício.

Ao Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA), onde fui recebido e tive oportunidade de aprender e formar novos amigos. Aos colegas Matheus, Daniel, Inácio, Guilherme, Rafael, Leonardo e Peguy, pelo apoio incondicional prestado nas atividades de campo,

sobretudo no período crítico da pandemia de Covid 19. Aos demais colegas do LGMA, agradeço pela força e pelos quatro anos que juntos convivemos.

Ao colega Cláudio Ângelo da Silva Neto, do Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), pelo apoio prestado em todos os campos e pela disponibilização do Drone, usado na coleta de dados aerofotogramétricos. Aos colegas Eduardo Freire e Maykon Targino, também do GEOCE, pelas interações que sempre tivemos em relação a conteúdos ligados a dinâmica costeira.

Agradeço aos meus amigos (irmãos de convivência diária), Catarina Melo e Guirino Nhatave, que juntos partilhamos o mesmo apartamento durante os quatro anos de minha formação.

Muito Obrigado!

## RESUMO

Praias são regiões da zona costeira onde os efeitos da interação entre os ecossistemas marinhos, terrestres e atmosféricos são visualizados com mais frequência, onde os agentes naturais, como ventos, marés, correntes litorâneas e ondas, atuam de forma mais intensa e em conjunto. Os agentes antrópicos também interferem nos processos costeiros, modificando a dinâmica natural das correntes litorâneas, interferindo no aporte sedimentar. Estes processos, sejam naturais ou antrópicos, podem resultar na erosão ou acreção. Se a erosão for intensa e contínua representará um grave problema, sobretudo em praias densamente ocupadas e economicamente importantes, a exemplo das praias Peroba e Redonda do município de Icapuí-Ceará que tem, no tempo recente, registrado eventos erosivos. Assim, este trabalho objetivou compreender os processos erosivos e deposicionais, através do estudo da variação da linha de costa a médio e a curto prazo, das praias de Peroba e Redonda, e a vulnerabilidade à erosão como forma de subsidiar o gerenciamento costeiro da região. Imagens de satélite, modelos digitais de elevação e ortomosaicos gerados a partir de dados aerofotogramétricos coletados em campo com RPA foram importados para ambiente SIG onde foram vetorizados, calculadas as taxas de variação da linha de costa, diferença de volume e o valor do índice de vulnerabilidade costeira. A médio prazo, entre 2005 e 2020, os resultados indicaram que os valores fornecidos pela Taxa do Ponto Final e Regressão Linear foram de -0,54 e -0,47 m/ano, respectivamente, indicando que a linha de costa permaneceu estável em cerca de 82,81% (4.200 m) e 84,98% (4.310 m). Os resultados de curto prazo gerados a partir dos dados de RPA (2020-2021) indicou que na praia de Peroba a linha de costa manteve-se estável em cerca de 0,87 m/ano, onde a variação de volume indicou um balanço positivo de sedimentos da ordem de 18.815 m<sup>3</sup>. Na praia de Redonda a linha de costa variou cerca de 1,27 m/ano, onde a variação de volume indicou um balanço negativo de sedimentos em todo o período analisado da ordem de -1.230 m<sup>3</sup>. Em relação aos sedimentos o sistema praiial foi caracterizado majoritariamente por areias muito finas e finas. A variação de volume indicou tendências similares à da linha de costa, com maior intensidade de deposição na porção oeste de cada praia. Observou-se que setores de relativa estabilidade têm influência antrópica pela construção de estruturas de contenção da erosão. Já a maior deposição nos subsetores oeste das duas praias pode estar associada a erosão do subsetor leste impulsionada pela ação de ondas junto aos promontórios e correntes de marés associadas a episódios de superlua e maré de sizígia, conjugado com outras



fontes de aporte de sedimentos que alimentam as praias através da deriva litorânea. Com relação a sensibilidade à erosão, as praias apresentaram três níveis de vulnerabilidade: moderada com 58% (2.940 m), alta com 41% (2.100 m) e muito alta com 1% (30 m). O valor médio de IVC é de 0,61, classificando a área de estudo como de alta vulnerabilidade. Este trabalho apresenta informações robustas que auxiliarão na tomada de decisões e no gerenciamento da zona costeira estudada.

**Palavras-chave:** erosão costeira; DSAS; RPA; variação de volume; IVC.

## ABSTRACT

Beaches are regions of the coastal zone where the effects of interaction between marine, terrestrial and atmospheric ecosystems are most often visualized, where natural agents, such as winds, tides, coastal currents and waves act more intensely and together. Anthropogenic agents also interfere in the coastal processes, modifying the natural dynamics of the coastal currents, interfering in the sedimentary contribution. These processes, whether natural or anthropogenic, may result in erosion or accretion. If erosion is intense and continuous, it will represent a serious problem, especially in densely occupied and economically important beaches, such as the Peroba and Redonda beaches in the municipality of Icapuí-Ceará that have, in recent time, registered erosive events. So, this work aimed to understand the erosive and depositional processes, through study of the shoreline variation in a short and medium term, on Peroba and Redonda beaches, and the vulnerability of the erosion like a form to subsidize the coastal management of the region. Satellite images, digital elevation models and orthomosaics generated from aerophotogrammetric data collected in the field with RPA were imported into the GIS environment where they were vectorized, shoreline variation rates, volume difference and the value of the coastal vulnerability index were calculated. In the medium term, between 2005 and 2020, the results indicated that the values provided by the End Point Rate and Linear Regression were  $-0.54$  and  $-0.47$  m/year, respectively, indicating that the shoreline remained stable at about 82.81% (4,200 m) and 84.98% (4,310 m). The results generated from RPA data (2020-2021), indicated that at Peroba beach the shoreline remained stable at about 0.87 m/yr, where the volume variation indicated a positive sediment balance on the order of 18,815 m<sup>3</sup>. At Redonda beach the coastline varied around 1.27 m/year, where the variation in volume indicated a negative balance of sediments in the whole period of -1,230 m<sup>3</sup>. Regarding sediments, the beach system was mostly characterized by very fine and fine sands. The variation in volume indicated trends similar to those of the coastline, with greater intensity of deposition in the western portion of each beach. It was observed that relatively stable sectors have anthropic influence by the construction of erosion containment structures. The greater deposition in the western subsectors of the two beaches may be associated with the erosion of the eastern subsector driven by wave action near the headlands and tidal currents associated with episodes of supermoon and high tide, combined with other sources of sediment contribution that feed the beaches through coastal drift. In relation to sensitivity at erosion, beaches presented three levels of vulnerability:

moderate with 58% (2,940 m), high with 41% (2,100 m) and very high with 1% (30 m). This work presents robust information that will assist in decision making and management of the studied coastal zone.

**Keywords:** coastal erosion; DSAS; RPA; volume change; CVI.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Localização da área de estudo .....	33
Figura 2 -	Fluxograma metodológico .....	35
Figura 3 -	Localização da área de estudo no município de Icapuí – Ceará, Brasil .....	42
Figura 4 -	Mapa de setorização da área de estudo (praias de Peroba e Redonda – Icapuí-Ceará) .....	43
Figura 5 -	Estruturas de proteção costeira, na tentativa de conter processos erosivos da zona costeira do município de Icapuí. (A) Muro de proteção construído na base de madeira, praia de Peroba. (B) Muro de proteção do tipo enrocamento, praia de Redonda .....	44
Figura 6 -	Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2005 e 2010 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda .....	49
Figura 7 -	Quantificação da variação da linha de costa entre 2005 e 2010. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial .....	50
Figura 8 -	Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2010 e 2015 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda .....	51
Figura 9 -	Quantificação da variação da linha de costa entre 2010 e 2015. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial .....	52
Figura 10 -	Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2015 e 2020 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda .....	53
Figura 11 -	Quantificação da variação da linha de costa entre 2015 e 2020. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial .....	54
Figura 12 -	Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2005 e 2020 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda .....	55

Figura 13 -	Quantificação da variação da linha de costa entre 2005 e 2020. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial .....	55
Figura 14 -	Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2005 e 2020 estabelecido pelo parâmetro LRR entre as praias de Peroba e Redonda .....	56
Figura 15 -	Quantificação da variação da linha de costa entre 2005 e 2020. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial .....	57
Figura 16 -	A) Histórico de variação de temperatura em função a ocorrência dos eventos El Niño e La Niña (Adaptado de Administração Nacional Oceânica e Atmosférica – NOAA, 2021); B) Histórico de precipitação acumulada do município de Icapuí-Ceará, Brasil (FUNCEME, 2021) .....	59
Figura 17 -	Localização da área de estudo no município de Icapuí – Ceará, Nordeste do Brasil .....	72
Figura 18 -	Coleta de dados em campo. A) Levantamento para coleta de dados aerofotogramétricos com RPA; B) Coleta de dados de pontos de controle com receptores GNSS .....	74
Figura 19 -	Distribuição espacial de pontos de controle nos dois setores .....	77
Figura 20 -	DEMs individuais de cinco períodos, gerados a partir de dados coletados na praia de Peroba (setor 1) .....	80
Figura 21 -	Representação espacial de variação do volume de sedimentos erodido e depositado na praia de Peroba .....	81
Figura 22 -	Variação de volume de sedimentos na praia de Peroba .....	81
Figura 23 -	Perfis perpendiculares a linha de costa mostrando variações altimétricas ao longo da praia de Peroba entre agosto de 2020 e agosto de 2021. A) Perfil P1; B) Perfil P2; C) Perfil P3; e D) Localização dos perfis .....	82
Figura 24 -	Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa aplicada ao parâmetro LRR na praia de Peroba, período entre agosto/2020 e agosto/2021 .....	84

Figura 25 - Mosaico de imagens representando trechos erosivos e deposicionais. A) Visão leste da praia de Peroba; B e C) Vistas diferentes do mesmo trecho erodido com estruturas de proteção costeira de madeira e reposição do acesso que havia sido destruído; D e E) Mesmo trecho de praia onde a primeira imagem de agosto de 2020 com cota maior e a segunda de agosto de 2021 com cota mais baixa devido à perda de sedimento; F) Escarpa erosiva, controlada pela comunidade com constantes reposições de sedimentos no sentido de manter o acesso as demais infraestruturas que se encontram a leste da praia; e G-I) Imagens no ponto de levantamento do perfil P3 em três períodos, a primeira em agosto de 2020 (G), segunda em novembro de 2020 (H) e a terceira em agosto de 2021 (I) .....	86
Figura 26 - DEMs individuais de cinco períodos, gerados a partir de dados coletados na praia de Redonda (setor 2) .....	88
Figura 27 - Representação espacial de variação do volume de sedimentos erodido e depositado na praia de Redonda .....	89
Figura 28 - Variação de volume de sedimentos na praia de Redonda .....	90
Figura 29 - Perfis perpendiculares a linha de costa mostrando variações altimétricas ao longo da praia de Redonda entre agosto de 2020 e agosto de 2021. A) Perfil no ponto P4; B) Perfil no ponto P5; C) Perfil no ponto P6; e D) Localização dos perfis .....	91
Figura 30 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa aplicada ao parâmetro LRR na praia de Redonda, período entre agosto/2020 e agosto/2021 .....	93
Figura 31 - Mosaico de imagens. A) Visão oeste da praia de Redonda, mostrando estrutura de proteção costeira do tipo enrocamento, fixador de linha de costa; B) Fase de conclusão da obra de proteção costeira; C) Incidência de ondas sobre a estrutura de proteção; e D) Escarpa erosiva com mais de meio metro de altura .....	94
Figura 32 - Sedimentos distribuídos antepraia de Ap1 a Ap9, praia de Pr1 a Pr9 e retropraia de Rp4, Rp8 e Rp9, em nove pontos de monitoramento ao longo da linha de costa da área de estudo. A) Variação do tamanho médio do grão; B) Assimetria – Sk; e C) Localização das amostras de sedimentos .....	96

Figura 33 - Dados de onda do modelo global Wavewatch III. Altura significativa e período de onda .....	99
Figura 34 - Área de estudo no município de Icapuí–Ceará, Brasil, a qual é constituída pelas Praias de Peroba (setor 1) e Redonda (setor 2) .....	110
Figura 35 - (A) IVC: Índice de vulnerabilidade costeira entre as praias de Peroba e Redonda; (B) Classes de índice de vulnerabilidade costeira por variáveis. LC: linha de costa .....	115
Figura 36 - Classes de vulnerabilidade costeira. (A) Distância em relação a linha de costa; (B) Porcentagem de vulnerabilidade ao longo do trecho analisado .....	116
Figura 37 - Trechos de praia representando diferentes morfologias face ao nível de resposta da linha de costa em relação aos riscos físicos devido à interação com mar. (A) Promontório rochoso no extremo leste do setor 1; (B, C e D) Trechos do setor 1 que representam uma alta vulnerabilidade costeira; (E) Área de falésia ativa com promontório rochoso entre os setores 1 e 2; (F e G) Trechos do setor 2 com vulnerabilidade alta e temporariamente controlada devido à estrutura de contenção à erosão; (H) Trecho com uma extensa área de retropraia (área de conservação) .....	117
Figura 38 - Uso e ocupação do solo costeiro em função a distância de recuo em relação a linha de costa. A cor vermelha indica ocupações numa distância inferior à 50 m da linha de costa, a cor amarela ocupações numa distância superior a 50 m e a cor verde sem ocupação no raio superior a 200 m (área de conservação) .....	119

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Imagens utilizadas como base para a vetorização das linhas de costa, com seus respectivos satélites, sensores e fontes de aquisição .....	46
Tabela 2 -	Classes das taxas de deslocamento da linha de costa .....	48
Tabela 3 -	Taxa de variação e movimento linear da entre 2005 e 2010 .....	49
Tabela 4 -	Taxa de variação e movimento linear da costa entre 2010 e 2015 .....	50
Tabela 5 -	Taxa de variação e movimento linear da costa entre 2015 e 2020 .....	52
Tabela 6 -	Taxas de variação e movimento linear da costa entre 2005 e 2020 .....	54
Tabela 7 -	Especificações do sensor usado no levantamento dos dados planialtimétricos .....	74
Tabela 8 -	Setores, número de imagens e data dos voos .....	75
Tabela 9 -	Taxas de variação e movimento linear da linha de costa para o setor 1 (Praia de Peroba), período entre agosto de 2020 e agosto de 2021 .....	83
Tabela 10 -	Taxas de variação e movimento linear da costa para o setor 2 (Praia de Redonda), período entre agosto de 2020 e agosto de 2021 .....	92
Tabela 11 -	Ranking da vulnerabilidade costeira segundo os Índice de Vulnerabilidade costeira (ICV) .....	111
Tabela 12 -	Valores de vulnerabilidade por variáveis .....	114
Tabela 13 -	Valores do Índice de Vulnerabilidade Costeira ao longo da linha de costa .....	114



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBERS	<i>China-Brazil Earth-Resources Satellite</i>
CE	Ceará
DEM / MDE	<i>Digital Elevation Model</i> / Modelo Digital de Elevação
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
DoD	<i>DEM of Difference</i>
DSAS	<i>Digital Shoreline Analysis System</i>
EPR	<i>End Point Rate</i>
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPECE	Instituto de Pesquisa Estratégia Econômica do Ceará
IVC	Índice de Vulnerabilidade Costeira
LGMA	Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada
LRR	<i>Linear Regression Rate</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NSM	<i>Net Shoreline Movement</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis
PNGC	Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro
REIS	<i>RapidEye Earth Imaging System</i>

RPA	Aeronave Remotamente Pilotada / <i>Remotely Piloted Aircraft</i>
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SIG	Sistema de Informações Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
UFC	Universidade Federal do Ceará
UTM	Unidade Transversal de Mercator
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>22</b>
<i>1.2.1</i>	<i>Geral .....</i>	<i>22</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Específicos .....</i>	<i>22</i>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do trabalho .....</b>	<b>23</b>
<b>2</b>	<b>ESTÁGIO DO PROCESSO EROSIVO NO MUNDO E NO BRASIL .....</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Ambiente praial .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2</b>	<b>Estudos sobre a dinâmica costeira e variação da linha de costa na esfera mundial .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3</b>	<b>Estudos sobre a dinâmica costeira e variação da linha de costa no Brasil e no Estado do Ceará .....</b>	<b>30</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS TÉCNICOS E METODOLÓGICOS .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo .....</b>	<b>33</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais e Métodos .....</b>	<b>34</b>
<i>3.2.1</i>	<i>Materiais .....</i>	<i>34</i>
<i>3.2.2</i>	<i>Métodos .....</i>	<i>35</i>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA NO TRECHO ENTRE AS PRAIAS DE PEROBA E REDONDA NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ-CEARÁ, BRASIL, A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE APLICANDO O DSAS .....</b>	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>39</b>
<i>4.1.1</i>	<i>Caracterização da área de estudo .....</i>	<i>42</i>
<b>4.2</b>	<b>Material e métodos .....</b>	<b>45</b>
<i>4.2.1</i>	<i>Aquisição e processamento de imagens .....</i>	<i>45</i>
<i>4.2.2</i>	<i>Aplicação do Digital Shoreline Analysis System – DSAS .....</i>	<i>47</i>

4.3	<b>Resultados</b> .....	48
4.3.1	<i>Análise da variação da linha de costa entre 2005 e 2010</i> .....	48
4.3.2	<i>Análise da variação da linha de costa entre 2010 e 2015</i> .....	50
4.3.3	<i>Análise da variação da linha de costa entre 2015 e 2020</i> .....	52
4.3.4	<i>Análise da variação da linha de costa entre 2005 e 2020</i> .....	54
4.4	<b>Discussões</b> .....	57
4.5	<b>Conclusões</b> .....	61
5	<b>MUDANÇAS MORFOMÉTRICAS ENTRE AS PRAIAS DE PEROBA E REDONDA, REGIÃO DE ICAPUÍ-CEARÁ, BRASIL, APLICANDO IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA ENTRE 2020 E 2021</b> .....	69
5.1	<b>Introdução</b> .....	70
5.2	<b>Área de estudo</b> .....	72
5.2.1	<i>Localização da área de estudo</i> .....	72
5.2.2	<i>Dinâmica costeira local</i> .....	72
5.3	<b>Material e métodos</b> .....	73
5.3.1	<i>Aquisição de dados aerofotogramétricos</i> .....	73
5.3.2	<i>Processamento de dados aerofotogramétricos</i> .....	76
5.3.3	<i>Análise de mudança geomórfica</i> .....	77
5.3.4	<i>Mudança anual da linha de costa</i> .....	78
5.3.5	<i>Análise do tamanho do grão de sedimento</i> .....	79
5.4	<b>Resultados</b> .....	79
5.4.1	<i>Mudanças morfológicas no Setor 1 (Praia de Peroba)</i> .....	79
5.4.1.1	Variação do volume de sedimento .....	79
5.4.1.2	Variação da linha de costa entre agosto/2020 e agosto/2021 .....	83
5.4.1.3	Relação volume da praia com a dinâmica da linha de costa na praia de Peroba ....	84
5.4.2	<i>Mudanças morfológicas no Setor 2 (Praia de Redonda)</i> .....	87

5.4.2.1	Variação do volume de sedimento .....	87
5.4.2.2	Variação da linha de costa entre agosto/2020 e agosto/2021 .....	91
5.4.2.3	Relação volume da praia com a dinâmica da linha de costa na praia de Redonda	93
<b>5.4.3</b>	<b>Caracterização sedimentary .....</b>	<b>95</b>
<b>5.5</b>	<b>Discussão .....</b>	<b>98</b>
<b>5.6</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>100</b>
<b>6</b>	<b>VULNERABILIDADE COSTEIRA NO TRECHO ENTRE AS PRAIAS DE PEROBA E REDONDA NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ-CEARÁ, BRASIL ..</b>	<b>107</b>
<b>6.1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>108</b>
<b>6.2</b>	<b>Materiais e métodos .....</b>	<b>109</b>
<i>6.2.1</i>	<i>Área de estudo .....</i>	<i>109</i>
<i>6.2.2</i>	<i>Índice de vulnerabilidade costeira (IVC) .....</i>	<i>110</i>
<b>6.3</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>113</b>
<b>6.4</b>	<b>Discussão .....</b>	<b>117</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusões .....</b>	<b>120</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>125</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>128</b>

# 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

## 1.1 Introdução

Por milênios de forma lenta e sistemática o homem foi modificando a paisagem natural, erguendo vilas e cidades, construindo açudes ou pequenas barragens, desmatando florestas para a produção agrícola ou mesmo para o aproveitamento da madeira para manufatura de móveis e uso na construção de habitações, barcos, entre outros aproveitamentos. Com a explosão demográfica a partir do século XIX a intensificação do processo de urbanização e o aparecimento de novas tecnologias industriais aumentaram a demanda por recursos minerais e energéticos, que resultaram nas primeiras transformações antrópicas na geologia da terra, como a artificialização da linha de costa, reorientação de cursos fluviais e modificação da geomorfologia para a urbanização (SILVA, 2019). Isto fez com que rapidamente se partisse para grandes mudanças do ambiente costeiro no uso e ocupação do solo muitas vezes sem olhar para possíveis impactos ambientais negativos resultantes destas transformações, como a erosão costeira.

Zona costeira é uma pequena área estreita, sobrepondo o limite entre terra e mar, extremamente disputada pelos homens, por suas imensas riquezas ambientais provenientes de recursos marinhos e terrestres (ANDRADE, 2008). Os países localizados nas zonas costeiras gozam do privilégio de exploração dos recursos, quer vindo da terra ou do mar, facilidade de trocas comerciais através de transportes marítimo, disponibilidade de minérios associados a ambientes costeiros, oferta de diversas espécies marítimas para dieta alimentar do homem e elevado potencial turístico por conta das praias (ALFREDINE, 2005). O potencial natural das zonas costeiras aliado ao atrativo turístico pelas suas diversas praias, atrai um grande aglomerado populacional, em toda a esfera mundial. Cerca de 80% da população mundial reside em áreas costeiras (ANDRADE, 1998). No Brasil moram em zonas costeiras cerca de 70% da população (MUEHE, 2001).

Os ambientes costeiros caracterizam-se por frequentes mudanças tanto espaciais quanto temporais que resultam em uma variedade de feições geomorfológicas e geológicas originadas de uma complexa interação de processos deposicionais e erosivos relacionados com a ação de ondas normais quanto de tempestades, correntes de maré e correntes litorâneas, além de influências antrópicas que podem atingir proporções significativas, como modificação das paisagens naturais nessas áreas (SOUZA; SUGUIO, 2003; ROSSETTI, 2008). Nesse sentido, os fatores naturais e antrópicos interagem entre si o tempo todo no condicionamento da erosão costeira

(SOUZA *et al.*, 2005). Como forma de contornar a erosão a primeira solução que aparece é a construção de uma obra rígida (BASCO, 2004; MUEHE, 2013; GI-GERCO/CIRM, 2018).

Por mais que sejam edificadas estruturas de blindagem rígida, como paredes e revestimentos, como típicas respostas históricas à erosão costeira, estes não solucionam o problema, pois nenhum dos esforços passados ou presentes poderá proteger o desenvolvimento e infraestruturas da linha de costa contra danos causados por tempestades costeiras e recuo da linha de costa, ou seja, nenhuma obra será eficaz a longo prazo devido ao aumento do nível do mar (GRIGGS; PATSCH, 2019). Por enquanto o processo de engorda é tido como a melhor solução, dado a sucessivos insucessos com a construção de grandes paredes (BASCO, 2004; MUEHE, 2013; GI-GERCO/CIRM, 2018). Em grande escala os aterros proporcionam a criação de novos perfis topográficos e habitats (NORDSTROM, 2010).

Geralmente a erosão costeira é um problema que na maior parte tem assolado as grandes cidades e municípios litorâneos onde dia após dia vivem tentando gerenciar a crescente ocupação populacional, principalmente quando estas são submetidas a enfrentar problemas resultantes da danificação da costa (MUEHE, 2006; COSTA, 2019). Por exemplo, no município de Icapuí, área de estudo deste trabalho, sua orla marítima tem apresentado cenários distintos, algumas praias em estado progressivo de erosão e outras em acreção, observando-se de um modo global a variação da linha de costa em toda extensão municipal. Localmente a erosão costeira já é um problema, desde do ano 2005 já constituía preocupação no município de Icapuí, por gerar conflitos no seio das comunidades locais e colônias de pescadores bem como as resistências que as autoridades locais, encerravam das comunidades em relação a realocação das mesmas (BARROS, 2018). Processos erosivos verificam-se com maior intensidade entre as praias da Peroba, Redonda e Requenguela e deposição nas praias de Quitérias e Ponta Grossa. Uma reconstrução detalhada do problema de erosão no Icapuí pode ser encontrada no trabalho de Barros (2018).

As modificações morfológicas em curso no trecho de praia entre Peroba e Redonda, área estudada do município de Icapuí, são fortemente influenciadas pelo regime e dinâmica de marés, energia de ondas e pela topografia local que resultam em processos erosivos ou deposicionais na faixa de praia e a consequente progradação ou retrogradação da linha de costa. Apesar da ocorrência de processos erosivos em trechos localizados ao longo da linha de costa, o trecho praiado tem se mostrado resiliente as alterações ocorridas com o tempo na linha de costa. Os

métodos aplicados configuram-se eficazes na conjugação de diferentes dados espaciais, aerofotogramétricos, sedimentológicos e hidrodinâmicos para dar respostas sobre o nível de influência, dos agentes naturais e antrópicos, na evolução dos processos erosivos e deposicionais.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Geral**

Compreender os processos erosivos e deposicionais, através do estudo da variação da linha de costa a médio e a curto prazo, e da vulnerabilidade à erosão costeira das praias de Peroba e Redonda, Município de Icapuí/Ceará – Brasil, como forma de subsidiar o gerenciamento costeiro da região.

### **1.2.2 Específicos**

- a) Analisar a variação da linha de costa no trecho entre as praias de Peroba e de Redonda, no Município de Icapuí, com imagens de satélites, numa escala temporal entre 2005 e 2020, aplicando o uso da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS);
- b) Analisar a variação sazonal praial, através do cálculo do volume de sedimento mobilizado da praia e para praia, entre 2020 e 2021, usando produtos coletados com uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA);
- c) Caracterizar o processo sedimentar das praias de Peroba e Redonda, através de análise textural de sua granulometria com vista a entender os processos de erosão, transporte e sedimentação local entre agosto de 2020 e agosto de 2021;
- d) Mapear e quantificar áreas de vulnerabilidade relativa da costa susceptíveis às alterações físicas entre as praias de Peroba e Redonda, destacando os trechos de praia onde os efeitos na linha costa podem ser extremos.



### 1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é constituído por cinco capítulos. O primeiro capítulo é inerente as considerações iniciais, onde se faz uma breve contextualização do estudo, e são apresentados no final os objetivos.

No segundo capítulo é apresentado um panorama em volta da problemática de erosão costeira, trazendo alguns estudos desenvolvidos pelo Mundo, Brasil, Ceará e finalizando com trabalhos relacionados com a área de estudo (Icapuí).

O terceiro capítulo apresenta de uma forma geral a metodologia do trabalho.

O quarto capítulo corresponde a primeira parte dos resultados que corresponde ao artigo intitulado “Análise da Variação da Linha de Costa no Trecho entre as Praias de Peroba e Redonda no Município de Icapuí-Ceará, Brasil, a Partir de Imagens de Satélite Aplicando o DSAS”. O artigo teve como objetivo, analisar a variação da linha de costa no trecho entre as praias de Peroba e de Redonda, no Município de Icapuí, com recurso a imagens de satélites, numa escala temporal entre 2005 e 2020, aplicando o uso da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS). O artigo foi publicado na Revista de Geociências da UNESP, versão online, ISSN: 1980-900X, v.41, n.4, p.377–396, 2022, DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i04.16718>.

O quinto capítulo é referente a segunda parte dos resultados que corresponde ao artigo intitulado “Mudanças Morfométricas entre as Praias de Peroba e Redonda, Região de Icapuí-Ceará, Brasil, Aplicando Imagens de Alta Resolução Obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada entre 2020 e 2021”. O artigo teve como objetivo, (1) analisar a variação volumétrica sedimentar estimando a taxa de variação; (2) calcular as taxas de mobilidade da linha de costa; e (3) analisar a distribuição granulométrica dos sedimentos em função de seus parâmetros estatísticos. O artigo foi submetido para publicação a Revista Brasileira de Geomorfologia (versão submetida na língua inglesa).

O sexto capítulo é referente a terceira parte dos resultados que corresponde ao artigo intitulado “Vulnerabilidade Costeira no Trecho entre as Praias de Peroba e Redonda no Município de Icapuí-Ceará, Brasil”. O artigo teve como objetivo mapear áreas de vulnerabilidade costeira, calculando o IVC a partir de variáveis geomorfologia, declividade, taxa de variação da linha de costa, amplitude média de maré e altura significativa de onda. O artigo foi submetido à Revista de Geociências do Nordeste.

O sétimo capítulo faz menção às considerações finais do trabalho, fazendo um cruzamento entre os objetivos, a metodologia e os resultados.

## **2 ESTÁGIO DO PROCESSO EROSIVO NO MUNDO E NO BRASIL**

### **2.1 Ambiente praial**

Considera-se de ambiente praial, parte da zona costeira que formam uma interface entre o mar e a terra firme, e que se estende entre o limite mais baixo da maré e o limite superior no qual são sentidos os efeitos dinâmicos do movimento das ondas, que se situa em geral mais para a costa do que o nível da maré alta (ALFREDINI, 2005; MUEHE, 2013).

Segundo a legislação brasileira, definido através da lei 7.661/88 que instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), define praia como: “área coberta e descoberta periodicamente pelas águas, acrescida da faixa subsequente de material detrítico, tal como areias, cascalhos, seixos e pedregulhos, até o limite onde se inicie a vegetação natural, ou, em sua ausência, onde comece um outro ecossistema” (MMA, s.d).

Praias são áreas de depósito de sedimentos inconsolidados e não vegetados, geralmente constituído por granulometria areia (JESUS; ANDRADE; CONCEIÇÃO, 2018). As constantes mudanças que ocorrem nas praias são influenciadas por ações naturais e/ou antrópicas, que visivelmente são refletidas na linha de costa em processos erosivos ou deposicionais. A determinação taxa de variação da linha de costa (LC) e sua evolução é o procedimento mais comum encontrado no monitoramento de feições sedimentares costeiras (COSTA, 2019). Com isso, foi estabelecido como indicadores de linha de costa o limite entre a faixa de areia úmida e seca da praia na maré de sizígia, onde não existem marcos visíveis como base de falésias ativas, escarpas erosivas, base de estruturas de proteção costeira e área de vegetação de mangue.

A legislação brasileira estabeleceu a faixa terrestre interdita para ocupação a distância de 50 m da linha de costa, para áreas já ocupados, e até 200 m para áreas ainda não ocupadas (MMA, s.d.).

### **2.2 Estudos sobre a dinâmica costeira e variação da linha de costa na esfera mundial**

A Revolução Industrial iniciada na Inglaterra, em meados do século XVIII, que iniciou a transição da manufatura para a indústria mecânica, gerou aumento da produção e a ascensão de novas tecnologias, alterando modo de vida no planeta (POTT; ESTRELA, 2017). A população foi

crescendo e o nível de consumo também, e na tentativa de suprir a demanda do consumismo, não se levou em conta as questões ambientais causadas por ações antrópicas, e que influenciam nos processos geológicos, como é o caso de construções de portos e ferrovias. Dependendo do tipo de engenharia aplicada a cada construção portuária, ela pode ou não interferir no aporte de sedimentos, bem como a atividade de dragagem, para casos de portos de águas não profundas.

Três séculos desde da Revolução Industrial, porém naquele tempo não se observava as questões ambientais, a partir do final da década de 1960 e início da década de 1970 começou-se a dar atenção para os problemas ambientais. Anteriormente, alguns episódios demonstravam a influência do crescimento desordenado na vida da população, saúde e do meio ambiente, tidos como mal necessário para o progresso, Goldemberg e Barbosa (2004 *apud* POTT; ESTRELA, 2017). Com os problemas ambientais que foram surgindo ao longo deste período de desenvolvimento, desde do início da revolução industrial, o homem passou a preocupar-se com os impactos negativos causados ao ambiente, com vista a pautar por um desenvolvimento sustentável, foram surgindo estudos de âmbito ambientais e geoambientais ligados a questões de erosão costeira, em que, nos últimos anos tem se utilizado de geotecnologias.

Trabalhos clássicos desenvolvidos por Samsuddin e Suchindan (1987) relataram forte relação da intensidade das correntes longitudinais as taxas de erosão e acreção na costa norte de Kerala, Índia, como diretamente relacionadas a quebra de ondas na linha de costa, onde deposições foram influenciadas por correntes vindas do Norte, a erosão pela transição com a inversão da direção influenciada pela corrente vinda do Sul.

Stumpf (1988) no início de 1979 conjugou o uso de imagens Landsat e observações em campo na análise de fortes deposições que ocorreram ao longo da Baía de Chesapeake e nos estuários dos rios Susquehanna e Potomac, onde os resultados observados com as imagens de satélite bem como de observações em campo, mostraram que os a concentração de sedimentos em suspensão vinda dos rios era a principal fonte na origem das altas taxas de deposições ao longo da Baía, o que conseqüentemente ocasionava avanços na linha de costa.

Estudos desenvolvidos por Vasseur e Hequette (2000) comparando fotografias aéreas de dunas costeiras erodidas localizadas entre Dunkerque (Norte da França) e a fronteira com a Bélgica, revelou que a taxa de recuo da frente de dunas aumentou entre 1957 e 1988. Analisados os níveis de variação de água, a cada hora, por meio de dados de maré de Dunkerque Harbor, mostraram um aumento de níveis de água associados a frequência de tempestades durante o mesmo

período, concluindo que a erosão tinha como principal causa, as fortes tempestades provocadas por ventos vindo do Nordeste, que poderiam ser devido as oscilações cíclicas das condições de tempestades no Atlântico Norte.

Apesar dos estudos desenvolvidos na esfera mundial, inerentes a processos costeiros, de acordo com Florenzano (2008) foi a partir da década de 1960, que estudos desta natureza, passaram a ter mais ênfase, com o lançamento do primeiro satélite meteorológico, lançado pelos Estados Unidos em 1 de abril de 1960, que em 1972, foi lançado o satélite de recurso terrestre (de observação da terra), ERTS-1 (*Earth Land Resources*), mais tarde denominado por Landsat-1 desde então iniciou a disponibilização das cenas aéreas a partir de imagens de satélites que permitiram o começo de estudos detalhados, sobre a variação da linha de costa ao longo do tempo (processo de regressão e transgressão).

Dados indicando mudanças nas linhas de costa, remontam desde meados de 1800, na costa da Florida nos EUA, estendendo-se até os anos 1970. É a única nos EUA e, talvez, no mundo, com milhares de medições de mudança de linha de costa com malha amostral de 300 m, período antes de grandes influências antropogênicas, como projetos de nutrição de praia ou construção de diferentes estruturas, disposição de sedimentos dragados no mar, os resultados indicam que a costa como um todo, teve uma linha de costa que avançou em meados de 1800, apesar do aumento do nível do mar e das grandes perdas de areia do sistema litoral devido o descarte *offshore* de área, alimentação de praia com areia que chega na Florida através de transporte marítimo da Geórgia, sendo esta, a principal causa do avanço da linha de costa da costa leste de Florida (HOUSTON; DEAN, 2014; HOUSTON, 2015 & HOUSTON, 2017).

Estudo similar foi desenvolvido por Martínez *et al.* (2014) ao longo da baía de Matanchén, San Blas, Nayarit, México, com vista a aferir as principais causas da erosão costeira ao longo da baía e nos arredores, numa escala temporal de 24 anos, de 1986 a 2013, recorrendo-se a posição histórica da linha de costa, obtida a partir de imagens Landsat, tendo sido identificados, que a elevada taxa de erosão no período em análise, que resultaram no recuo da linha de costa cerca de 380 m, estarem diretamente ligadas as modificações antrópicas ao longo da baía e arredores, devido a construção de um sistema hidroelétrico, novas infraestruturas de transporte, estabelecimentos turísticos, um porto e várias obras de dragagem no porto existente na área.

Islam *et al.* (2014) e Baig *et al.* (2020), recorreram a histórico de cenas Landsat, de intervalos temporais de 42 e 27 anos respectivamente, onde com base na ferramenta DSAS

aplicaram acima de dois parâmetros estatístico onde calcularam a variação da linha de costa na ilha de Kutubdia, sudeste de Bangladesh e no distrito de Vishakhpatnam, costa leste de Índia, ambos estudos associaram a influência da atividade antrópica e naturais aos processos erosivos e deposicionais.

Del Río *et al.* (2016) em seus estudos realizados no El Almirante na Espanha, combinaram técnicas fotogramétricas com levantamentos em campo, onde avaliaram processos erosivos de falésias numa escala temporal de 1956 e 2013. Os resultados encontrados, indicaram que a linha de costa, passou por uma ligeira alteração no setor ocidental, mantendo-se estável, enquanto que os setores central e oriental, sofreram uma erosão notável entre 1956 e 2010, em que as taxas médias de retirada de sedimentos no topo da falésia, variou entre 0,8 a 1,6 m/ano, voltando a aumentar na última década em alguns pontos, em termos absolutos, em certos pontos, o topo da falésia recuou mais de 60 m. Em que as altas taxas a leste, por exemplo de Punta Huete, a erosão das falésias está relacionada à deslizamento de terra, afetando cerca de 120 m de costa, fazendo uma área total de 7.250 m<sup>2</sup>, o que em certos pontos cria um risco considerável para atividades e infraestrutura humanas.

Estudo de avaliação da dinâmica das ondas e o transporte de sedimentos ao longo da costa de Accra, no Gana, comparando os resultados com a tendência da erosão costeira, em que foram analisados os dados de ondas do modelo global de ondas da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e os dados medidos das ondas de boia, bem como o transporte potencial de sedimentos usando a equação do CERC, a altura média significativa estimada das ondas foi de 1,40 m e o período foi de 10 a 15 segundos. A taxa potencial de transporte de sedimentos foi entre 4,1 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/ano e 4,1 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>/ano, enquanto a taxa de erosão costeira foi de 1,13 m/ano, chegando à conclusão que, a taxa potencial de transporte de sedimentos aumenta de oeste para leste (APPEANING ADDO, 2018).

Estudos aplicaram a ferramenta DSAS no monitoramento da taxa de mudança de múltiplas posições históricas da linha do banco de mangues, Thinh e Hens (2017), através do parâmetro EPR identificaram incremento global na área de mangues em cerca de 2.487 hectares entre 2005-2014, na área costeira de Giao Thuy, na província de Nam Dinh, Vietnã, as taxas médias de degradação calculada foi de 1,41 m/ano e de crescimento foi de 1,26 m/ano. Anam *et al.* (2021), aplicaram a ferramenta em área de mangue ao longo da foz do rio Bidyadhari sudeste de

Bangladesh, área frequentemente afetada por inundações, onde resultados encontrados apontaram para a prevalência de processos erosivos entre 2008-2013.

Puig, *et al.* (2014); Randazzo, *et al.* (2014); Kuc Castilla, *at al.* (2019) e Nagdee *et al.* (2020) estudaram a variação da linha de costa, baseado na influência da tempestade, concluíram que as taxas são maiores no período de passagem da tempestade mas elas são temporárias, em tempo bom pouco tempo depois a praia recupera-se da perda de sedimento, por esta razão, não podia ser consideradas como a principal causa de retração da linha de costa, uma vez que a erosão, muitas vezes é influenciada pela característica dos ventos locais ao longo de todo o ano, dependência de suprimento de sedimentos dos rios e de intervenções humanas, como construção urbana e estruturas de engenharia. Ação de ondas normais combinadas com ondas de tempestades deu origem a escarpas erosivas de 1 a 1,50 m tendo ocasionado o recuo da linha de costa em cerca de 6 a 8 m e a deslocação de volume de areia até 40 m para interior *onshore* em Anegada, Ilhas Virgens Britânicas onde levantamentos realizados 18 meses revelaram a recuperação natural da costa de Anegada (SPISKE *et al.*, 2022).

Em 35 anos, o trecho costeiro com cerca de 73 quilômetros, entre a fronteira de Kuwait com Arábia Saudita, a taxa máxima de erosão foi de -9,73 m/ano, a maior acreção foi de 10,88 m/ano (ALADWANI, 2022). Monitoramento aplicando DSAS, constatou que com a construção do promontório de Rosetta e o porto de pesca de El Burullus no trecho de cerca de 58 km ao longo do Delta do Nilo, Egito, a taxa de erosão de cerca de -121 m/ano foi transferida em direção a leste onde num trecho de cerca de 3 km foram registrados erosão em cerca de -64 m/ano, para conter a erosão na área, foram construídas o total de cinco virilhas que reduziu a erosão para -45 m/ano, tendo com isso sido construído sucessivas estrutura (SANHORY *et al.*, 2022).

Atualmente é comum o emprego de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs) na obtenção de dados aerofotogramétricos de área menores, para monitorar e analisar os processos erosivos e deposicionais, como a variação da linha de costa, variação do volume de sedimentos e outras mudanças morfológicas a curto prazo, a citar Chen *et al.* (2018), Dai *et al.* (2018), Jaud *et al.* (2019), Jayson-Quashigah *et al.* (2019), Pagán *et al.* (2019), Pitman *et al.* (2019), Laporte-Fauret *et al.* (2019), Eichmanns e Schüttrumpf (2021).

### **2.3 Estudos sobre a dinâmica costeira e variação da linha de costa no Brasil e no Estado do Ceará**

Nicolodi (2002) estudou a morfodinâmica praial com objetivo de fornecer subsídio ao gerenciamento costeiro na praia de Fora, no Parque Estadual de Itapuã, no Rio Grande do Sul, aplicando os modelos de perfil de equilíbrio de Dean, modelo de transporte longitudinal dos sedimentos na zona de surfe, modelo do sentido preferencial de transporte perpendicular e a análise temporal da variação da linha de praia de Fora no período entre 1978 e 2001, tendo encontrado resultados que indicavam uma variação da largura da face de praia de até 16 m e uma declividade de 2,8° a 11,3°.

Savi (2007) e seu estudo sobre erosão costeira como implicação morfológica causada pela construção de um quebra-mar para a proteção de embarcações no Porto do Forno, Enseada dos Anjos, Arraial do Cabo, no Rio de Janeiro, visando entender o processo de erosão e acreção ocasionados pelo quebra-mar, baseados na análise de fotos aéreas, cartas náuticas, estudos de perfis de praia, análise da variação da linha de costa em diferentes períodos, concluiu-se que o quebra mar alterou vários processos naturais, como a distribuição de energia de ondas, a dinâmica da sedimentação pelos perfis de praia, causando por conseguinte processos localizados de erosão e acreção.

Amaro *et al.* (2015) usaram imagens de satélite de múltiplas resoluções, onde estudaram os efeitos de curto e longo prazo das mudanças ocorridas na linha de costa da praia de Ponta Negra, no Estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil, entre 1973 e 2012, da análise dos processos que controlam a erosão horizontal e vertical persistente na praia, constataram para o período entre 1973 e 1986 progradação da linha de costa a taxa de 4,2 m/ano e retrogradação em cerca de -3,7 m/ano e para o período entre 1986 e 2012 a taxa média de erosão encontrada foi estimada em cerca de 1,5 m/ano. Os mesmos autores ressaltaram as atividades antrópicas associadas a crescente ocupação do solo costeiro como um dos fatores que tem impulsionado bastante no processo erosivo local. Prudêncio, Amaro e Scudelari (2019) analisaram a variação da linha de costa entre as praias de Jacacunã e Muriú no Rio Grande do Norte, no período de 30 anos, obtiveram resultados similares com o primeiro período (entre 1984 e 1994) marcado por episódio de erosão, segundo período (entre 1994 e 2004) por deposição e o terceiro período (entre 2004 e



2014) por erosão, o intervalo geral entre 1984 e 2014, foi marcado por estabilidade com tendências erosiva.

Albuquerque, *et al.* (2018a) caracterizaram os impactos do ciclone extratropical no extremo sul do Brasil, ocorridos em 26 e 27 de outubro de 2016, buscando uma relação entre este evento e os recentes episódios erosivos, usando imagens de satélite e dados obtidos por RPA tendo rastreado o comportamento da linha costa em intervalos de tempo onde a linha de costa apresentou sinais de retração da costa em 5,91 m, podendo ter sido favorecido pelos ventos que se deslocam na direção SW a uma velocidade de 17,9 m/s associado a aspectos antropogênicos, como construções e destruição de dunas, após a passagem do ciclone e a destruição em cerca 65% das estruturas de proteção costeira.

O monitoramento da linha de costa, constitui como indicador da dinâmica costeira, estudos feitos por Ximenes *et al.* (2013) aplicaram o método de polígono de mudança, inerente a análise multitemporal da linha de costa para avaliação da evolução costeira na região de Icapuí-CE, Nordeste brasileiro, no período de 1984 a 2011, subdivididos em três intervalos de temporais, com períodos de nove anos cada, concluíram para área estudada (praia da Ponta Grossa e Barra Grande), que o balanço sedimentar foi positivo, devido a influência da deriva litorânea orientada de Leste para Oeste e que a barra arenosa da Barra Grande migrou mais de 1300 m num intervalo de 27 anos.

Marino e Freire (2013) aplicaram o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) na análise da evolução da linha de costa no litoral leste da Regia Metropolitana de Fortaleza (RMF). Moura (2018) estudou a praia de Parajuru, Ceará. Ambos os autores ressaltaram que o equilíbrio dinâmico costeiro desta região como sendo fortemente influenciados pela atividade antrópica por meio de implantação de infraestruturas urbanas que geram impactos negativos na supressão de sedimentos que alimentavam as praias.

Estudos realizados por Mororó, *et al.* (2015) em torno de análise de 22 anos da evolução costeira para a porção do litoral cearense, a oeste da cidade de Fortaleza, a partir de históricos de imagens de satélite, da série Landsat, em que o foco eram as praias de Cumbuco, Icaraí, Pacheco e Iparana mostraram que na área estudada o balanço sedimentar total no período analisado foi negativo, em que processos erosivos intensos encontram-se distribuídos por todo trecho de costa estudado, principalmente nas praias do Icaraí e Pacheco, mesmo com as obras de

defesa de proteção costeira construídas visando cessar os fenômenos erosivos, a linha de costa, continuou a recuar em média de 5,61 m/ano.

Souza *et al.* (2016) utilizando métodos indiretos baseados no uso do SIG e na constatação de processos geoambientais, para determinar a evolução da linha de costa do Município de Icapuí, no trecho entre as praias de Ponta Grossa e Retiro Grande, entre o período de 2004 e 2014, os resultados mostram perdas de sedimentos (erosão), caracterizado por recuo da linha de costa na praia do Retiro Grande e na praia de Ponta Grossa, o cenário é caracterizado por processo deposicional e à progradação da linha de costa.

Estudo similar foi desenvolvido por Silva Neto *et al.* (2020) ao longo de todo litoral da costa do município de Icapuí, usando as técnicas de *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), com base em imagens Landsat de uma série temporal de 30 anos, onde seus resultados indicaram que a área mais para o oeste da costa de Icapuí, compreendida pela praia de Ponta Grossa, é a que apresenta a maior variação da linha de costa, decorrido de processo contínuos de deposição de sedimentos, resultando no fenômeno de progradação da linha de costa neste trecho.

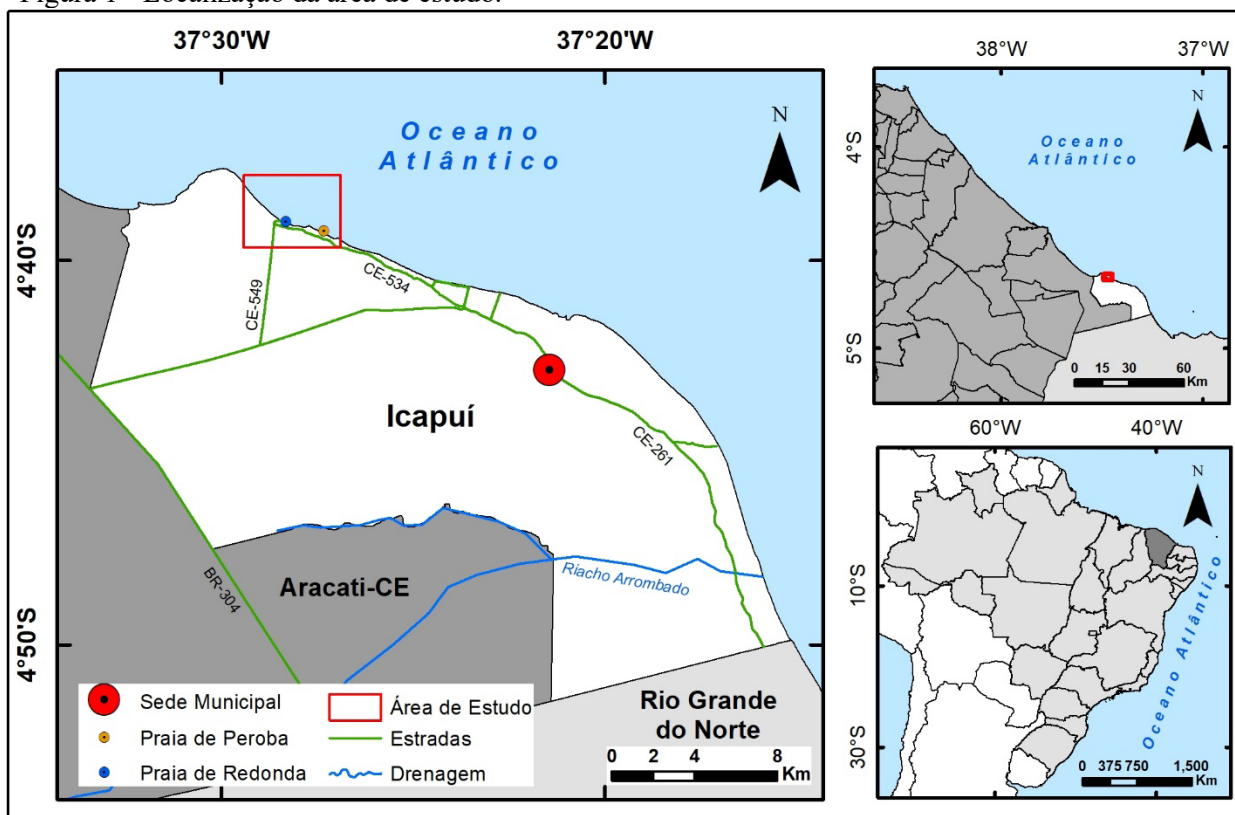
Vários estudos foram realizados ao longo do litoral costeiro do município de Icapuí, Souza *et al.* (2016); Barros (2018) e Costa (2019) inerente a dinâmica costeira, aplicando a técnica de *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) para analisar os processos de erosão/acreção por meio da variação da linha de costa, usando as imagens do satélite Landsat, por conta da abrangência de toda linha de costa do território do município. Este trabalho, por sua vez, confina-se apenas a duas praias do município, com vista a trazer um detalhamento mais apurado, usando imagens de satélite de média resolução (imagens do satélite *RapidEye* e *CBERS*).

### 3 PROCEDIMENTOS TÉCNICOS E METODOLÓGICOS

#### 3.1 Área de estudo

O município de Icapuí está situado no extremo leste do estado do Ceará, entre as latitudes  $4^{\circ}37'40''\text{S}$  e  $4^{\circ}51'18''\text{S}$  e longitudes  $37^{\circ}15'30''\text{W}$  e  $37^{\circ}33'44''\text{W}$  (Figura 1) fazendo fronteira com o estado do Rio Grande do Norte e, no Ceará, com o Município de Aracati, de onde foi desmembrado em 15 de Janeiro de 1985, por meio do Decreto Lei 11.003/1985 (MEIRELES; SOUZA; LIMA, 2016). O acesso ao município de Icapuí, é realizado pelas estradas CE-040, BR-304, CE-261 e CE-240. O litoral do município é constituído por 14 praias e está organizado administrativamente em três distritos: Icapuí (sede municipal), Ibicutaba e Manibu (BARROS, 2018).

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Autor. Elaborado com base em dados cartográficos do IBGE e IPECE.

O contexto geológico do município de Icapuí, está inserido no domínio da Bacia de Pontiguar, que vem desde do estado nordestino do Rio Grande do Norte até ao estado do Ceará, limitando-se no extremo oeste com a Cidade de Fortaleza e o extremo leste com Touros. A geomorfologia regional, engloba o Tabuleiro Pré-litorâneo e a Planície litorânea, em que as planícies litorâneas englobam as praias, dunas, lagoas costeira e interdunares, sistema estuarino-lagunar e os terraços marinhos, enquanto que o tabuleiro pré-litorâneo, agrega grande parte do território de Icapuí, estendendo-se nas regiões adjacentes à costa onde, em algumas áreas, está coberto por antigas dunas, limitado interiormente por falésias mortas e por falésias vivas quando alcançam o litoral (MEIRELES; SANTOS, 2012).

De acordo com relatório do SEMACE (2016), o Município de Icapuí possui uma área cerca de 423,448 km<sup>2</sup>. O município tem uma população estimada em 2021, cerca de 20.183 habitantes (IBGE, 2021).

## 3.2 Materiais e Métodos

### 3.2.1 *Materiais*

Para materializar a pesquisa foram necessários os seguintes recursos materiais e tecnológicos:

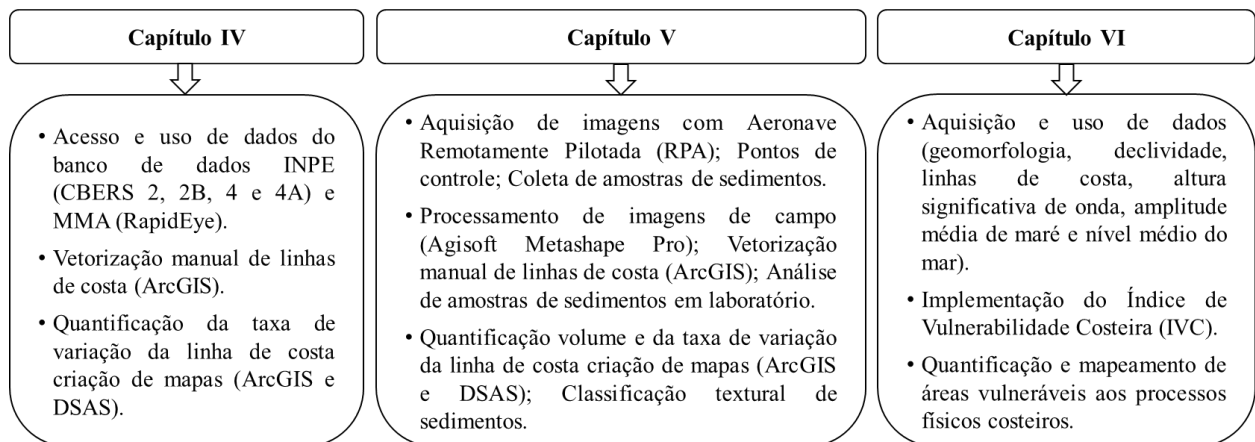
- a) Imagens de satélite da área de estudo, obtidas a partir do site do Ministério do Meio Ambiente – MMA (imagens RapidEye entre os anos 2012 e 2015) e do Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE (imagens entre 2005 e 2010 e entre 2016 e 2020).
- b) *Softwares* ArcGIS® 10.8.2 da ESRI, QGIS 3.10.8; Agisoft Metashape Pro e Map Pilot.
- c) Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) - DJI Mavic 2 Pro.
- d) *Global Navigation Satellite System* (GNSS), usado na coleta de pontos de controle
- e) Imagens aéreas obtidas em campo a partir de Aeronave Remotamente Pilotada entre agosto de 2020 e agosto de 2021.
- f) Amostras de Sedimentos, coletadas em campo no período entre agosto de 2020 e agosto de 2021 (102 amostras).
- g) Arquivos vetoriais IBGE e IPECE.

- h) Dados de maré foram obtidas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e de altura significativa de onda é do modelo global Wavewatch III, disponível no site da Surf guru.
- i) Nível médio do mar foi baseado nas projeções do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC).

### 3.2.2 Métodos

O trabalho consistiu em três principais partes conforme representado no fluxograma abaixo (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor.

As imagens foram georreferenciadas em ambiente SIG através do *software* ArcGIS 10.8 ajustadas ao sistema de coordenadas SIRGAS 2000-UTM-Zone 24S. No mesmo ambiente foram vetorizadas manualmente linhas de costa para todo intervalo temporal de 2005 a 2020, a diferença da cor dos pixels marcadas nas imagens como feições de continente e oceano foram usados como referência na vetorização. No final foi aplicado a ferramenta *Digital Shoreline Analysis System 5.0* (DSAS) para analisar a variação da linha de costa onde foram aplicados os parâmetros estatísticos *End Point Rate* (EPR), *Linear Regression Rate* (LRR) e *Net Shoreline Movement* (NSM) para calcular as taxas de variação e o movimento líquido da linha de costa.

Na sequência consistiu no processamento, análise e interpretação de dados coletados em campo, como dados aerofotogramétricos, pontos de controle no solo, e sedimentos praias. Os dados aerofotogramétricos foram pré-processados no *software* Agisoft Metashape Pro onde foram gerados os Modelos Digitais de Elevação (DEMs) e Ortomosaicos. Posteriormente foram transferidos para o ambiente SIG, onde com base nos DEMs calculou-se a variação do volume de sedimentos e com os ortomosaicos foram manualmente vetorizadas linhas de costa, seguindo como indicadores a diferença da faixa úmida/seca, base de estrutura proteção costeira, base de falésias ativas e escarpas erosivas. Em seguida aplicou-se o DSAS 5.0 onde foram calculadas as taxas de variação anual da linha de costa.

Dados pontuais coletados com GNSS foram ajustados conforme o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e serviram como pontos de controle para georreferenciar as ortofotos no sentido de obter uma melhor a acurácia dos produtos gerados com os dados coletados com RPA.

Em campo foram coletadas o total de 102 amostras superficiais de sedimentos distribuídos entre a zona de antepraia, praia e retropraia. As amostras foram analisadas no Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada (LGMA) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará. Amostras brutas foram postas a secar em uma estufa a temperatura de 60° C por um período de 48 horas. Secas, as amostras passaram pelo processo de quarteamento e homogeneização, tendo sido separadas e pesadas 100 g como amostra inicial, que em seguida passaram pelo peneiramento úmido, onde foi usada a peneira de 0.062 mm para separar as frações grossas dos finos (sedimentos lamosos). Após a separação as frações grossas voltaram a estufa por 24 horas. No peneiramento seco as amostras foram submetidas em baterias de peneiras fixas sobre um rotor mecânico onde foram peneiradas por 10 min com base nas peneiras de 2,000, 1,000, 0,500, 0,250, 0,125 e 0,062 mm segundo os limites texturais estabelecido por Wentworth (1922). Os resultados da granulometria, foram inseridos no *software* ANASED, disponível no LGMA, onde os sedimentos foram classificados segundo o diagrama triangular de Shepard (1954). A análise estatística foi baseada no modelo tradicional de distribuição de Folk e Ward (1957).

A implementação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), foi baseado da expressão proposta por Denner *et al.* (2015) e Mutmainah (2022), que consistiu no somatório dos produtos das variáveis pelo seu peso (valor de risco que a variável exerce sobre a costa). Inicialmente foram calculados os IVC individuais para seis variáveis físicas naturais: Geomorfologia, declividade da costa, variação da linha de costa, altura significativa de onda,

amplitude média de maré e nível médio do mar. No final foram representados em gráficos e mapas o nível e as áreas vulneráveis ao longo do trecho analisado.

#### **4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA LINHA DE COSTA NO TRECHO ENTRE AS PRAIAS DE PEROBA E REDONDA NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ-CEARÁ, BRASIL, A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE APLICANDO O DSAS**

#### **ANALYSIS OF THE SHORELINE VARIATION IN THE AREA BETWEEN PEROBA AND REDONDA'S BEACHES IN ICAPUÍ-CEARÁ, BRAZIL, BASED ON SATELLITE IMAGES USING DSAS**

#### **RESUMO**

A zona costeira do município de Icapuí, Estado do Ceará, é composta por praias arenosas, falésias, dunas e uma extensa planície de maré. Estas áreas são altamente dinâmicas por conta de sua interação com mar, terra e atmosfera, podendo ocorrer processos de erosão ou deposição. Perdas constantes de sedimentos, sobretudo em praias urbanizadas, constituem problemas que têm sido alvo de estudos empregando diferentes métodos e ferramentas, para entender a dinâmica costeira, seja a curto, médio e longo prazo. O entendimento da variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda em Icapuí, baseou-se em imagens de satélites, numa escala temporal entre 2005 e 2020, aplicando o método *Digital Shoreline Analysis System*. Os resultados indicaram que entre 2005 e 2010 a linha de costa apresentava-se estável em 54,35% e retrogradou 45,65%. Entre 2010 e 2015 manteve-se estável em 64,62%, tendo progredido 35,38%. Entre 2015 e 2020 a estabilidade reduziu para 30,83% com retrogradação cerca de 69,17%. Os valores fornecidos pela Taxa do Ponto Final e Regressão Linear entre 2005 e 2020,  $-0.54 \pm 0.37$  e  $-0.47 \pm 0.37$  m/ano respectivamente, indicam que a linha de costa permaneceu estável em cerca de 82,81% (4.200 m) e 84,98% (4.310 m).

**Palavras chaves:** erosão costeira; acreção; retrogradação; progradação.

#### **ABSTRACT**

The municipality's coastal zone of Icapuí - CE is made up of sandy beaches, cliff formations, dunes, and a vast stretch of marshes. Due to their interactions with water, land, and air, these regions are highly active; erosion or deposition may occur as a result of these interactions. Constant losses of sediments, especially in urbanized areas, are a concern that has been the focus of study using various methods and tools to understand coastal dynamics, both short, medium, and long term. The understanding of the change in the shoreline between Peroba and Redonda beaches in Icapuí, based on satellite images, was obtained using Digital Shoreline Analysis System at a time scale ranging from 2005 to 2020. According to the results, from 2005 to 2010, the coast line trended stably at 54.35 percent and regressed by 45.65 percent. Between 2010 and 2015, it stayed constant



at 64.62 percent before progressing by 35.38% between 2015 and 2020. The stability of the line decreased to 30.83 percent with a regression of 69.17% between 2015 and 2020. The data provided by the Taxa do Ponto Final and Linear Regressions between 2005 and 2020, -0.54 and -0.47 mm/year respectively, indicate that the coastline line remained relatively stable at about 82.81% (4.200 m) and 84.98% (4.310 m).

**Keywords:** coastal erosion; accretion; retrogradation; progradation.

#### 4.1 Introdução

A zona costeira é um ambiente dinâmico, complexo e caracterizado pela interação do ar, do mar e da terra, que compreende os recursos renováveis e não renováveis e envolve uma faixa marítima e outra terrestre (MMA, s.d.). Mudanças rápidas e contínuas em diferentes escalas espaciais e temporais acontecem em todas zonas costeiras a nível mundial, sobretudo em costas arenosas (DEL RÍO *et al.*, 2012). Esta região geralmente é caracterizada como bastante vulnerável devido à frequente ocorrência de destruição de propriedades ou estradas próximas à praia após um evento de tempestade (MUEHE, 2013).

As zonas costeiras são áreas apreciáveis e muito procuradas em toda a esfera mundial devido aos seus recursos naturais, facilidade de trocas comerciais por conta da navegação e prática de turismo por conta de sua paisagem (ALFREDINI, 2005). Cerca de um terço da população mundial reside no raio de 100 km da costa (SHETTY *et al.*, 2015). No Brasil, cerca de 70% de sua população está localizada na zona costeira (MUEHE, 2006). No Estado do Ceará, cerca de 51% da população mora nesta região (IBGE, 2015). O Ceará possui cerca de 573 km de linha de costa, composta principalmente por praias arenosas, campos de dunas, estuários com manguezais, lagoas costeiras, falésias e tabuleiros litorâneos (SEMACE, 2006).

O grande aglomerado populacional de que a zona costeira se dispõe vai crescendo dia-pós-dia, favorecendo uma crescente valorização do solo costeiro. A preferência em implantar moradias à beira mar muitas vezes tem contribuído na degradação do ambiente costeiro, como alterações nos corpos de água (rios), impermeabilização de dunas com construções, obras de proteção costeira sem planejamento adequado, ocasionando mudanças morfológicas negativas no litoral, como o surgimento de processos erosivos, e impactos ambientais. Em áreas costeiras altamente urbanizadas e com projetos de desenvolvimento estabelecidos, os riscos associados à ocorrência de processos erosivos tornam-se altamente críticos por conta do elevado valor

econômico agregado das infraestruturas existentes nessas regiões (MUEHE, 1998; 2013; SHETTY *et al.*, 2015). Muitas obras de proteção nem sempre resolvem o problema da erosão costeira, e algumas chegam a agravar o problema devido ao aumento da reflexão e refração das ondas sobre as obras (PILARCZYK, 1990).

As mudanças na posição da linha de costa e na topografia da praia têm sido as que facilmente evidenciam a ocorrência do fenômeno de erosão/deposição (DEL RÍO *et al.*, 2012). Numa escala de décadas os fatores influenciadores de mudanças em zonas costeiras se tornam mais complexos e estão todos inter-relacionados, quer seja de origem natural ou antropogênica, tornando difícil de prever a evolução da linha de costa (ESTEVES; FINKL, 1998; DEL RÍO *et al.*, 2012; ALMONACID-CABALLER *et al.*, 2015). No geral, os processos morfodinâmicos de todas as praias naturais são influenciados por ondas e marés e outros processos oceanográficos, como por exemplo, eventos de tempestades que podem causar inundações e a erosão costeira (MASSELINK; SHORT, 1993; MASSELINK *et al.*, 2016).

O fenômeno da erosão costeira tem assolado grandes cidades e municípios litorâneos que precisam gerenciar a crescente ocupação populacional, principalmente quando são submetidos a enfrentar problemas resultantes da destruição da costa (MUEHE, 2006; COSTA, 2019). As ameaças e destruições resultantes dos efeitos da erosão obrigam muitas vezes os gestores a tomarem contramedidas, que por vezes resultam de pressão da sociedade, ou ainda que são tomadas sem algum plano de gerenciamento costeiro (GRAAFF; KOSTER, 1990).

No gerenciamento costeiro é necessário que se dê atenção na determinação da posição da linha de costa e sua evolução ao longo do tempo. Este procedimento é o mais comum encontrado no monitoramento costeiro e tem sido a base de muitos estudos para monitoramento da dinâmica de feições sedimentares costeiras (COSTA, 2019). As taxas de variação da linha de costa são os melhores marcadores dos índices de erosão, quando estes atingem estágios avançados por serem mais explícitos e confiáveis quando comparados com uma simples avaliação de áreas perdidas (MACÊDO, 2011). Nas praias de Peroba e Redonda a maior concentração da população local e, conseqüentemente, das infraestruturas está na estreita faixa entre a base de falésias e linha de costa. O assentamento desordenado da retropraia e dunas frontais favoreceu a perda de sedimentos e, por conseguinte, deu origem a problemas de erosão costeira (CÂMARA; RODRIGUES DA SILVA, 2021).

Levando em consideração o contexto, este trabalho identificou a variação da linha de costa no trecho entre as praias de Peroba e Redonda, localizadas no município de Icapuí, extremo leste do litoral do estado do Ceará, através da análise de imagens de sensores orbitais no intervalo entre os anos de 2005 e 2020, utilizando a ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) e avaliando as possíveis causas desta variação.

Vários são os estudos de dinâmica costeira que recorrem à análise da evolução da linha de costa utilizando imagens de sensores remotos e aplicando o *Digital Shoreline Analysis System*. Del Río *et al.* (2012), por exemplo, estudaram a evolução da costa espanhola analisando como a morfologia das praias influenciavam nos processos de erosão/acreção. Aiello *et al.* (2013) analisaram as mudanças da linha de costa a curto e a longo prazo do litoral de Jonian, Itália. Jayson-Quashigah *et al.* (2013) analisaram a mudança de posição da linha de costa aplicando imagens de satélite na costa oriental de Ghana. Delgadillo-Calzadilla *et al.* (2014) avaliaram os processos erosivos usando uma série de imagens Landsat entre 1972 e 1993, da praia de San Chiapas, México. Zhang *et al.* (2014) usaram imagens de alta resolução para a análise de mudanças costeiras nas ilhas Zhoushan, China. Garrote *et al.* (2018) analisaram a evolução histórica de sistemas de dunas e praias da Catabria, norte da Espanha entre 1956 e 2017. Processos erosivos foram associados à passagem de tempestades (PUIG, *et al.*, 2014; RANDAZZO, *et al.*, 2014; NAGDEE *et al.*, 2020).

No Brasil, a ferramenta DSAS tem sido amplamente utilizada em estudos de monitoramento costeiro. Albuquerque *et al.* (2013) determinaram processos de erosão na praia de Hermenegildo, no extremo sul do Estado do Rio Grande do Sul. No Ceará, Marino e Freire (2013), analisaram o comportamento da linha de costa no litoral leste da Região Metropolitana de Fortaleza, usando imagens de satélite e fotografias aéreas. Mororó *et al.* (2015) analisaram a evolução da linha de costa nas praias de Icaraí, Pacheco e Tabuba, identificando áreas de erosão, acreção e estabilidade, também por meio de dados históricos de sensores remotos. Moura (2018) e Teixeira *et al.* (2021) aplicaram o DSAS na análise da evolução costeira no município de Beberibe, entre 1979-2016 na praia de Parajuru e entre 1979-2019 em toda extensão do litoral do município, respectivamente. Ambas as abordagens destacaram de uma forma geral o domínio de processos erosivos, com deposições associadas a formações de esporões arenosos junto à desembocadura do rio Pirangi.

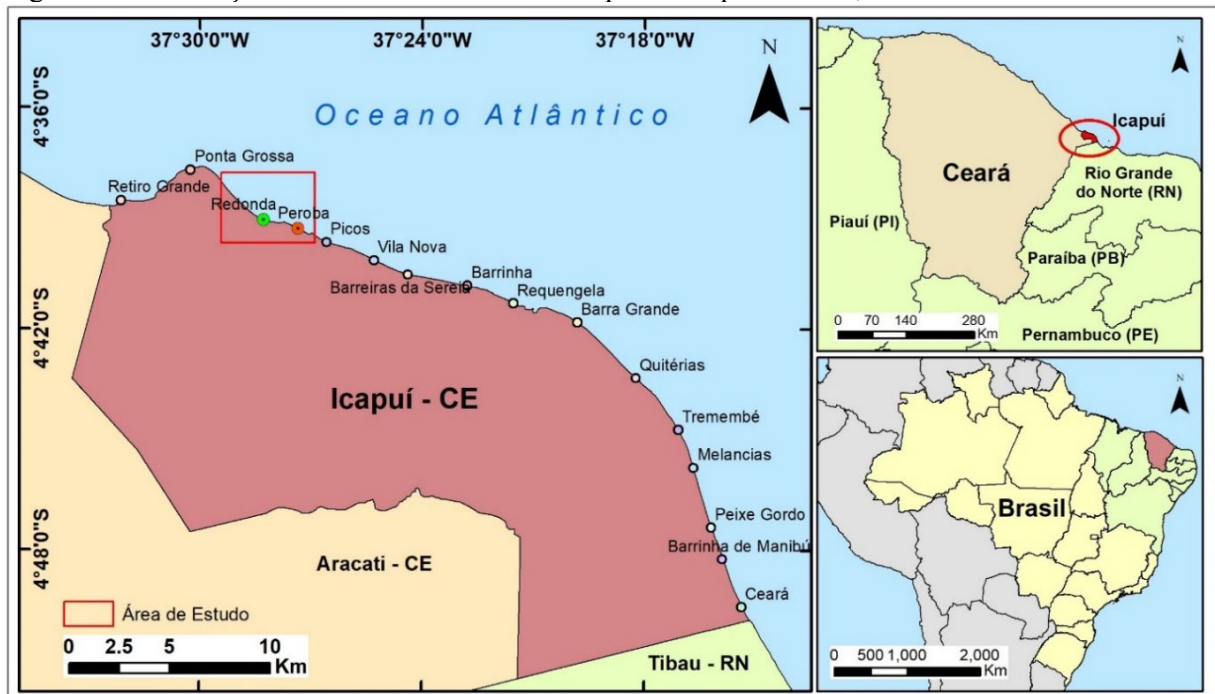
No município de Icapuí, Ximenes *et al.* (2013) e Portela *et al.* (2014) analisaram o trecho entre as praias de Redonda e Ponta Grossa. Souza *et al.* (2014) apresentaram um panorama

de praias em estado de erosão ao longo de toda costa do litoral de Icapuí. Souza *et al.* (2016) analisaram o trecho entre as praias de Ponta Grossa e Retiro Grande. Barros (2018) estudou o trecho entre as praias de Barreiras de Baixo, Barrinha/Barra Grande e Barreiras de Cima. Costa (2019) e Silva Neto *et al.* (2020) analisaram a variação da linha de costa do município de Icapuí. Silva (2021) aplicou a ferramenta DSAS para descrever a vulnerabilidade das falésias associados a processos erosivo no litoral leste do Ceará. Muitos destes estudos estão concentrados no trecho entre praias de Redonda e Ponta Grossa, mais atrativas sob o ponto de vista turístico. Já o trecho entre as praias de Peroba e Redonda carece de informações históricas e de estudos detalhados sobre a evolução de sua linha de costa. Este trabalho difere-se dos demais por usar imagens de média resolução e fornecer detalhes de mobilidade da linha de costa em intervalos de curto e médio prazo.

#### 4.1.1 Caracterização da área de estudo

Icapuí está situado no extremo leste do estado do Ceará, faz fronteira a leste com o estado do Rio Grande do Norte e, no Ceará, com o município de Aracati (Figura 3). Icapuí passou a ser Município a partir de 15 de janeiro de 1985, por meio do Decreto Lei 11.003/1985, quando foi desmembrado do Município de Aracati (MEIRELES *et al.*, 2016).

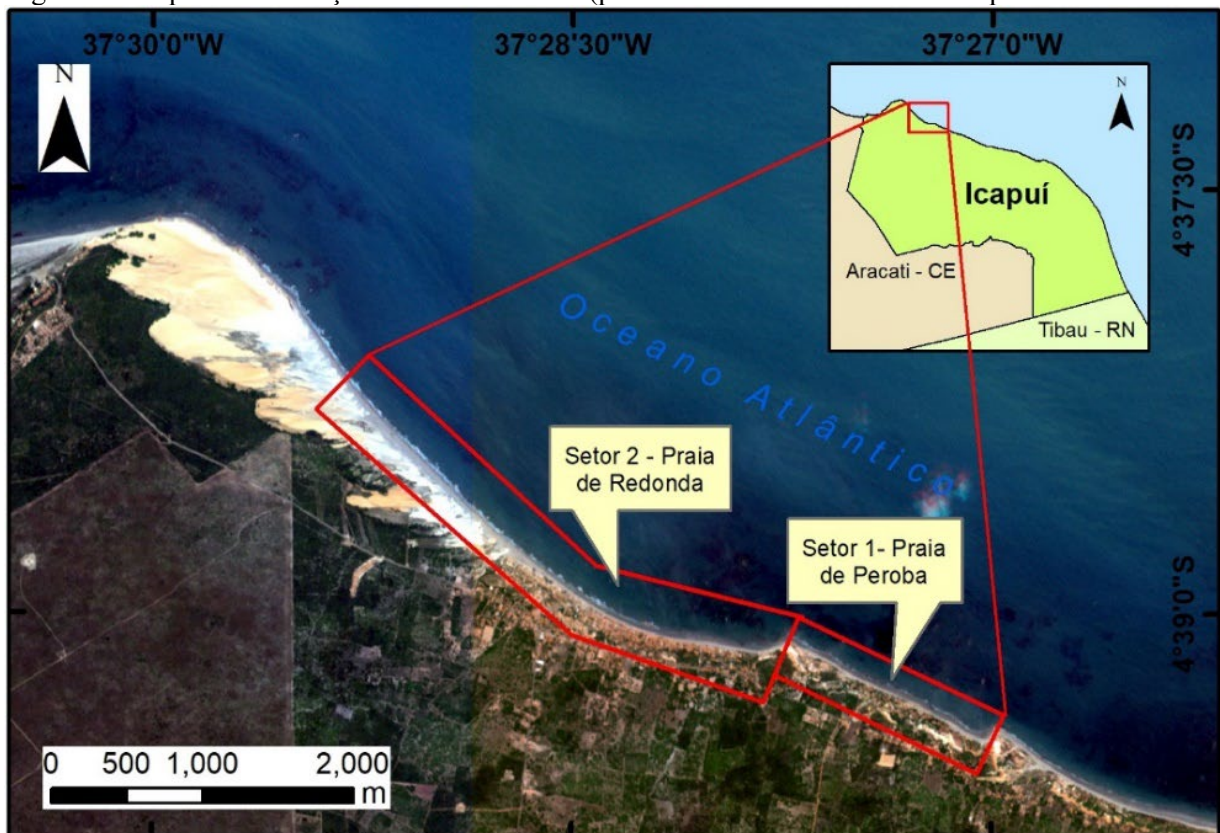
Figura 3 - Localização da área de estudo no município de Icapuí – Ceará, Brasil.



Fonte: Autor. Elaborado com base em dados cartográficos do IBGE e IPECE.

A área de estudo é constituída por duas praias: Praia de Peroba (mais a leste, aqui denominada de setor 1) e Praia de Redonda (setor 2, mais a oeste) numa extensão cerca de 5070 m (Figura 4). O setor 1 é caracterizado por apresentar maior parte de suas construções praticamente junto à atual posição da linha de costa, constituindo um fator de grande risco. Já o setor 2 é caracterizado pela elevada concentração de construções entre moradias e pousadas, especialmente em sua porção mais a leste. O seu trecho mais a oeste é praticamente despovoado, por ser uma área de proteção ambiental e devido à cobertura por depósitos de dunas. As duas praias são as que mais concentram estabelecimentos turísticos ao nível do município de Icapuí (CE), onde a antropização contribui para processos erosivos. Aliado a ocupação do solo costeiro Barros (2018) menciona eventos como superluas, marés de sizígia e ressacas como grandes causadores da erosão costeira no local, associados ao baixo gradiente topográfico das praias.

Figura 4 - Mapa de setorização da área de estudo (praias de Peroba e Redonda – Icapuí-Ceará).

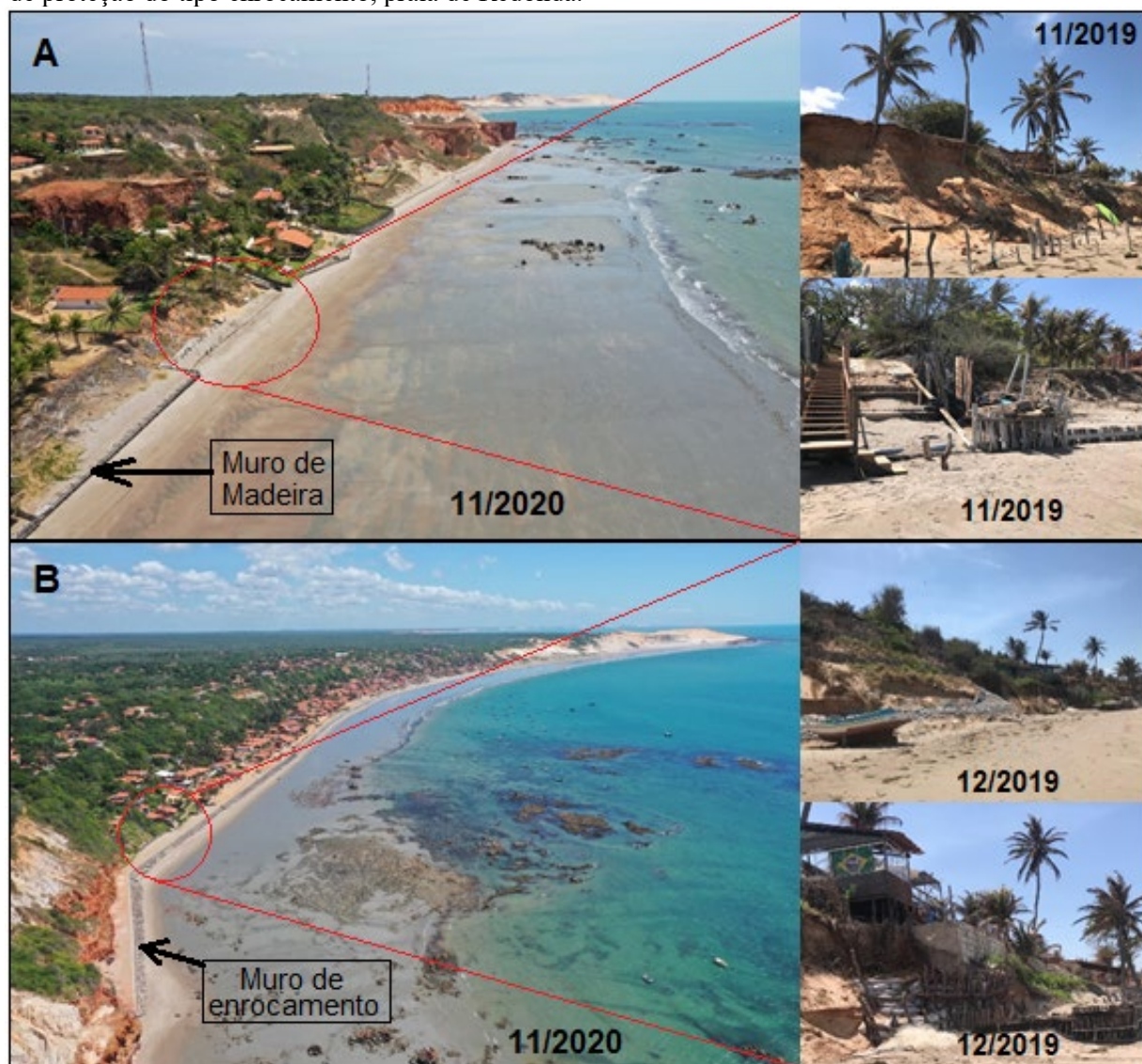


Fonte: Autor. Base em dados cartográficos do IBGE e Imagem RapidEye/REIS de 27/06/2015 disponibilizado pelo MMA.

Na tentativa de conter o avanço do mar e os impactos das ondas, obras de proteção costeira foram implementadas por moradores locais na praia de Peroba (instalação de troncos de

madeira) e na praia de Redonda (obra do tipo enrocamento), construídas pela prefeitura local entre os anos 2018 e 2020 (Figura 5). Opiniões divergentes estão instaladas entre os residentes na área da Praia de Peroba e a prefeitura local em relação a implantação de muro de proteção costeira, sendo que os que se opõem alegam que a praia irá perder seu valor estético (SILVA *et al.*, 2022).

Figura 5 - Estruturas de proteção costeira, na tentativa de conter processos erosivos da zona costeira do município de Icapuí. (A) Muro de proteção construído na base de madeira, praia de Peroba. (B) Muro de proteção do tipo enrocamento, praia de Redonda.



Fonte: Autor.

Geologicamente, o município de Icapuí está inserido no contexto da Bacia Potiguar, que se situa entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará, limitando-se no extremo oeste pelo Alto de Fortaleza e no extremo leste pelo Alto de Touros. As litologias presentes são caracterizadas

pela Formação Açú, constituída por arenitos, Formação Jandaíra, constituída por rochas carbonáticas e Formação Barreiras, constituída por arenitos variados (SOUSA, 2002; SANTOS, 2014). A geomorfologia costeira engloba as praias, depósitos de dunas atuais e antigas, terraços marinhos, falésias vivas e mortas (MEIRELES; SANTOS, 2012; BARROS, 2018).

Em relação à precipitação no município de Icapuí, as chuvas são concentradas entre os meses de fevereiro a maio (FUNCEME, 2021). Este fato acontece pela sua localização na Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, sendo afetado pela sua mobilidade ao longo do ano (MEIRELES; SANTOS, 2012; BARROS, 2018). O período de escassez de chuvas pode estar associado ao surgimento do fenômeno *El Niño* e de excedente ao fenômeno *La Niña* que tem assolado o Brasil, causando impactos diferenciados para cada região e estados (BARROS, 2018). Normalmente, a região Nordeste do Brasil é uma das mais impactadas pela ocorrência do *El Niño*, afetando o clima na região com o enfraquecimento dos ventos alísios, os quais apresentam um importante papel na dinâmica costeira regional (BARROS, 2018).

A ocorrência dos eventos *El Niño* ou *La Niña* no Nordeste brasileiro faz com que esta região apresente a maior previsibilidade climática sazonal a nível mundial, com ocorrência frequente de intervalos temporais excepcionalmente secos (escassez de precipitação) ou úmidos (predominância de precipitação) (MARENGO *et al.*, 2018).

As direções predominantes dos ventos são de SE, ESE, E e NE, com velocidades médias em torno de 4,5 m/s. Nos meses mais secos podem chegar a 11 m/s, soprando na direção SE, já na época chuvosa o cenário inverte-se com aparecimento da ZCIT, predominando os de NE (MEIRELES; SANTOS, 2012).

No município de Icapuí o regime de maré dominante é a mesomaré sendo semi-diurna (BARROS, 2018). Dados da Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN apontam uma amplitude média cerca de 1,83 m.

## **4.2 Material e métodos**

### **4.2.1 Aquisição e processamento de imagens**

Para avaliar a taxa de erosão/acreção no município de Icapuí através das posições históricas da linha de costa, foram obtidas imagens de sensores remotos orbitais de média resolução

de uma série temporal de 15 anos dos satélites *RapidEye* a partir do site <<http://geocatalogo.mma.gov.br/>> e China-Brazil Earth-Resources Satellite – CBERS do site <<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>> (ver Tabela 1). O período analisado foi condicionado pela indisponibilidade de mais imagens com resolução espacial similar ou próxima que pudessem ser usadas para expandir o intervalo de estudo. O georreferenciamento das cenas foi executado no *software ArcGIS 10.8*, utilizando como referência uma imagem do satélite *QuickBird* de 18/08/2009, visto que ela possui melhor resolução espacial em relação aos dados orbitais utilizados na série temporal. As imagens foram selecionadas observando sua qualidade quanto à cobertura da zona costeira e de acordo com o dia da coleta. Foram selecionadas imagens do período mais seco (meses de junho a dezembro), a exceção das cenas de 2005 e 2010, que são de maio e janeiro respectivamente, estas cenas foram usadas pela sua importância na definição dos intervalos regulares de análise e por não existir outras com qualidade desejada do período seco que cobrisse a área. As cenas foram reamostradas considerando uma resolução espacial de 10 m, de modo a homogeneizar as condições de fotointerpretação e minimizar eventuais distorções advindas da vetorização da linha de costa de imagens orbitais com pixels de tamanhos diferentes. Embora a informação espectral das imagens com menor tamanho de pixel seja alterada, este procedimento padroniza a resolução espacial, que neste contexto é o aspecto mais relevante na identificação da linha de costa.

Tabela 1 - Imagens utilizadas como base para a vetorização das linhas de costa, com seus respectivos satélites, sensores e fontes de aquisição.

<b>Data</b>	<b>Satélite</b>	<b>Sensor</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>	<b>Fonte</b>
24/05/2005	CBERS_2	PAN	10	INPE
30/12/2007	CBERS_2B	HRC	2,5	INPE
22/10/2009	CBERS_2B	HRC	2,5	INPE
31/01/2010	CBERS_2B	HRC	2,5	INPE
06/06/2012	RapidEye	REIS	6,5	MMA
23/12/2013	RapidEye	REIS	6,5	MMA
02/07/2014	RapidEye	REIS	6,5	MMA
27/06/2015	RapidEye	REIS	6,5	MMA
12/09/2016	CBERS_4	PAN	5,5	INPE
10/09/2018	CBERS_4	PAN	5,5	INPE
20/08/2019	CBERS_4	PAN	5,5	INPE
02/08/2020	CBERS_4A	PAN	2	INPE

Fonte: Autor.



Para a vetorização da linha de costa foi levado em consideração a diferença da cor dos pixels marcadas nas imagens como feições de continente e oceano. A vetorização da linha de costa foi realizada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas – SIG, no *software* ArcGIS®. Os parâmetros estatísticos de mudança da linha de costa foram gerados a partir da ferramenta DSAS. A vetorização das linhas de costa foi realizada em uma escala fixa de 1:250. Já a escala de representação dos produtos cartográficos foi de 1:25.000.

#### **4.2.2 Aplicação do Digital Shoreline Analysis System – DSAS**

Para analisar a taxa de variação da linha de costa aplicou-se a ferramenta DSAS. Esta ferramenta surgiu ainda nos anos 1990 como uma extensão do ArcGIS®, e a versão usada neste trabalho é a 5.0, desenvolvida por Himmelstoss *et al.* (2018) em parceria com o *United States Geological Survey* – USGS. Esta versão apresenta cinco principais parâmetros estatísticos para estimar a variação da linha de costa. Neste trabalho foram usados apenas três: (1) *End Point Rate* – EPR; (2) *Linear Regression Rate* – LRR; e (3) *Net Shoreline Movement* – NSM.

O EPR é uma taxa em que o cálculo é baseado no quociente da distância entre a linha de costa mais antiga e a mais recente pelo tempo decorrido e o seu produto é dado em m/ano. A vantagem deste parâmetro é por ela precisar apenas de duas linhas de costa e a desvantagem é que quando existe mais de duas linhas as informações das linhas restantes são ignoradas (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018). O LRR é uma taxa cujo valor também é expresso em m/ano. A vantagem no uso deste parâmetro, diferente do EPR, é que ele considera todas as linhas de costa vetorizadas que cruzam os transectos, não apenas a mais antiga e a mais recente (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018). O NSM é a distância entre a linha de costa mais antiga e a mais recente para cada transecto interceptado por elas, e é dada em metro.

Os parâmetros EPR e NSM foram aplicados para analisar as variações entre os intervalos de 2005 e 2010, 2010 e 2015, 2015 e 2020, e 2005 e 2020. O LRR foi aplicado apenas para o intervalo entre 2005 e 2020, para efeito de comparação com o EPR gerado no mesmo intervalo.

A partir de Esteves e Finkl (1998), Del Río *et al.* (2012) e Silva Neto *et al.* (2020), foram definidas as seguintes classes, consideradas de acordo com os processos de retrogradação,

estabilidade e progradação, aplicados aos transectos gerados na análise da mudança da linha de costa (Tabela 2).

Tabela 2 - Classes das taxas de deslocamento da linha de costa

<b>Classes de mudança da linha de costa</b>	<b>Escala de variação</b>
Retrogradação severa	Min < -3 m/ano
Retrogradação moderada	-3 m/ano a -2 m/ano
Retrogradação baixa	-2 m/ano a -1 m/ano
Estabilidade	-1 m/ano a +1 m/ano
Progradação baixa	+1 m/ano a +2 m/ano
Progradação moderada	+2 m/ano a +3 m/ano
Progradação severa	+3 m/ano < Máx

Fonte: Adaptado de Esteves e Finkl (1998), Del Río et al. (2012) e Silva Neto et al. (2020).

Baseado em Jayson-Quashigah *et al.* (2013) e Silva Neto *et al.* (2020), adotou-se a separação de 10 metros entre os transectos gerados. Distâncias iguais ou inferiores a 10 metros entre os transectos reduzem erros na determinação das taxas geradas pelo DSAS, permitindo que os resultados estejam muito próximo a realidade da área (ALBUQUERQUE *et al.* 2013). Outro elemento importante foi a alta resolução das imagens orbitais aplicadas que contribuíram no detalhamento e melhor definição das linhas de costa.

### 4.3 Resultados

A aplicação do DSAS resultou num total de 507 transectos, lançados perpendicularmente em relação a linha de costa de toda extensão das praias de Peroba e Redonda.

#### 4.3.1 Análise da variação da linha de costa entre 2005 e 2010

Os valores de EPR indicados na Tabela 3 mostram que o trecho de praia estudado variou a uma taxa média de  $-1,18 \pm 1,04$  m/ano, indicando uma retrogradação baixa. Durante este período ocorreu uma retração média da linha de costa em cerca de  $-5,15 \pm 4,53$  m.

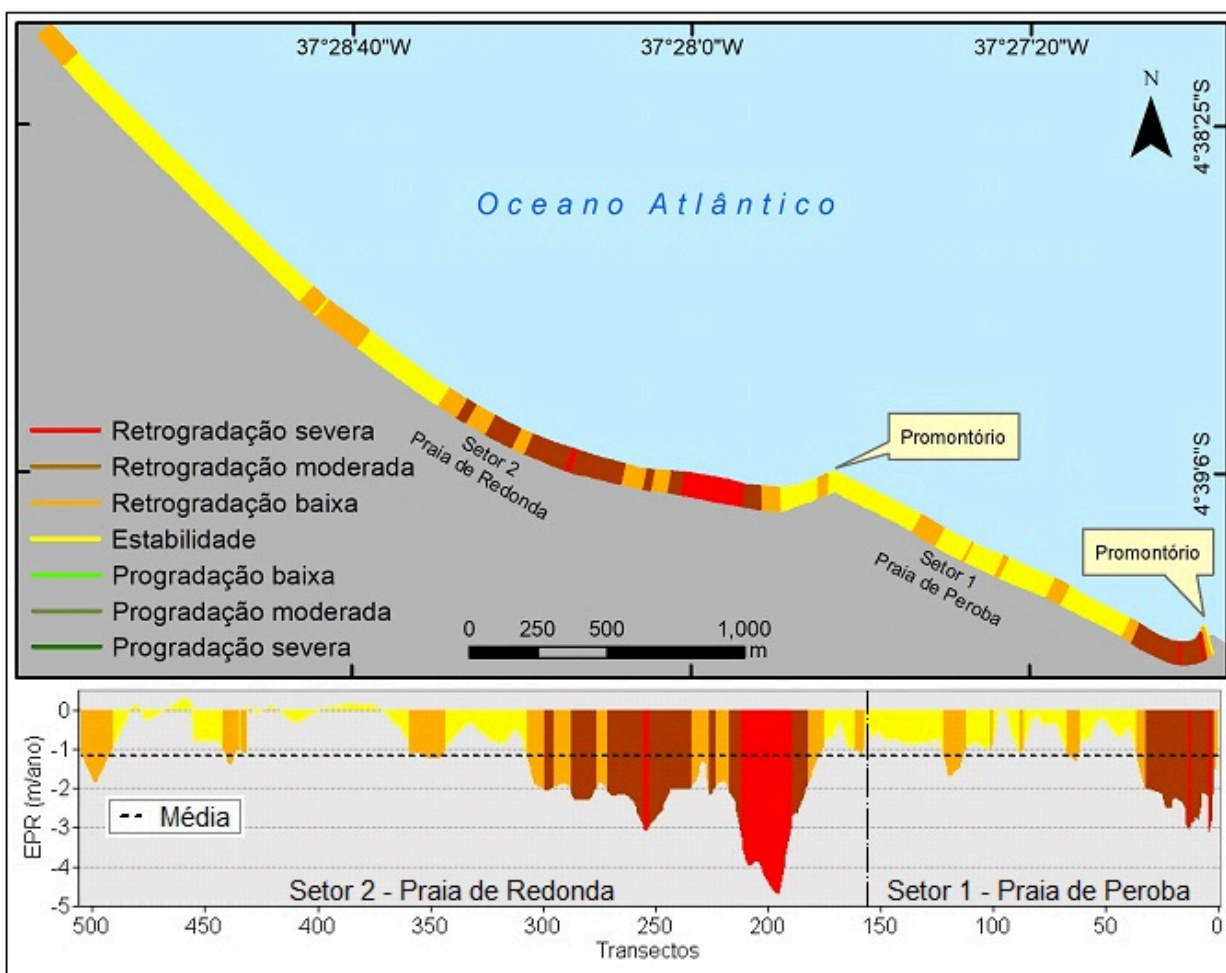
Tabela 3 - Taxa de variação e movimento linear da entre 2005 e 2010.

Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio padrão
EPR (m/ano)	-4,70	-1,18	+0,31	±1,04
NSM (m)	-20,47	-5,15	+1,36	±4,53

Fonte: Autor.

Em termos espaciais o trecho analisado manteve-se estável em 54,35% (2.620 m) da linha de costa. A retrogradação ocorreu em cerca de 45,65% (2.450 m), distribuídos em retrogradação baixa com 21,94%, moderada com 18,38% e severa com 5,33%. No mesmo período não houve registro de processo de progradação em ambos os setores (Figura 6 e 7A).

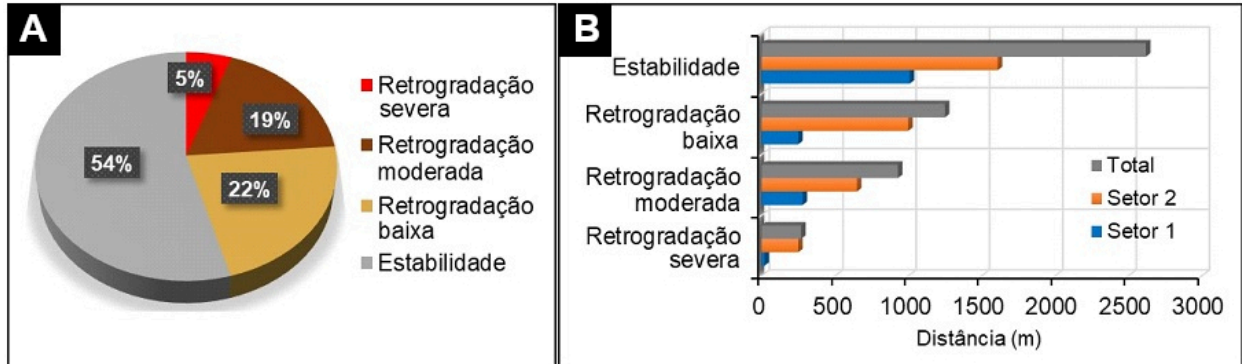
Figura 6 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2005 e 2010 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda.



Fonte: Autor.

O Setor 1 apresentou estabilidade na linha de costa cerca de 1.010 m, 20 m do trecho passou por retrogradação severa, 280 m moderada e 250 m baixa. O setor 2 teve estabilidade em 1.610 m, retrogradação baixa em 1.000 m, moderada em 650 m e severa em 250 m (Figura 7B).

Figura 7 - Quantificação da variação da linha de costa entre 2005 e 2010. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial.



Fonte: Autor.

#### 4.3.2 Análise da variação da linha de costa entre 2010 e 2015

O período compreendido entre 2010 e 2015 foi marcado pela ocorrência de processos de progradação em quase todo trecho analisado. Os valores de EPR para o período em análise mostram que ocorreu uma variação na linha costa a uma taxa média de  $+0,76 \pm 0,70$  m/ano, tendo ocasionado um deslocamento da linha de costa no sentido do mar adentro em cerca de  $+4,13 \pm 3,80$  m (Tabela 4).

Tabela 4 - Taxa de variação e movimento linear da costa entre 2010 e 2015.

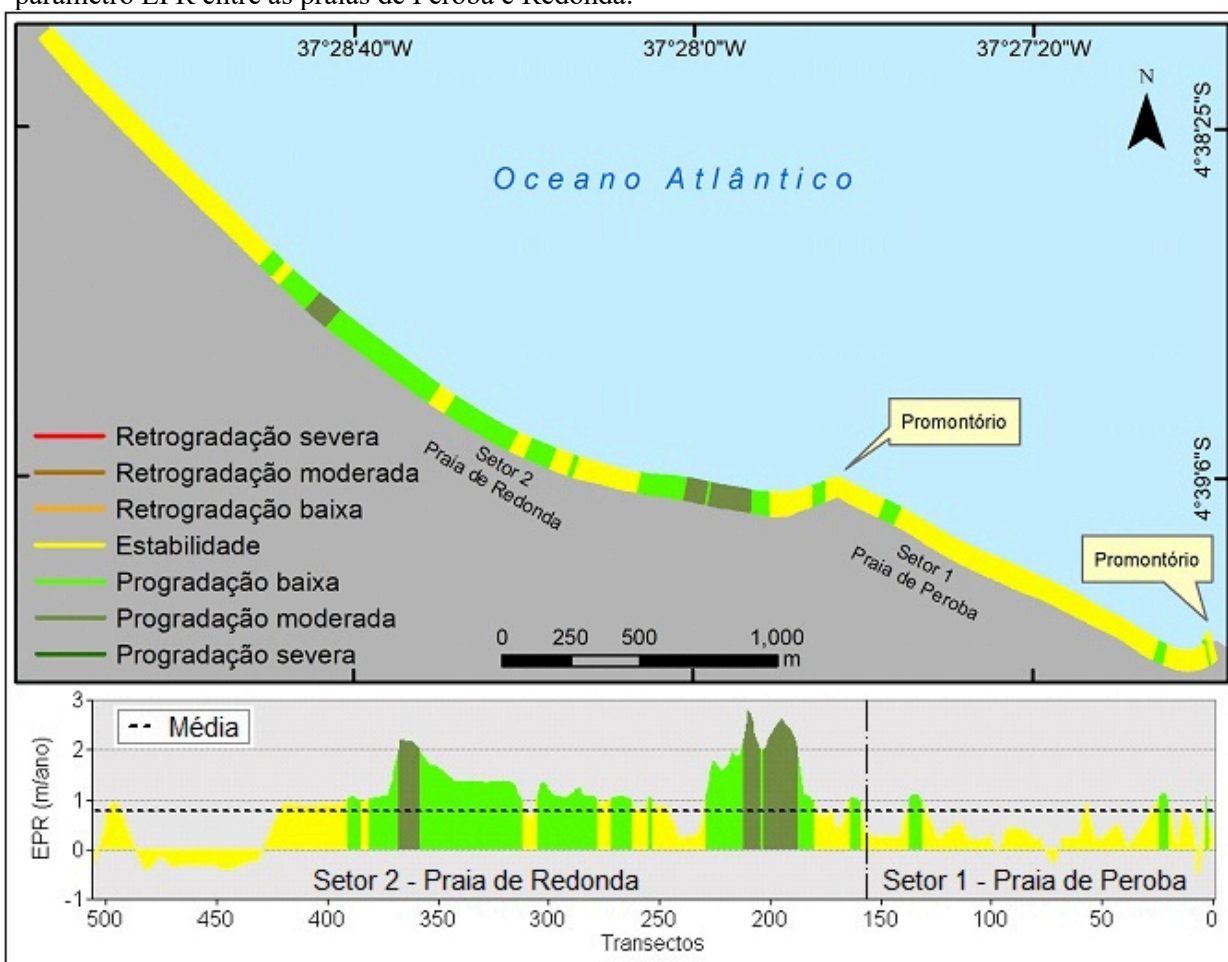
Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio padrão
EPR (m/ano)	-0,53	+0,76	+2,8	$\pm 0,70$
NSM (m)	-2,85	+4,13	+15,11	$\pm 3,80$

Fonte: Autor.

Entre 2010 e 2015 a estatística de variação dada por EPR, indicou que o trecho analisado foi dominado pela ocorrência de estabilidade na linha de costa com cerca de 64,62% (3.280 m). A progradação ocorreu em cerca de 35,38% (1.790 m), distribuídos em progradação baixa com 28,66% e moderada com 6,72% (Figura 8 e 9A).

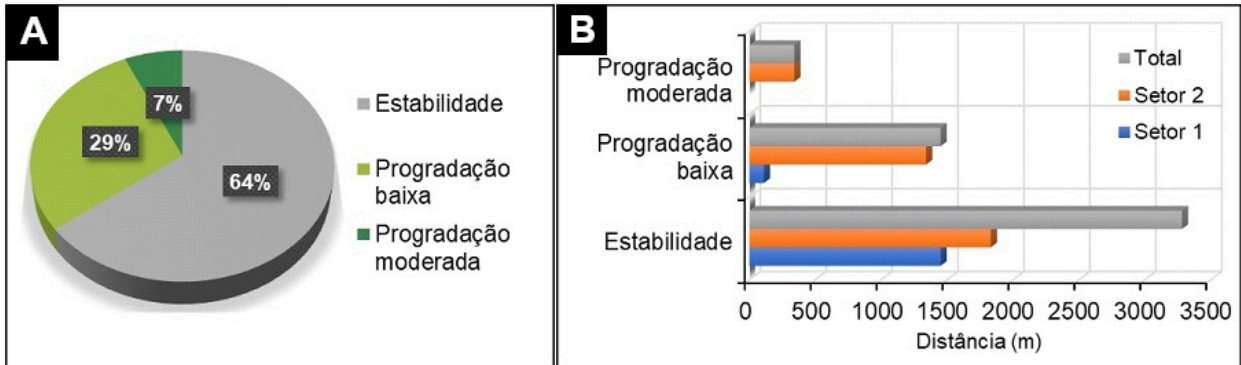
O setor 1 apresentou estabilidade na linha de costa em cerca de 1.450 m e em 110 m ocorreu uma progradação baixa. No setor 2 a estabilidade foi registrada em 1.830 m de linha de costa, com uma progradação baixa em 1.340 m e moderada em 340 m. A progradação ocorrida neste período, contraria o ocorrido no período anterior entre 2005 e 2010 em que a estabilidade foi intercalada por processos erosivos (Figura 9B).

Figura 8 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2010 e 2015 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda.



Fonte: Autor.

Figura 9 - Quantificação da variação da linha de costa entre 2010 e 2015. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial.



Fonte: Autor.

#### 4.3.3 Análise da variação da linha de costa entre 2015 e 2020

O período entre 2015 e 2020 o comportamento erosivo volta a se destacar, com taxas de variações mais elevadas quando comparadas com as taxas entre 2005 e 2010. A linha de costa variou a uma taxa média de  $-1,37 \pm 0,85$  m/ano, resultando num recuo de cerca de  $6,98 \pm 4,36$  m no sentido continente adentro (Tabela 5).

Tabela 5 - Taxa de variação e movimento linear da costa entre 2015 e 2020.

Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio padrão
EPR (m/ano)	-3,34	-1,37	-0,06	$\pm 0,85$
NSM (m)	-17,05	-6,98	-0,30	$\pm 4,36$

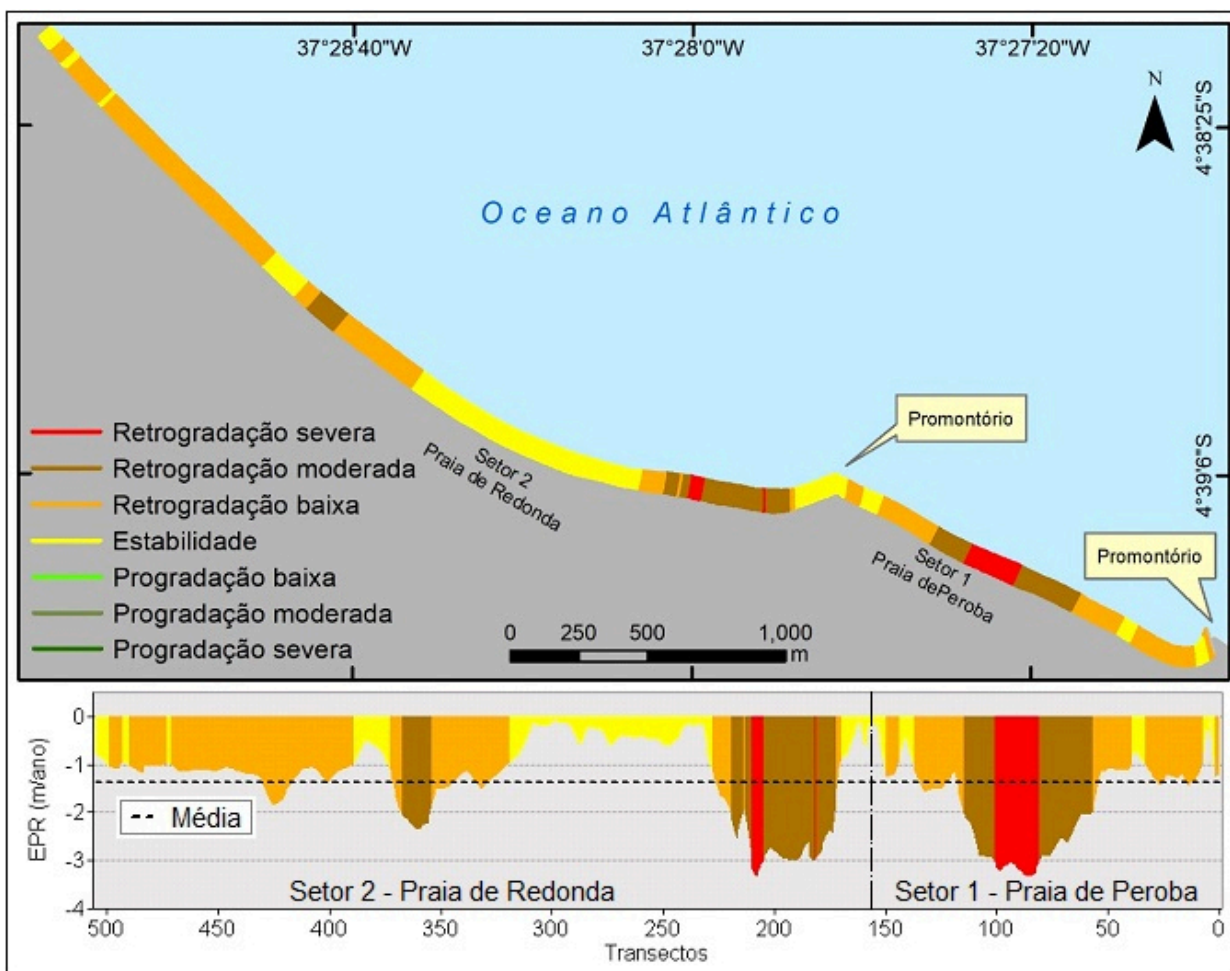
Fonte: Autor.

Neste período ocorreu a retrogradação da linha de costa na ordem de 69,17% (3.500 m), a estabilidade foi de 30,83% (1.570 m). A retrogradação esteve distribuída com retrogradação baixa com 46,05%, moderada com 17,98% e severa com 5,14%. No mesmo período não houve progradação em ambos os setores do trecho praial (Figura 10 e 11A).

No Setor 1 apresentou estabilidade na linha de costa em cerca de 230 m, com cerca de 200 m de retrogradação severa, 380 m moderada e 750 m baixa. O setor 2 teve estabilidade em cerca de 1.340 m de linha de costa. A retrogradação esteve distribuída em severa com cerca de 60 m, moderada com 530 m e baixa com 1.580 m (Figura 11B). Comparando com o período entre 2010 e 2015, o processo foi inverso, tendo sido marcado por retrogradação da linha de costa. As

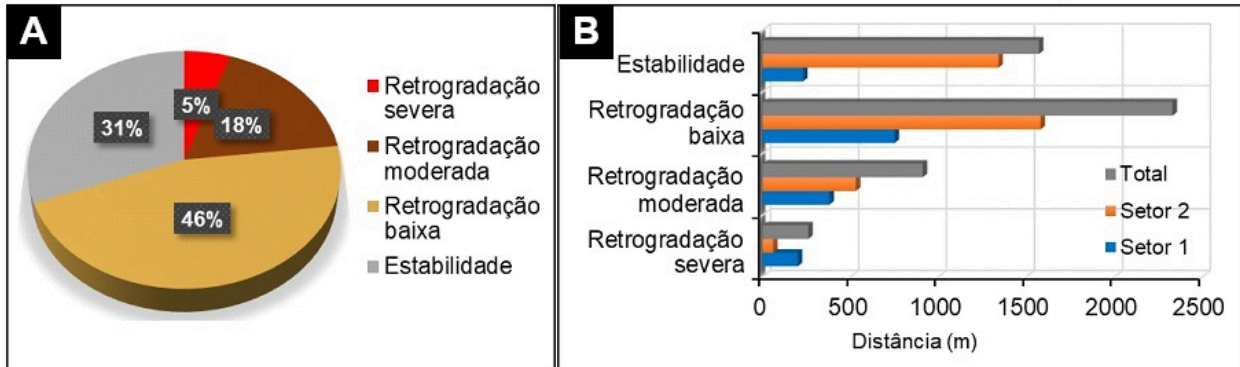
maiores variações foram concentradas na parte central do setor 1 no extremo leste no setor 2 (Figura 10).

Figura 10 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2015 e 2020 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda.



Fonte: Autor.

Figura 11 - Quantificação da variação da linha de costa entre 2015 e 2020. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial.



Fonte: Autor.

#### 4.3.4 Análise da variação da linha de costa entre 2005 e 2020

O período total correspondente a 15 anos foi marcado pelo domínio de estabilidade nos dois setores praias, com taxas médias de variação da linha de costa dados pelos parâmetros EPR e LLR estarem muito próximas uma da outra, com cerca de  $-0,54 \pm 0,37$  m/ano e  $-0,47 \pm 0,37$  m/ano, respectivamente (Tabela 6 e Figura 12).

Tabela 6 - Taxas de variação e movimento linear da costa entre 2005 e 2020.

Parâmetro	Mínimo	Médio	Máximo	Desvio padrão
EPR (m/ano)	-1,46	-0,54	+0,07	$\pm 0,37$
LLR (m/ano)	-1,47	-0,47	+0,04	$\pm 0,37$
NSM (m)	-21,65	-7,98	+0,98	$\pm 5,50$

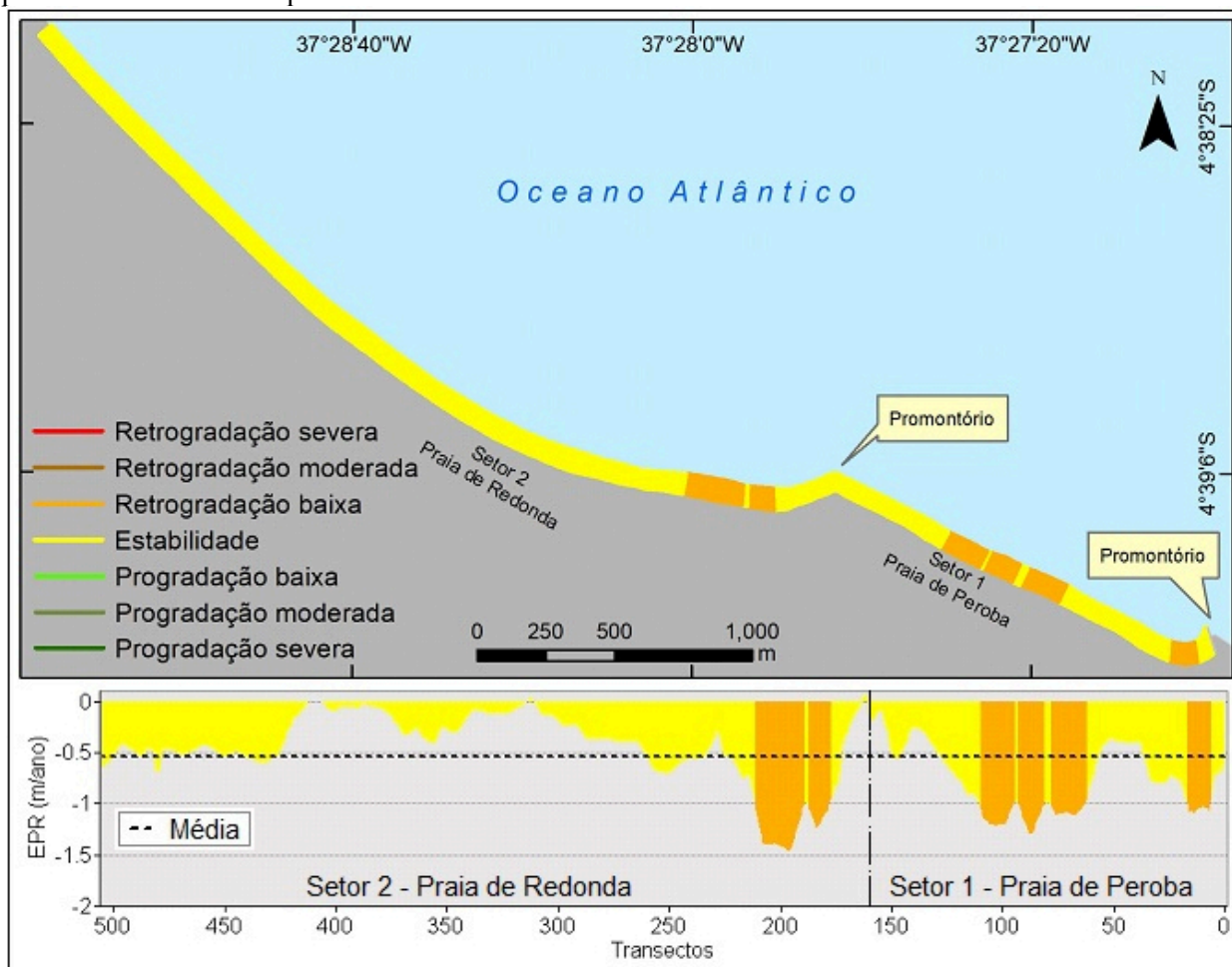
Fonte: Autor.

Analisando a distribuição da taxa de variação dado pelo EPR, o trecho praial apresentou-se estável com 82,81% (4.200 m) e retrogradou 17,19% (870 m) (Figura 13A). No setor 1 a estabilidade estendeu-se por cerca de 1.010 m ao longo da linha de costa, a retrogradação baixa ocorreu em cerca de 550 m. No setor 2 a estabilidade ocorreu em 3.190 m da costa e a retrogradação foi baixa em 320 m (Figura 13B).

Os valores do parâmetro NSM (Tabela 6), indicam que em 15 anos, entre 2005 e 2020, a linha de costa deslocou-se cerca de 8 m em direção ao continente. O valor mínimo de -21,65 m indica o trecho praial onde ocorreu o maior recuo na linha de costa (Figura 12).

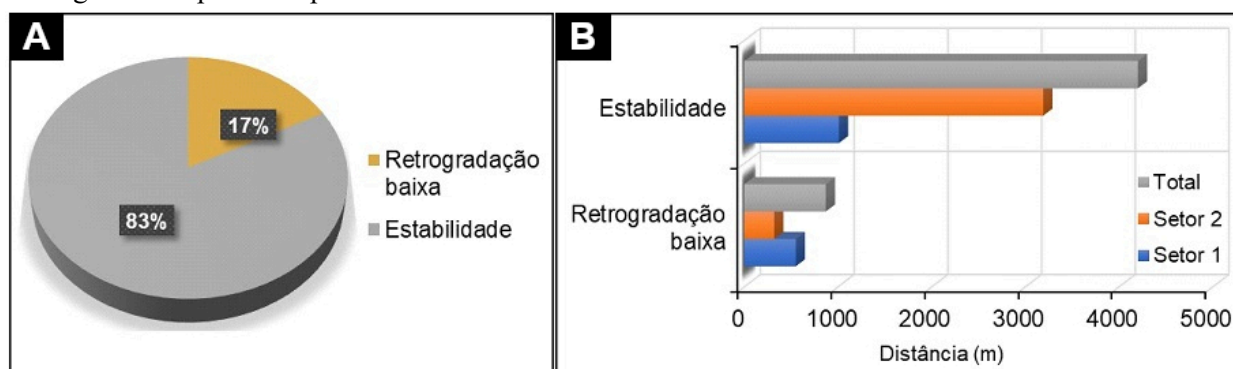


Figura 12 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2005 e 2020 estabelecido pelo parâmetro EPR entre as praias de Peroba e Redonda.



Fonte: Autor.

Figura 13 - Quantificação da variação da linha de costa entre 2005 e 2020. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial.

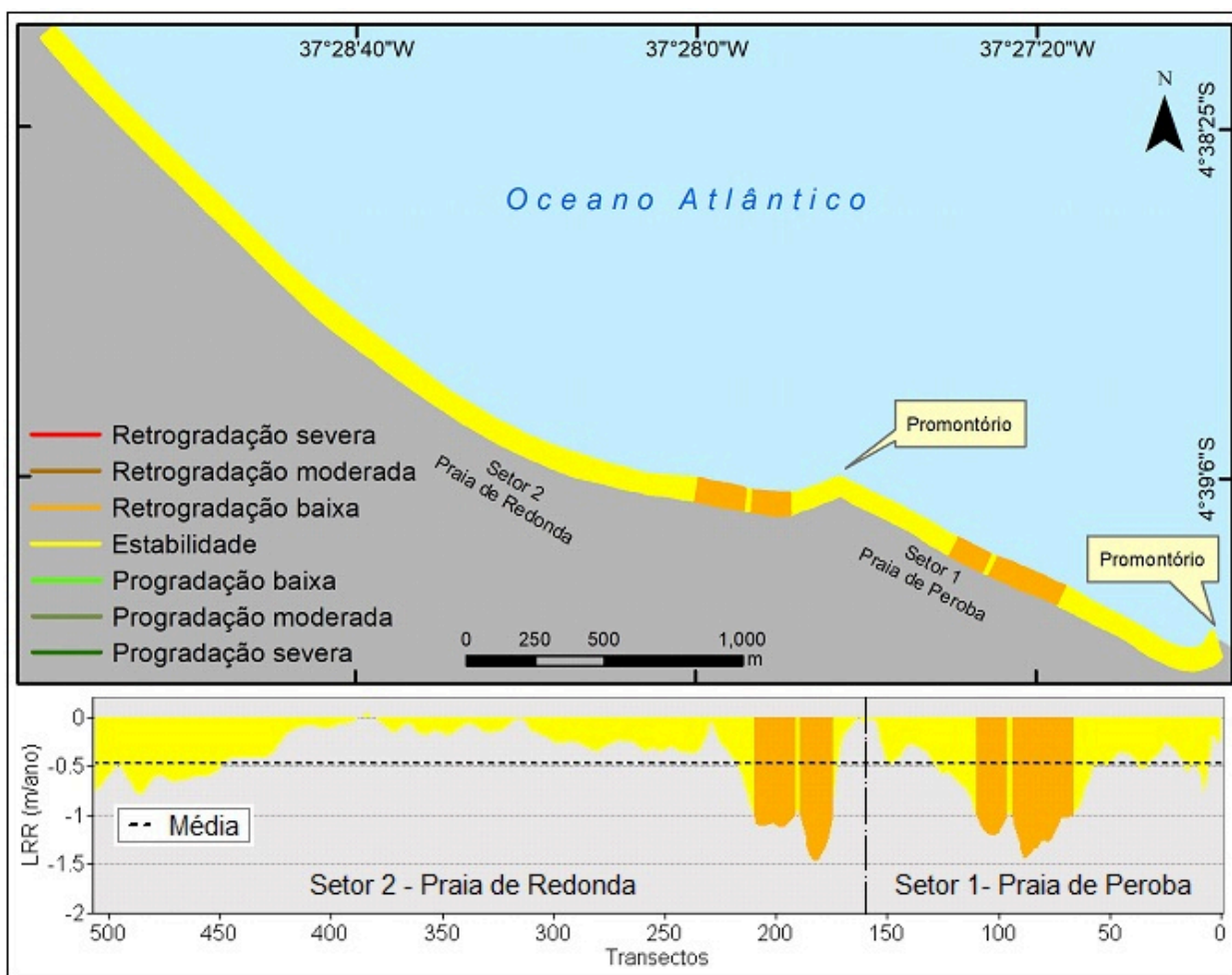


Fonte: Autor.

A extrapolação através da taxa de regressão linear em metros por ano para cada linha cruzada por cada transecto separados a 10 m no período de 15 anos, prevaleceu o domínio de estabilidade na linha de costa a uma taxa média de  $-0,47 \pm 0,37$  m/ano, correspondente a 84,98% (4.310 m) e retrogradação com 15,02% (760 m) (Figura 14 e 15A). Os valores do LRR não diferem tanto do EPR, o que confirma as tendências de retrogradação apesar da estabilidade.

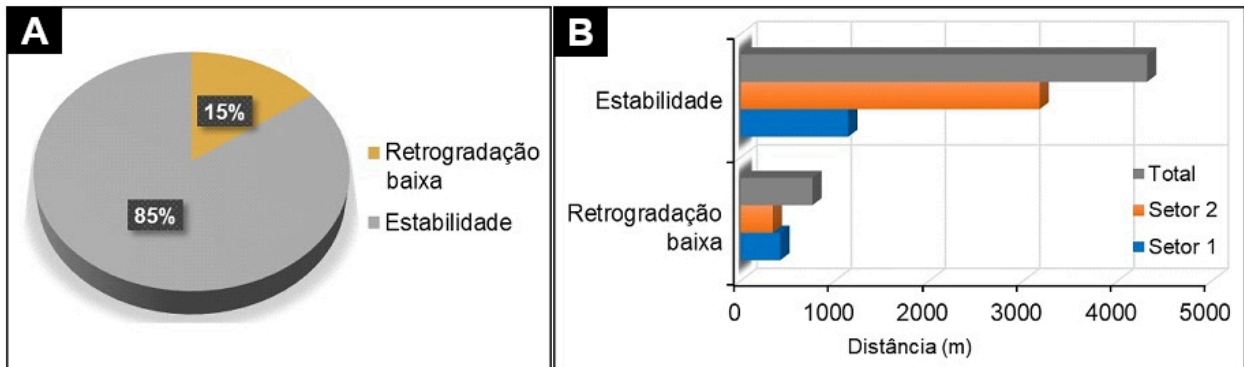
No setor 1 a estabilidade foi registrada em 1.140 m e a erosão baixa em 420 m. Já no setor 2 a estabilidade foi de 3.170 m e a retrogradação foi baixa em cerca 340 m (Figura 15B).

Figura 14 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa entre 2005 e 2020 estabelecido pelo parâmetro LRR entre as praias de Peroba e Redonda.



Fonte: Autor.

Figura 15 - Quantificação da variação da linha de costa entre 2005 e 2020. A) Percentual de variação da linha de costa entre as praias de Peroba e Redonda; e B) Variação espacial em metros por classes e por setor ao longo do comprimento praial.



Fonte: Autor.

Comparando os valores fornecidos pelo EPR de  $-0,54$  m/ano e LRR de  $-0,47$  m/ano, o menor recuo da linha expresso através dos valores de EPR, pode ser justificado devido a fixação da linha de costa na parte central e leste da praia de Redonda com a conclusão da estrutura de proteção costeira do tipo enrocamento (Figura 4B). No entanto, o ajuste ponderado, representado pela regressão linear (LRR), reflete de uma forma fiel o comportamento da linha de costa (Figura 14).

#### 4.4 Discussões

A análise de 15 anos de variação da linha de costa, entre 2005 e 2020, do trecho de cerca de 5 km entre as praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí, apresentou taxas estabelecidas pelos parâmetros EPR e LRR que apontam predominantemente um cenário de estabilidade. Este relativo equilíbrio é resultado das mudanças decorridas ao longo de um intervalo temporal mais amplo, dominados por períodos de retrogradação e outros de progradação de sedimentos. Durante o primeiro período analisado entre 2005 e 2010 a linha de costa variou a uma taxa de  $-1,18 \pm 1,04$  m/ano refletindo em termos matemáticos uma retrogradação baixa. No segundo período entre 2010 e 2015 dominou a estabilidade na linha de costa com tendências progradação, tendo variado  $+0,76 \pm 0,70$  m/ano. No terceiro período entre 2015 e 2020 ocorreu uma retrogradação da linha de costa de cerca de  $-1,37 \pm 0,85$  m/ano.

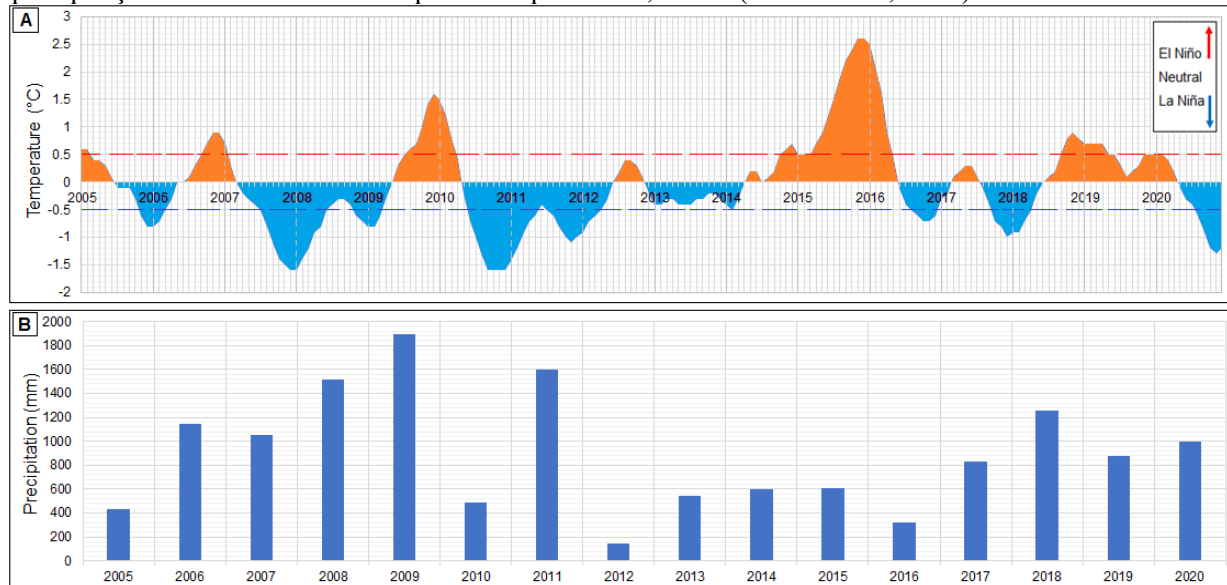
Os resultados deste trabalho confirmam as tendências erosivas e a ocorrência de variações sazonais que resultam em processos de retrogradação e progradação da linha de costa,

identificados a partir de estudos desenvolvidos na área e em zonas circunvizinhas. Portela *et al.* (2014) identificou a ocorrência de processos de erosão e ameaças a destruição de infraestruturas provocados por ataques de ondas na praia de Redonda, onde no geral não houve mudanças significativas na linha de costa, tendo ocorrido processo inverso a sotamar na praia da Ponta Grossa. Similarmente aos resultados encontrados nesta pesquisa, Silva Neto *et al.* (2020) utilizando imagens orbitais da série Landsat com resolução espacial menor (30 metros), apontaram a ocorrência de estabilidade em todo trecho onde estão inseridas as praias de Peroba e Redonda. Os intervalos de análise menores aplicado neste trabalho permitiram avaliar melhor a dinâmica sazonal. Enquanto que estudo com 10 anos de intervalo ou superior indicam estabilidade, outros dois intervalos de 05 anos indicou um período de retrogradação e outro de progradação, o que resultou em uma estabilidade geral. Esta diferença reflete a possibilidade que a aplicação de produtos de maior resolução espacial e intervalos temporais curtos permitem maior detalhe.

Os trechos de praia com elevada dinâmica de processos de erosão/deposição nas praias de Peroba e Redonda estão associados à influência dos agentes hidrodinâmicos como as marés, energia das ondas e o sentido da deriva litorânea (leste para oeste) onde os promontórios rochosos existentes, entre as praias de Pico e Peroba e entre Peroba e Redonda, também contribuem na dinâmica do aporte sedimentar, ocasionando erosão concentrada imediatamente a sotamar devido à ocorrência de ondas divergentes ao longo do trecho. Apesar do efeito de barramento ocasionado pelos promontórios, os sedimentos retidos a barlamar continuam sendo movidos de leste a oeste pelo efeito *bypass* e pela deriva litorânea (CLAUDINO-SALES; CARVALHO, 2014). Por outro lado, em áreas de falésias ativas, quando não protegidas por blocos de rochas ou concretados, a incidência das ondas no sopé da falésia ocasiona erosão que forma incisões basais e a consequente instabilidade da parede da falésia, podendo resultar na queda de blocos ou deslizamento quando associado a uma elevada umidade da área devido a ação das chuvas (SILVA *et al.*, 2020).

As mudanças que refletem na intercalação entre períodos de ocorrência de processos retrogradacionais e progradacionais da linha de costa (tendência a erosão e deposição), podem estar associadas a alterações no aporte de sedimentos ocasionados pela escassez ou abundância de chuvas, influenciados ou não pela passagem do fenômeno *El Niño* e *La Niña* (Figura 16).

Figura 16 - A) Histórico de variação de temperatura em função a ocorrência dos eventos El Niño e La Niña (Adaptado de Administração Nacional Oceânica e Atmosférica – NOAA, 2021); B) Histórico de precipitação acumulada do município de Icapuí-Ceará, Brasil (FUNCEME, 2021).



Fonte: Autor.

O período entre 2005 e 2010 foi marcado pelo equilíbrio entre a passagem dos fenômenos *La Niña* e *El Niño*. Normalmente a passagem do *La Niña* tem favorecido a ocorrência de chuvas. Apesar do equilíbrio, neste período a queda de chuvas foi regular quando comparados com os períodos subsequentes (Figuras 16A e B). A abundância de chuvas, com maior umidade, temperatura e ventos mais amenos normalmente tem sido o fator impulsionador de processos de progradação da linha de costa. Por estes aspectos, deveria ter ocorrido progradação no período entre 2005 e 2010. Considerando o aporte sedimentar, a ausência de rios no local que transportariam sedimentos para nutrir as praias, além da ocupação desordenada do solo costeiro e consequente fixação de sedimentos, podem ter contribuído para uma dinâmica contrária aos efeitos potencialmente promovidos com a passagem do fenômeno *La Niña* (engorda de praias); por consequência, ocorreu a retrogradação da linha de costa.

Entre 2010 e 2015 foi marcado pela passagem de *La Niña*, com o aparecimento do *El Niño* no segundo semestre de 2014 tendo se prolongado por todo 2015 até ao primeiro semestre de 2016. Neste período apesar de ter sido dominado pela passagem de *La Niña* que tem sido indicativo de chuvas, ocorreu a maior escassez hídrica com o pico em 2012 com registo de precipitação acumulada abaixo de 200 mm. O ano 2011 foi uma exceção pela abundância hídrica (Figura 16B). Muehe (2011) afirma que baixas precipitações e ventos fortes do Nordeste favorecem a formação

e engorda de campos de dunas resultando no déficit de sedimentos nas praias e a consequente variação da linha de costa. No entanto, apesar da escassez de chuvas e ausência de eventos tempestuosos no local podem ter sido o principal fator responsável pela mobilização de sedimentos para a berma das praias e por consequência disso, ter ocorrido a progradação da linha de costa.

O período entre 2015 e 2020 foi marcado por maiores taxas de retrogradação da linha de costa quando comparado com os dois períodos anteriores. Neste período houve uma intercalação entre a passagem do fenômeno *El Niño* e *La Niña*. A passagem do *El Niño* foi muito severa no começo do período entre os anos 2015 a 2016 que já vinha de 2014, voltando a ocorrer entre segundo semestre de 2018 e o primeiro semestre de 2020. Apesar de *El Niño* ter dominado o período, as chuvas foram regulares com exceção para o ano 2016 que teve escassez hídrica. A retrogradação da linha pode estar associada à regularidade das chuvas neste período, que quando conjugadas com bloqueio de canais de escoamento de águas pluviais, aceleram os processos de erosivos nas praias. Os barramentos fluviais e construção de reservatórios para abastecimento humano, reduzem a chegada dos sedimentos das áreas fontes nas regiões praias (e.g. PINHEIRO *et al.*, 2020). Além disso, destaca-se o natural aumento das atividades antrópicas na zona costeira em questão e o uso e ocupação do solo o que pode ter afetado o balanço sedimentar da região.

O período geral entre 2005 e 2020 foi caracterizado pela ocorrência de estabilidade. Mas a ausência de praia recreativa em períodos de preamar mostra tendências erosivas e a consequente retrogradação da linha de costa. A tendência erosiva pode estar associada a passagem de *El Niño* em 2005 com ocorrência de escassez de chuva e a ocorrência de chuvas moderadas influenciadas pela passagem do fenômeno *La Niña* no ano 2020.

Outro elemento importante, que pode estar associado à estabilidade das praias de Icapuí e o litoral leste do Ceará é a migração de sedimentos vindo de outros pontos do litoral. Sedimentos oriundos do estado vizinho, Rio Grande do Norte, através dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu alimentam as praias do litoral leste do Ceará devido ao sentido da deriva litorânea de Sudeste-Noroeste (XIMENES *et al.*, 2013). Outro curso de água que também contribui, embora pouco, na alimentação das praias de Icapuí, é o riacho Arrombado.

Por sua vez os barramentos e reservatórios existentes nas bacias hidrográficas dos rios Apodi-Mossoró e Piranhas-Açu condicionam o aporte de sedimentos para o litoral. A bacia hidrográfica do Apodi-Mossoró apresenta cerca de 413 barramentos e o Piranhas-Açu cerca de 1.536 (e.g. PINHEIRO *et al.*, 2020). Estes barramentos associados as condições de marés local e

escassez de chuvas favorecem a formação de dunas e de extensas planícies de maré que interferem na mobilidade da linha de costa (e.g. PINHEIRO *et al.*, 2020). Em litorais com contexto de meso-maré, as correntes da maré apresentam-se como o maior controlador da evolução costeira (DILLENBURG; HESP, 2009).

Em termos gerais e independentemente da escala espacial e temporal, a erosão costeira é essencialmente produto de uma elevação do nível do mar ou de um balanço sedimentar negativo do sistema praiial (SOUZA *et al.*, 2005). Variação do espaço de acomodação de sedimentos que diretamente está relacionado a variação do nível do mar influenciam nos processos de progradação e retrogradação. Para intervalos de curto e médio prazo as taxas de elevação do nível do mar são ínfimas, não sendo considerado o principal agente causador de erosão (MUEHE, 2013). Além de processos naturais como a influência do vento, da subida do nível do mar, ação das ondas, corrente longitudinais e de retorno, atividades humanas afetam de forma significativa as áreas costeiras (SOUZA *et al.*, 2005; BORETTO *et al.*, 2018; GRIGGS; PATSCH, 2019). Por exemplo, a intensa ocupação das zonas costeiras sobretudo na retropraia, bloqueiam o processo *by-pass* de sedimentos que alimentariam a praia sobretudo em períodos chuvosos com sedimentos transportados pela corrente das águas pluviais (Figura 4).

#### 4.5 Conclusões

O estudo revelou, com base em análises feitas de dados fornecidos pelas taxas EPR e LRR, sobre a variação da linha de costa de todo trecho praiial que compreende as praias de Peroba e Redonda, do município de Icapuí, Estado do Ceará, entre os anos 2005 e 2020, que:

A extensão do trecho praiial, de cerca de 5 km, encontra-se no estágio de estabilidade, com uma taxa de variação média cerca de -0,54 m/ano, com os extremos de recuo e avanço atingido -1,46 e +0,07 m/ano. Apesar da estabilidade ocorrida os valores estabelecidos pelos parâmetros EPR e LRR, estão abaixo de zero, mostrando uma clara tendência de processos erosivos e que é importante que se dê atenção aos trechos com ocorrência de altas taxas de retrogradação da linha de costa.

Os resultados fornecidos pela taxa LRR identificam de forma detalhada os trechos mais vulneráveis a ataques de ondas que causam uma erosão sazonal (Figura 14).

Entre 2005 e 2010 a linha de costa recuou cerca de 45,65%, correspondente a 2.450 m de comprimento referente a faixa de praia que sofreu retrogradação; 2010 e 2015 a linha progradou cerca de 35,38% correspondente a uma extensão cerca 1.790 m; 2015 e 2020 a retrogradação foi de 69,17% equivalente a 3.500 m.

A conclusão da obra de proteção costeira existente no setor 2 estabeleceu a fixação da linha de costa neste trecho praial, o que em curto prazo tenha minimizado os impactos resultantes da interação das ondas sobre a costa, que implicava em processos retrogradacionais. Este fator pode ter influenciado nos resultados estabelecidos pelos parâmetros EPR e LRR entre os anos 2005 e 2020.

Em relação à metodologia usada no trabalho, a mesma mostrou-se eficiente na avaliação das taxas de variação da linha de costa, tendo sido facilitado devido a disponibilidade no acesso gratuito a imagens de média resolução espacial para este intervalo temporal. Com isso, não se pode descartar a importância em se aplicar outros métodos para incrementar os resultados alcançados no trabalho. Sugere-se que se dê importância a estudos futuros, a interferência da estrutura de proteção costeira erguida em toda extensão urbanizada da praia de Redonda, e seus impactos na variação do perfil de equilíbrio da praia, considerando as marés e a energia das ondas prevaletentes, visto que a área apresenta trechos de ocorrência de processos erosivos sazonais, resultado das ações de ondas.

## REFERÊNCIAS

AIELLO, A.; CANORA, F.; PASQUARIELLO, G.; SPILOTRO, G. 2013. Shoreline variations and coastal dynamics: A space–time data analysis of the Jonian littoral, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 129. 124–135. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.06.012>

ALBUQUERQUE, M.; ESPINOZA, J.; TEIXEIRA, P.; OLIVEIRA, A. de.; CORRÊA, I.; CALLIARI, L. 2013. Erosion or Coastal Variability: na evaluation of the DSAS and the Change Polygon methods for the determination of erosive processes n sandy beaches. *In: CONLEY, D. C.; MASSELINK, G.; RUSSELL, P. E. and O’HARE, T. J. (eds.). Proceedings 1th International Coastal Symposium (Plymouth, England), Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, p. 1710-1714. ISSN 0749-0208. doi: <https://doi.org/10.2112/SI65-289.1>*

ALFREDINI, P. 2005. Obras e Gestão de Portos e Costas: a Técnica Aliada ao Enfoque Logístico e Ambiental. 1ª ed. Edgard Blücher. São Paulo.



ALMONACID-CABALLER, J.; SÁNCHEZ-GARCÍA, E.; PARDO-PASCUAL, J.E.; BALAGUER-BESER, A.A.; PALOMAR-VÁZQUEZ, J. 2015. Evaluation of annual mean shoreline position deduced from Landsat imagery as a mid-term coastal evolution indicator. *Marine Geology*. 372 (2016) 79-88. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2015.12.015>

BARROS, E.L. Erosão Costeira no Litoral do Município de Icapuí-CE na Última Década: Causas, Consequências e Perspectivas Futuras. Fortaleza. 2018. 254 p. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR – Universidade Federal do Ceará.

BORETTO, G.M.; ROUZAUT, S.; CIOCCALE, M.; GORDILLO, S.; BENITEZ, Y. 2018. La estructura cortical del arco de las Antillas Menores estimada a partir de técnica de funciones receptoras. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V. 35, n. 3. p. 291-306. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.200072902e.2018.3.865>

CÂMARA, I.F.; RODRIGUES DA SILVA, R. 2021. Mapeamento e Evolução da Ocupação Irregular em Falésias do Litoral Leste Cearense, Nordeste do Brasil. São Paulo. UNESP. *Geociências*, v.40. n.4. 1033– 046. doi: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15670>

CLAUDINO-SALES, V.; CARVALHO, A.M. 2014. Dinâmica Costeira Controlada por Promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. *Revista Geociências UNESP*. São Paulo. v.33, n. 4. 579–595.

COSTA, L.R.F.G. Geotecnologias aplicadas ao monitoramento da cobertura sedimentar do litoral de Icapuí (Ceará) entre 1985 e 2018. Fortaleza. 2019. 143 p. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal do Ceará.

DEL RÍO, L.; GRACIA, F.J.; BENAVENTE, J. 2012. Shoreline change patterns in sandy coasts. A case study in SW Spain. *Geomorphology*. 196, 252-266. Puerto Real, Cadiz, Spain. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.027>

DELGADILLO-CALZADILLA, M.A.; MENDOZA, E.; SILVA, R.; GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, J.A.; INFANTE-MATA, D. 2014. Beach erosion in San Benito Chiapas, Mexico: Assessment and possible solution. In: Silva, R., and Strusińska-Correia, A. (eds.), *Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases*. Journal of Coastal Research, Special Issue, No. 71, pp. 114–121. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208. doi: <https://doi.org/10.2112/SI71-014.1>

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare> Acesso em 26/10/2021.

DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. 2009. Coastal Barriers – An Introduction. In: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. (Eds.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Springer, Lecture Notes in Earth Sciences 107, pp. 1–15.

ESTEVEES, L.S. & FINKL, C.W., Jr. 1998. The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. *Journal of Coastal Research*. SI(26). 11-18. Royal Palm Beach (Florida). ISSN 0749-0208.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. [http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Download\\_de\\_series\\_historicas/DownloadChuvasPublico.php](http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Download_de_series_historicas/DownloadChuvasPublico.php). Acesso em 27/03/2021.

GARROTE, J.; DÍAZ-ÁLVAREZ, A.; NGANHANE, H.V.; HEYDT, G.G. 2018. The Severe 2013-14 Winter Storms in the Historical Evolution of Cantabrian (Northern Spain) Beach-Dune Systems. *Geosciences*. 8, 459. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences8120459>

GRAAFF, J.V. and KOSTER, M.J., 1990. Dune and beach erosion and nourishment. In: Pilarczyk, K.W. (editor). *Coastal Protection*. Balkema, Rotterdam. ISBN 9061911273.

GRIGGS, G. & PATSCH, K., 2019. The protection/hardening of California's coast: Times are changing. *Journal of Coastal Research*. 00(0), 000–000. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

HIMMELSTOSS, E.A.; HENDERSON, R. E.; KRATZMANN, M.G.; FARRIS, A.S. 2018. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179, 110p. doi: <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais; Coordenação de Geografia. 2015. Indicadores de desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro. <https://www.ibge.gov.br/biblioteca/visualizacao/livros/liv94254.pdf>. Acesso 28/11/2021.

JAYSON-QUASHIGAH, P-N.; APPEANING ADDO, K.; KUFOGBE, S.K. 2013. Shoreline monitoring using medium resolution satellite imagery, a case study of the eastern coast of Ghana. In: CONLEY, D.C.; RUSSELL, P.E.; O'HARE, T.J. (eds.), *Proceedings 12<sup>th</sup> International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp.511-516; ISSN 0749-0208. doi: <http://dx.doi.org/10.2112/SI65-087.1>

MACÊDO, R.J.A. Caracterização morfodinâmica e geoambiental da praia de Maracaípe, Ipojuca - PE. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Centro de Tecnologias e Geociências – Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2011.

MARENCO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALA, R.C.S.; CUNHA, A.P.; BRITO, S. & MORAES, O.L.L. 2018. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region; *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. Online version ISSN 167826-2690. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>

MARINO, M.T.R.D. & FREIRE, G.S.S. 2013. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. *Revista da Gestão Costeira Integrada*. In: *Journal of Integrated Coastal Zone Management*. 13(1): 113-129.

MASSELINK, G. & SHORT, A.D., 1993. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. *Journal of Coastal Research*. 9(3), 785-800. Fort Lauderdale (Florida). ISSN 0749-0208.

MASSELINK, G.; CASTELLE, B.; SCOTT, T.; DODET, G.; SUANEZ, S.; JACKSON, D.; FLOC'H, F. 2016. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophysical Research Letters*, 43(5). 2135-2143. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL067492>

MEIRELES, A. J. A. & SANTOS, A.M.F. 2012. Atlas de Icapuí - CE. Projeto de Olho na Água. Editora Fundação Brasil Cidadão. 1ª Edição. Fortaleza. 156p.

MEIRELES, A.J.A.; SOUZA, W.F.; LIMA, A.P.S. 2016. Atlas Socioambiental Cartografia Social das Comunidades de Icapuí. Projeto de Olho na Água. Editora Fundação Brasil Cidadão. 1ª Edição. Fortaleza. 153p.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II). Brasília-DF. (s.d.). Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/pngc2\\_78.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/pngc2_78.pdf). Acesso em 12 de Setembro 2019.

MORORÓ, E.A.A.; SILVA, R.M.N.; SOUTO, M.V.S.; DUARTE, C.R.. 2015., Análise de 22 anos (1991 – 2013) da evolução costeira para a porção do litoral cearense, a oeste da cidade de Fortaleza, por meio de imagens históricas da série Landsat. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa-PB. Brasil. 25 a 29 de abril de 2015. INPE.

MOURA, F.M. Análise Geoespacial de Dados Multiespectrais no Estudo Temporal da Linha de Costa da Praia de Parajuru, Ceará – Nordeste do Brasil. Fortaleza. 2018. 178 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Estadual do Ceará.

MUEHE, D. 1998. Geomorfologia Costeira. In: GUERRA, A.J.T. & CUNHA, S.B. (Coordr.). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 3ª ed. BCD União de Editoras S.A. Rio de Janeiro. 254p.

MUEHE, D. 2006. Erosion in the brazilian coastal zone: an overview. *Journal of Coastal Research*. SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium). 43-48. Itajaí, SC. Brazil. ISSN 0749-0208.

MUEHE, D. 2011. Erosão Costeira - Tendência ou Eventos Extremos? O Litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management*. Vol. 11, núm. 3. pp. 315-325 Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos Lisboa, Portugal.

MUEHE, D. 2013. Erosão costeira, mudança do clima e vulnerabilidade. GUERRA, A.J.T. & JORGE, M.C.O. (Coordr.). *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. Oficina de Textos. São Paulo. 161-186p. ISBN 978-85-7975-079-3

NAGDEE, M.R.M.S.; NURSE, L.; INNISS, L.; CHADWICK, A.; JOHNSON, T. 2020. Historical shoreline mapping: Application of the Digital Shoreline Analysis System to the evolution of Worthing Beach, Barbados, following Hurricanes Allen (1980) and Ivan (2004). *Journal of Coastal Research*. 36(2), 313–318. Coconut Creek (Florida). ISSN 0749-0208.

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration. 2021. Disponível em: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Acesso em 23 de Março de 2021.

PILARCZYK, K.W. 1990. Design of seawalls and dikes – Including overview of revetments. In: PILARCZYK, K.W. (editor). *Coastal Protection*. Balkema, Rotterdam. ISBN 9061911273.

PINHEIRO, L.S.; XIMENES NETO, A.R.; MEDEIROS, D.H.M.; PESSOA, P.R.S.; MORAIS, J.O. A Plataforma Continental Semiárida do Brasil. In: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F.M.; PINHEIRO, L.S. (Coordr.) *Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos*. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 129-152. ISBN 978-65-992571-0-0.

PORTELA, J.P.; FREIRE, G.S.S.; MORAES, M.V.A.R.; SILVA, C.A. 2014. Evolução da Morfologia Costeira do Litoral Oeste de Icapuí - CE. *Revista Geonorte, Edição Especial 4, V.10, N.1, p.89-93, 2014*. ISSN 2237-1419.

PUIG, M.; DEL RÍO, L.; PLOMARITIS, T.A.; BENAVENTE, J. 2014. Influence of storms on coastal retreat in SW Spain. *Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa)*. *Journal of Coastal Research*. Special Issue No. 70, pp. 193-198, ISSN 0749-0208.

RANDAZZO, G.; CIGALA, C.; CRUPI, A.; LANZA, S. 2014. The natural causes of shoreline evolution of Capo Peloro, the northernmost point of Sicily (Italy). In: Green, A.N. and Cooper, J.A.G. (eds.), *Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa)*. *Journal of Coastal Research*. Special Issue No. 70, pp. 199-204, ISSN 0749-0208.

SANTOS, M.F. *Geotecnologias para a gestão pública: uma aplicação em Icapuí/CE*. Fortaleza. 2014. 189 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará.

SHETTY, A.; JAYAPPA, K.S.; MITRA, D. 2015. Shoreline Change Analysis of Mangalore Coast and Morphometric Analysis of Netravathi-Gurupur and Mulky-Pavanje Spits. *Aquatic Procedia 4 (2015) 182–189*. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.025>

SILVA, D.S. *Indicadores das oscilações da linha de costa nas praias de Aracaju-SE entre os Anos 2013-2018 e sua relação com as derivações antropogênicas*. São Cristóvão, SE. 2019. 106 p.

Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiental) – Universidade Federal de Sergipe. <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/11222>

SILVA, R.R. Evolução e Vulnerabilidade das Falésias na Costa Leste do Ceará-Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas e Tropicais. Fortaleza. 2021. 160p.

SILVA, A.L.B.; OLIVEIRA, A.R.; MEREILES, A.J.A. Comunidade dividida e o mar avançando: conflito socioambiental em obra de intervenção costeira na Praia de Peroba – Icapuí/Ceará/Brasil. In: MARINHO, A.S.; SILVA, J.F.S.; SILVA, M.H.L.; RAMOS, F.S.N.; MACHADO, A.M.B.; SOUSA, A.C.R.C. (Coordr.). Análise de fragilidades e vulnerabilidades socioambientais. São Paulo. EDUFMA. 2022. p. 143-151. ISBN 978-65-5363-037-6.

SILVA, B.M.F.; SANTOS JÚNIOR, O.F.; FREITAS NETO, O. & SCUDELARI, A.C. 2020. Erosão em Falésias Costeiras e Movimento de Massas do Rio Grande do Norte do Brasil. UNESP. Geociências. São Paulo. 39(2). 447–461.

SILVA NETO, C.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S.; FREIRES, E.V.; SOUSA, W.R.N.; SILVA, M.T. 2020. Caracterização dos setores erosivos e deposicionais da linha de costa de Icapuí (CE) com base em produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. Revista Brasileira de Geografia Física. v.13, n. 01. 143-155.

SOUSA, C.C. Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Pontiguar (NE do Brasil). Natal. 2002. 189 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, P.E. (editores)., 2005. Quaternário do Brasil. 1ª ed. ABEQUA. Ribeirão Preto/SP. pp. 382, il. ISBN 85-86699-47-0.

SOUZA, W.F.; LEITE, N.S.; FARIAS, J.F.; MEIRELES, A.J.A.; SILVA, E.V., 2014. Imagens Multitemporais de Sensores Remotos Aplicadas a Análise da Dinâmica Costeira em Icapuí – Ceará, Nordeste do Brasil. VIII Simpósio Latinoamericano de Geografia Física e IV Simpósio Iberoamericano de Geografía Física. *Eje 2 – Geotecnologías aplicadas a los riesgos y vulnerabilidades*. Santiago (Chile). p. 605-612. <http://viiiisimposiogeografiafisica.uchilefau.cl/>

SOUZA, W.F.; LEITE, N.S.; MEIRELES, A.J.A.; SILVA, E.V. 2016. O Uso de SIG na Análise da Evolução de Linha de Costa Controlada por Promontório: Trecho Entre as Praias de Ponta Grossa e Retiro Grande, Icapuí- Ceará. Volume Especial da Revista da Casa da Geografia de Sobral, Sobral/CE, em parceria com o V Congresso Brasileiro de Educação Ambiental Aplicada à Gestão Territorial, v. 18, n. 2, p. 20-35. 2016. <http://uvanet.br/rcgs>. ISSN 2316-8056.

SUGUIO, K., Geologia Sedimentar. 1ª ed. Blucher. São Paulo. 2003. ISBN 978-85-212-0317-9.

SEMACE – Superintendência Estadual do Meio Ambiente. LABOMAR. Instituto de Ciências do Mar. 2006. Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – Zona Costeira. Fortaleza.

TEIXEIRA, C.P.B.; SOUTO, M.V.S.; PINHEIRO, L.R.S.G.; MATOS, M.F.A.; GOMES, D.D.M. 2021. Análise da Evolução Costeira no Município de Beberibe, Estado do Ceará, entre os Anos de 1979 a 2019. Revista GEOCIÊNCIAS UNESP. 40(3). 1005–1031. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i04.15874>

XIMENES, D.R.B.; SOUTO, M.V.S.; DUARTE, C.R. 2013. Análise multitemporal da linha de costa para avaliação da evolução costeira na região de Icapuí/CE, Nordeste brasileiro, no período de 1984 a 2011. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Foz do Iguaçu-PR. Brasil. 13 a 18 de abril. INPE.

ZHANG, X.; PAN, D.; CHEN, J.; ZHAO, J.; ZHU, Q.; HUANG, H. 2014. Evaluation of Coastline Changes under Human Intervention Using Multi-Temporal High-Resolution Images: A Case Study of the Zhoushan Islands, China. Remote Sensing. 6(10), 9930-9950. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/rs6109930>

## 5 MUDANÇAS MORFOMÉTRICAS ENTRE AS PRAIAS DE PEROBA E REDONDA, REGIÃO DE ICAPUÍ-CEARÁ, BRASIL, APLICANDO IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO OBTIDAS POR AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA ENTRE 2020 E 2021

### RESUMO

Praias são regiões da zona costeira onde os efeitos da interação entre os ecossistemas marinhos, terrestres e atmosféricos, são visualizados com frequência. Os agentes naturais e antrópicos atuam em conjunto nos processos costeiros, que podem resultar na erosão ou acreção. Se a erosão for intensa e contínua representará um grave problema, sobretudo em Praias densamente ocupadas e economicamente importantes, a exemplo das Praias de Peroba e Redonda que vem registrado eventos erosivos. Assim, este trabalho objetivou analisar a variação da linha de costa e o volume de sedimentos Praiais através de uma série histórica de um ano empregando uma aeronave remotamente pilotada, conjugada com análise de sedimentos coletados em campos. Na Praia de Peroba a linha de costa manteve-se estável, tendo variado cerca de 0,87 m/ano, o volume indicou um balanço positivo de sedimentos cerca de 18.815 m<sup>3</sup>. Na Praia de Redonda a linha de costa progradiu cerca de 1,27 m/ano, o volume indicou um balanço negativo de sedimentos na ordem de -1.230 m<sup>3</sup>. As Praias foram caracterizadas majoritariamente por sedimentos de fração areia muito fino e fino. A variação de volume indicou tendências similares à da linha de costa, com maior deposição na porção oeste e erosão a leste.

**Palavras-chaves:** erosão costeira; geoprocessamento; sedimentos; RPA

### ABSTRACT

Beaches are regions of the coastal zone where the effects of interaction between marine, terrestrial and atmospheric ecosystems are often seen. Natural and anthropic agents act together in coastal processes, which may result in erosion or accretion. If the erosion is intense and continuous, it will represent a severe problem, especially in densely occupied and economically significant beaches, such as the beaches of Peroba and Redonda that have registered erosive events. Thus, this work aimed to analyze the variation of the coastline and the volume of beach sediments through a historical series of one year employing a remotely piloted aircraft, conjugated with the analysis of sediments collected in fields. At Peroba beach, the shoreline was stable, having varied by about 0,87 m/year, and the volume indicated a positive sediment balance of about 18815 m<sup>3</sup>. At Redonda beach, the coastline degraded by about 1,27 m/year. The volume indicated a negative sediment balance of -1230 m<sup>3</sup>. The beaches were mainly characterized by sediments of very fine and fine sand fractions. The volume variation indicated similar trends to the shoreline, with more significant deposition in the west and erosion in the east.

**Keywords:** coastal erosion; geoprocessing; sediments; RPA.

## 5.1 Introdução

Praias são áreas da zona costeira que formam uma interface entre o mar e terra firme, tornando-as regiões muito dinâmicas por conta das constantes mudanças (SOUZA *et al.*, 2005; MUEHE, 2013; KIM *et al.*, 2018). Geralmente, as praias são constituídas por sedimentos arenosos e isto as torna muito sensíveis a mudanças topográficas decorrentes da ação direta de energia das ondas, marés, correntes e atividades antrópicas, podendo ser refletidas em processos erosivos ou deposicionais na linha de costa (KALIRAJ *et al.*, 2017).

A dinâmica natural de zonas costeiras conjugadas com ações antrópicas potencializa o problema da erosão, podendo resultar em mudanças topográficas em diferentes escalas de tempo (TAAOUATI *et al.*, 2011; DEL RÍO *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2018). Mudanças na topografia do terreno estão sempre relacionadas a variações de volume e das características granulométricas dos sedimentos que compõem a praia. Neste contexto, a granulometria dos sedimentos que compõem uma praia é de extrema importância para o entendimento dos processos morfodinâmicos, hidrodinâmicos e o tipo de transporte associado à sua deposição (BARROS, 2018; QI *et al.*, 2022).

Levantamentos rápidos aplicando tecnologias atuais como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), tem se mostrado bastante prático no monitoramento costeiro dada sua vantagem em fornecer dados de mudanças geomorfológicas de alta resolução temporal e espacial, além da facilidade em criar produtos aerofotogramétricos, como Modelos Digitais de Elevação (DEMs) e ortofotomosaicos georreferenciados, quando comparados com dados obtidos a partir do método tradicional baseado em imagens de satélite e outras abordagens empregando levantamentos terrestres (CASELLA *et al.*, 2014; GOVAERE *et al.*, 2016; CHEN *et al.*, 2018; DAI *et al.*, 2018; JANUŠAITĖ *et al.*, 2019; JAUD *et al.*, 2019, 2020; JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2019; PAGÁN *et al.*, 2019; PITMAN *et al.*, 2019).

Aquisições repetidas de DEMs de alta resolução permitem um monitoramento costeiro mais acurado, permitindo o cálculo das mudanças volumétricas que ocorrem ao longo do tempo, ilustrando áreas de erosão e acreção de sedimentos assim com a inclinação do terreno (BLANCHARD *et al.*, 2010; DAI *et al.*, 2018; JAUD *et al.*, 2019). Dados espaciais fornecidos por DEMs e ortofotomosaicos, quando conjugados com outros coletados em campo, agregam mais valores na análise de mudanças geomórficas (BLANCHARD *et al.*, 2010; JAUD *et al.*, 2019, 2020). Por exemplo, avaliações detalhadas de taxas de mudança da linha de costa geradas através



de imagens de alta resolução obtidas com RPA, agregam informações robustas para a tomada de decisão no planejamento de zonas costeiras (NAGDEE *et al.*, 2020). Dados de RPA, quando complementados com coleta de sedimentos superficiais em campo para classificação textural, tornam a análise mais robusta para tomada de decisões no gerenciamento costeiro (PITMAN *et al.*, 2019).

No Brasil, destacam-se trabalhos desenvolvidos por Albuquerque *et al.* (2018a; 2018b) na caracterização dos impactos e no gerenciamento de riscos, resultados de eventos extremos de alta energia no extremo sul da costa do Brasil. Silva *et al.* (2019) aplicaram as geotecnologias baseadas em RPA no mapeamento de área erodida da zona costeira no litoral sul do Rio Grande do Norte. Simões e Oliveira (2020) aplicaram dados de RPA no estudo da variação da linha de costa no Balneário Mostardense entre 2016 e 2017. Recentemente Almeida *et al.* (2021) aplicaram a tecnologia de RPA na caracterização da geomorfometria e do comportamento morfológico dos canais de drenagem costeiros no Balneário de Cassino com enfoque na geração do DEM.

Mudanças morfológicas estão sempre associadas à retirada e conseqüente transporte de sedimentos de um ponto para outro (SUGUIO, 2003). Estas alterações podem ocorrer na praia pela troca do espaço de acomodação de um ponto para outro da mesma praia, da praia para a plataforma continental interna e vice-versa, da praia para depósito de dunas ou no sentido contrário (SOUZA *et al.*, 2005; SUGUIO, 2010; BARROS, 2018). Quando estas mudanças resultam em perdas significativas quando comparadas a ganhos podem prejudicar a atividade turística (SOUZA *et al.*, 2005).

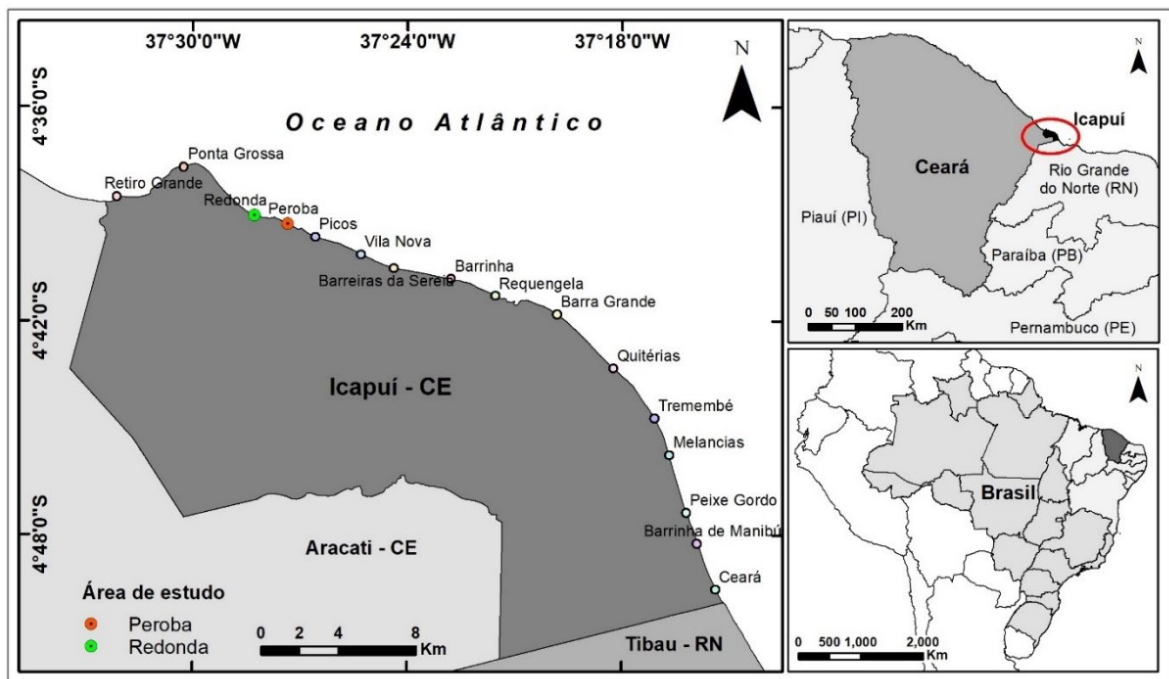
Peroba e Redonda são algumas das áreas turísticas da costa do município de Icapuí, extremo leste do estado do Ceará, onde atualmente são detectadas tendências erosivas na linha de costa já descritas por Meireles e Santos (2012), Portela *et al.*, (2014) e Costa (2019). Esta pesquisa é das poucas já desenvolvidas na área de estudo que conjuga dados adquiridos com RPA e sedimentos coletados em campo no monitoramento costeiro com o objetivo de (1) analisar a variação volumétrica sedimentar estimando a taxa de variação; (2) calcular as taxas de mobilidade da linha de costa; e (3) analisar a distribuição granulométrica dos sedimentos em função de seus parâmetros estatísticos.

## 5.2 Área de estudo

### 5.2.1 Localização da área de estudo

O Município de Icapuí está localizado no extremo leste do litoral costeiro do Estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 17). A área de estudo é constituída por duas praias localizadas a oeste do litoral de Icapuí: Praia de Peroba (mais a leste, aqui denominada de setor 1) e Praia de Redonda (setor 2, mais a oeste) numa extensão de cerca de 5 km.

Figura 17 - Localização da área de estudo no município de Icapuí – Ceará, Nordeste do Brasil.



Fonte: Autor. Elaborado com base em dados cartográficos do IBGE e IPECE

### 5.2.2 Dinâmica costeira local

O regime de chuvas em Icapuí contempla os meses de fevereiro a maio, com média de 1.331,7 mm (MEIRELES; SANTOS, 2012). A temperatura média anual é cerca de 26° C (IPECE, 2007). As temperaturas mais baixas ocorrem durante a quadra chuvosa (PINHEIRO *et al.*, 2016). As direções do vento predominantes no litoral cearense são de SE, ESE, E e NE, com médias de velocidade que chegam a superar os 4,5 m/s nos meses mais secos, podendo alcançar uma

velocidade média acima de 11 m/s, com ocorrência de ventos de SE no período de estiagem, enquanto que na época chuvosa, o cenário inverte-se com aparecimento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), predominando os de NE (MEIRELES; SANTOS, 2012). O vento é um dos principais agentes que ocasiona o surgimento de ondas e o transporte do material sedimentar na área (BARROS, 2018).

As ondas que chegam até a costa de Icapuí são predominantemente do tipo *Sea* – cerca de 80% - com períodos entre 1 a 9 segundos, e 20% do tipo *Swell* com períodos acima de 10 segundos (PINHEIRO *et al.*, 2016). A altura significativa de onda predominante em Aracati, vizinho de Icapuí, Ceará apresenta uma frequência que varia entre 1,3 e 1,73 m (PINHEIRO *et al.*, 2016). Medidas de altura significativa de onda na zona de arrebentação, coletadas nas cinco campanhas de campo, apresentaram valores médios entre 0,8 e 1,0 m com períodos entre 3,72 e 6,56 s.

## 5.3 Material e métodos

### 5.3.1 Aquisição de dados aerofotogramétricos

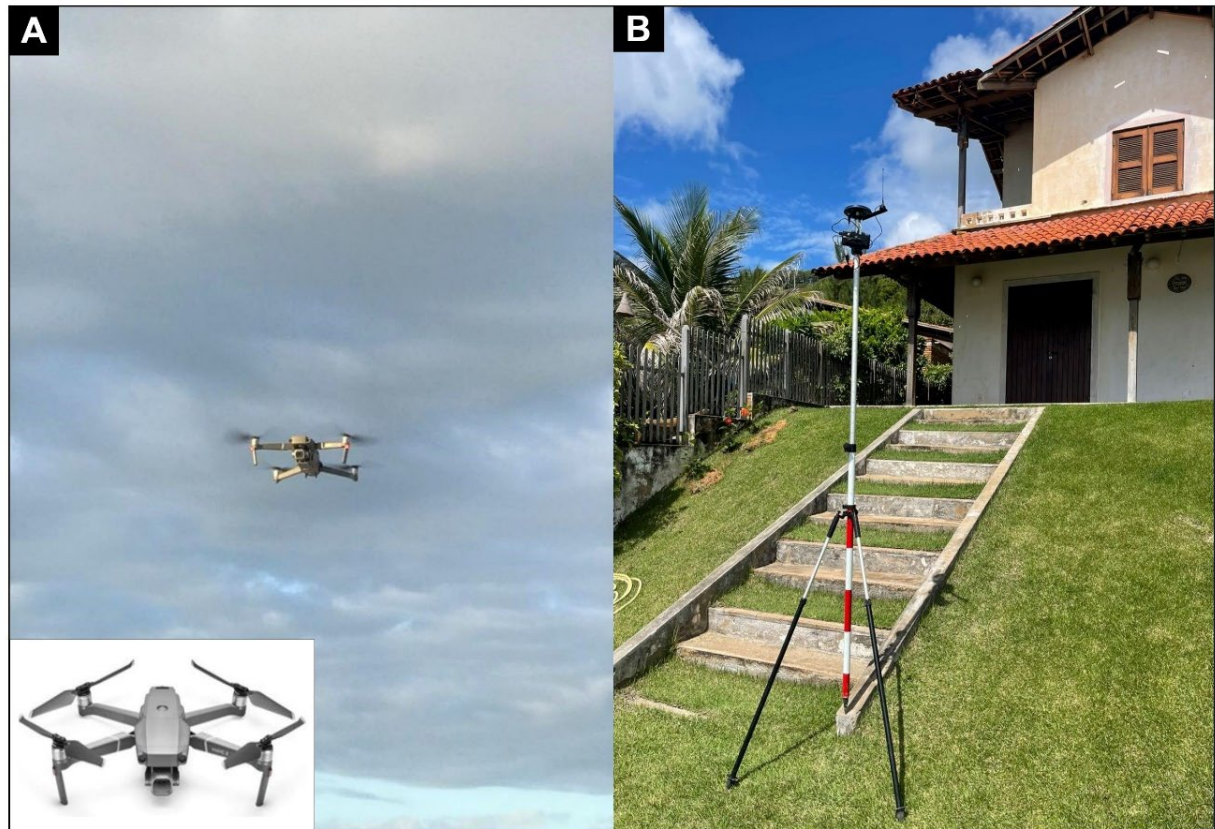
A utilização de uma Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) possibilitou o imageamento da área estudada. Foi utilizado o modelo DJI Mavic 2 Pro. Trata-se de uma aeronave multirrotor, com um peso de 907 g, e que pode operar com segurança até 18 km de distância do rádio transmissor e com uma autonomia de voo de até 31 min sob ótimas condições atmosféricas favoráveis (ver Tabela 7 e Figura 18A). Os dados de RPA têm a vantagem de estarem livres de ruídos como a cobertura de nuvens quando comparados com imagens de satélite. Com o auxílio de um receptor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) em modo *Real Time Kinematic* (RTK) foram adquiridos pontos de controle distribuídos na área de estudo para georreferenciamento dos produtos e avaliação da acurácia do método (Figura 18B).

Tabela 7 - Especificações do sensor usado no levantamento dos dados planialtimétricos.

Modelo de Câmera	Resolução	Comprimento Focal	Tamanho de Pixel
L1D-20c (10,26 mm)	5.472 x 3.648	10,26 mm	2,41 x 2,41 um

Fonte: Autor.

Figura 18 - Coleta de dados em campo. A) Levantamento para coleta de dados aerofotogramétricos com RPA; B) Coleta de dados de pontos de controle com receptores GNSS.



Fonte: Autor.

Os pontos foram usados no georreferenciamento das imagens com vista a maximizar a acurácia do levantamento. Pontos de controle são importantes para definir a precisão no posicionamento das imagens obtidas em campo (ALBUQUERQUE *et al.*, 2018a; PAGÁN *et al.*, 2019). Os pontos foram processados com base no Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), para posterior fotoidentificação das imagens, com vista a reduzir o *Root Mean Square Error* (RMSE) na geração dos produtos aerofotogramétricos, destacando-se o Modelo Digital de Superfície e o Ortofotomosaico.

O processo de planejamento de voo é um estágio crítico no levantamento fotogramétrico, pois é a primeira etapa do trabalho e normalmente envolve uma integração entre as demandas de espaço, cobertura e escala fotográfica (BRASINGTON *et al.*, 2003). Este processo demandou um campo de reconhecimento da área de estudo, onde a geomorfologia da área contribuiu para a definição da altura mínima dos voos.

O planejamento dos voos, foi feito a partir do uso do aplicativo móvel *Map Pilot*, onde foram definidos altura do voo, área de sobrevoo por setor, sobreposição entre imagens e faixas, ângulo de incidência da câmera e altitude. As alturas dos voos foram fixadas em 120 m, cobrindo cerca de 5 km de costa. Nos aerolevantamentos, muitas vezes recomenda-se aplicação de sobreposição frontal de pelo menos 75% e 60% para sobreposição lateral (JANUŠAITĖ *et al.*, 2019). Alguns autores aplicam a sobreposição lateral de 70% e 80% (JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2019; EICHMANN; SCHÜTTRUMPF, 2021). Neste trabalho, foi aplicado a sobreposição lateral e frontal de 75%.

Foram realizados cinco campos de coletas de dados, espaçados por um período de três meses entre agosto de 2020 e agosto de 2021 (ver Tabela 8). Os voos levantados foram projetados para tomarem a direção perpendicular em relação a linha de costa, cobrindo principalmente a zona de surf, praia e retropraia, tendo se estendido para a área residencial a beira mar, pois os pontos de controle foram materializados nestas regiões. A pilotagem foi no modo automático, previamente programado antes do campo. As condições meteorológicas e oceanográficas (vento, precipitação e a maré) foram levadas em consideração antes dos voos. Neste contexto, foi necessário que o vento estivesse favorável, ausência de chuva e uma maré baixa de sizígia para uma maior abrangência de todas as feições do ambiente praial.

Tabela 8 - Setores, número de imagens e data dos voos.

Site 1		Site 2	
Imagens	Data dos voos	Imagens	Data dos voos
487	19 de agosto de 2020	782	20 de agosto de 2020
470	17 de novembro de 2020	797	18 de novembro de 2020
490	11 de fevereiro de 2021	772	12 de fevereiro de 2021
520	27 de maio de 2021	802	28 de maio de 2021
703	24 de agosto de 2021	1.005	23 de agosto de 2021

Fonte: Autor.

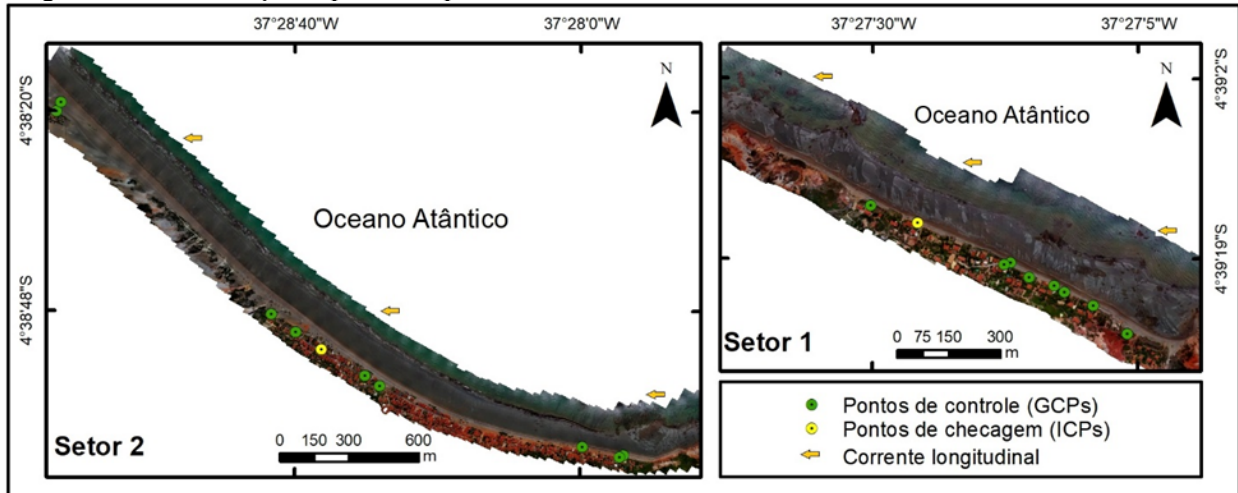
### 5.3.2 *Processamento de dados aerofotogramétricos*

O processamento iniciou com a filtragem manual de todas as imagens coletadas em campo, onde foram removidas as fotos não verticais e borradas de modo a possibilitar a construção do ortofotomosaico com base apenas em fotos a nadir. Tais fotografias são aquelas em que o ângulo entre a linha do horizonte e a lente da câmera é de  $90^\circ$ , com uma tolerância de três graus para mais ou menos (SIMÕES; OLIVEIRA, 2020).

As imagens selecionadas foram inseridas e processadas no *software* Agisoft Metashape Pro, baseado em algoritmos SfM (*Structure from Motion*) e a correlação densa de imagens, possuindo ferramentas que facilitam o processo de criação do DEM, ortofotomosaico e demais produtos associados, permitindo a construção da topografia costeira em 3D a partir de uma imagem 2D (CHEN *et al.*, 2018; DAI *et al.*, 2018; JAUD *et al.*, 2019; JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2019; PAGÁN, *et al.*, 2019; PITMAN *et al.*, 2019; SIMÕES; OLIVEIRA, 2020; EICHMANN; SCHÜTTRUMPF, 2021). O advento de algoritmos baseados em SfM, inovou a área de levantamentos topográficos tridimensionais, oferecendo de forma ágil a geração de nuvens de pontos 3D através de aquisições com custos acessíveis (SMITH *et al.*, 2015).

Para tornar possível a comparação entre os mosaicos produzidos e melhorar a acurácia dos dados, estes devem passar por dois processos: registro e georreferenciamento (SIMÕES; OLIVEIRA, 2020). Para este caso foi realizado o processo de fotoidentificação, onde os dados de pontos de controle materializados e coletados em campo a partir de receptores GNSS foram identificados nas fotografias (Figura 19). O georreferenciamento e processamento, foi único para os dois setores, tendo resultado no Erro Médio Quadrático – *RMSE* dos pontos de controle e de verificação, que foram inferiores a 3 e 2 cm, respectivamente.

Figura 19 - Distribuição espacial de pontos de controle nos dois setores.



Fonte: Autor.

### 5.3.3 Análise de mudança geomórfica

Os DEMs extraídos foram transferidos para o ArcMap, um componente do *software ArcGIS* da ESRI. Foi definida uma área comum a todos os levantamentos para recorte dos DEMs e posterior aplicação do método de *Difference of DEM (DoD)* usando a função *Cut Fill tool*. A partir dos DoDs gerados, foi possível especializar a variação do volume com melhor representatividade (JAUD *et al.*, 2019). O método de avaliação da variação morfológica através de geração de DoDs foi baseado nas aplicações de Brasington *et al.* (2003); Wheaton *et al.* (2010); Jaud *et al.* (2019) e Jayson-Quashigah *et al.* (2019), e consiste na diferença de elevações entre o DEM recente pelo anterior (Equação 1):

$$\Delta DEM = Z_{post} - Z_{prev} \quad (1)$$

onde  $\Delta DEM$  é o DoD,  $Z_{post}$  é o DEM recente e  $Z_{prev}$  é o DEM anterior.

O RMSE total individual resultado do processamento de imagens para os dois setores foi usado como a incerteza para cada DEM gerado. Os erros individuais dos DEMs podem ser propagados para o DoD, constituindo-se o erro total (BRASINGTON *et al.*, 2003; LANE *et al.*, 2003; WHEATON *et al.*, 2010; CHEN *et al.*, 2018), e podem ser estimados com base na Equação 2.

$$\delta u = \sqrt{\delta z_2^2 + \delta z_1^2} \quad (2)$$

onde  $\delta u$  é o erro propagado para o DoD,  $\delta z_1$  é o erro do DEM do período antecedente e  $\delta z_2$  é o erro do DEM do período posterior.

A estimação do volume e de área de mudança morfológica são extremamente sensíveis ao mínimo limite de detecção (minLoD) (WHEATON *et al.*, 2010). Este erro propagado foi usado como um nível mínimo de limite de detecção (minLoD) para distinguir as mudanças de superfície reais do ruído inerente (BRASINGTON *et al.*, 2003; WHEATON *et al.*, 2010; JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2019).

#### 5.3.4 *Mudança anual da linha de costa*

As linhas de costa foram vetorizadas manualmente com base nas ortofotos obtidas em campo entre agosto de 2020 e agosto de 2021, considerando a marca de contraste entre as faixas úmida e seca na maré de sizígia, base de falésias ativas, escarpas erosivas e bases de estruturas de proteção costeira seguindo o método já aplicado por Del Río *et al.* (2012) e Jayson-Quashigah *et al.* (2013).

Foi aplicado o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) para analisar as mudanças na linha de costa. Para obter o melhor detalhamento das mudanças ocorridas no período analisado, foi definido um distanciamento de 10 m entre os transectos gerados (JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2013; SILVA NETO *et al.*, 2020). A taxa de variação da linha de costa foi obtida aplicando a estatística de regressão linear (LRR). Este parâmetro considera todas as linhas que os transectos cruzam, permitindo que os transectos lançados sejam analisados de forma individualizada (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018). O RMSEs do posicionamento das linhas de costa foi estimado com base nos erros individuais de cada processamento de imagem, que pode ser calculada através da equação 3 (JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2013).

$$E = \left( \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2} \right) * T^{-1} \quad (3)$$

onde  $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$  corresponde aos erros de posição individual da linha de costa e T é o intervalo de tempo em análise (AIELLO *et al.*, 2013; JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2013).



### 5.3.5 *Análise do tamanho do grão de sedimento*

Foram coletadas 102 amostras superficiais de sedimentos em cinco campanhas de campo no período de 12 meses. As amostras estavam distribuídas nas zonas retropraia, praia e antepraia de nove pontos de monitoramento nas praias de Peroba e Redonda. Em campo, as amostras foram coletadas usando uma espátula, a uma profundidade de 10 a 15 cm. Na análise granulométrica foram usadas as peneiras de 2,000, 1,000, 0,500, 0,250, 0,125 e 0,062 mm segundo os limites texturais estabelecido por Wentworth (1922). Os resultados da granulometria foram inseridos no *software* ANASED de análise sedimentar, onde foram calculados os parâmetros estatísticos baseados no modelo tradicional de distribuição de Folk e Ward (1957).

## 5.4 Resultados

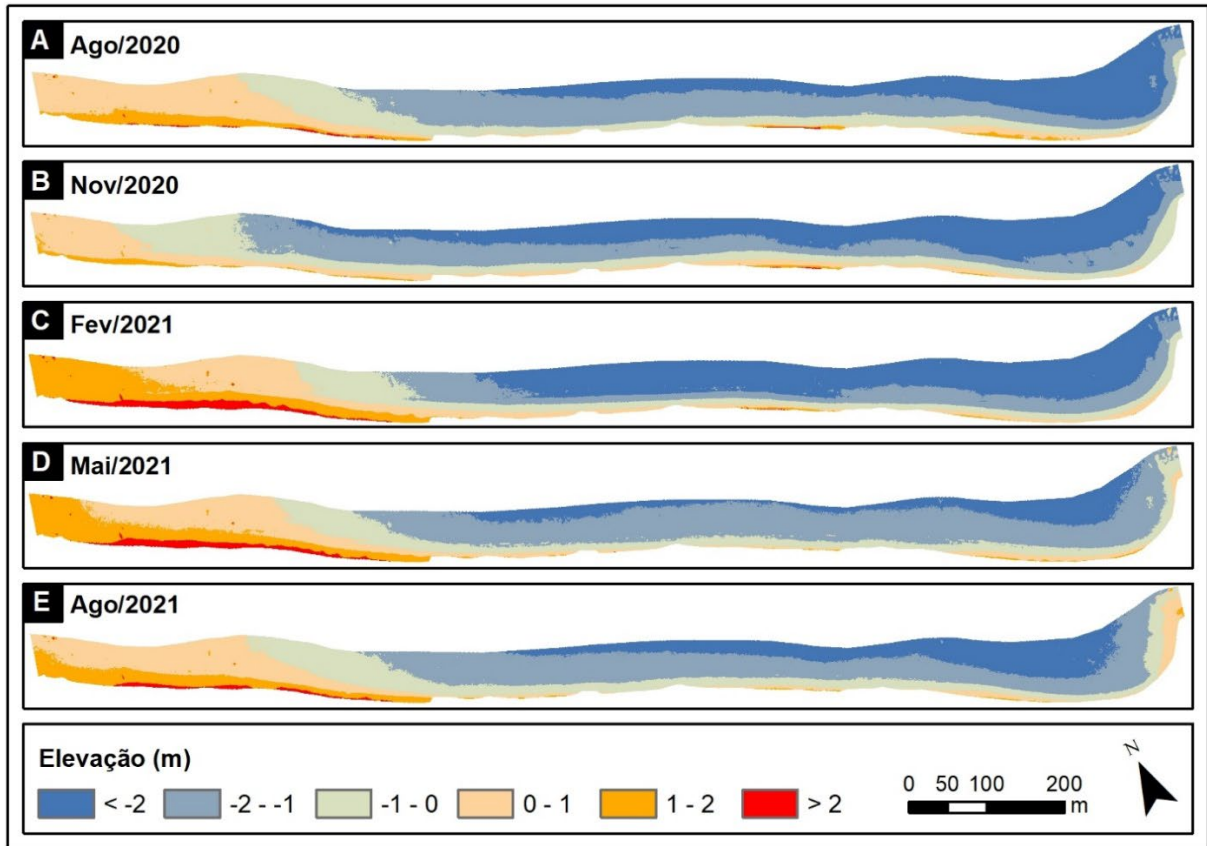
Foram gerados o total de cinco DEMs com resoluções inferiores a 24 cm. As ortofotos apresentaram resoluções inferiores a 3 cm. A alta resolução permitiu uma melhor visualização dos detalhes dos produtos gerados, tornando-se um papel preponderante no cálculo de volume e análise de mudança da linha de costa.

### 5.4.1 *Mudanças morfológicas no Setor 1 (Praia de Peroba)*

#### 5.4.1.1 Variação do volume de sedimento

A praia de Peroba tem cerca de 1.570 m de extensão, e a área analisada foi cerca de 96.466 m<sup>2</sup>. As variações altimétricas ocorridas em um ano, indicam altimetrias entre -4,7 e 3,8 m (Figura 20). O setor é caracterizado pela ausência de praia recreativa em períodos de maré alta devido à total ocupação da zona de retropraia.

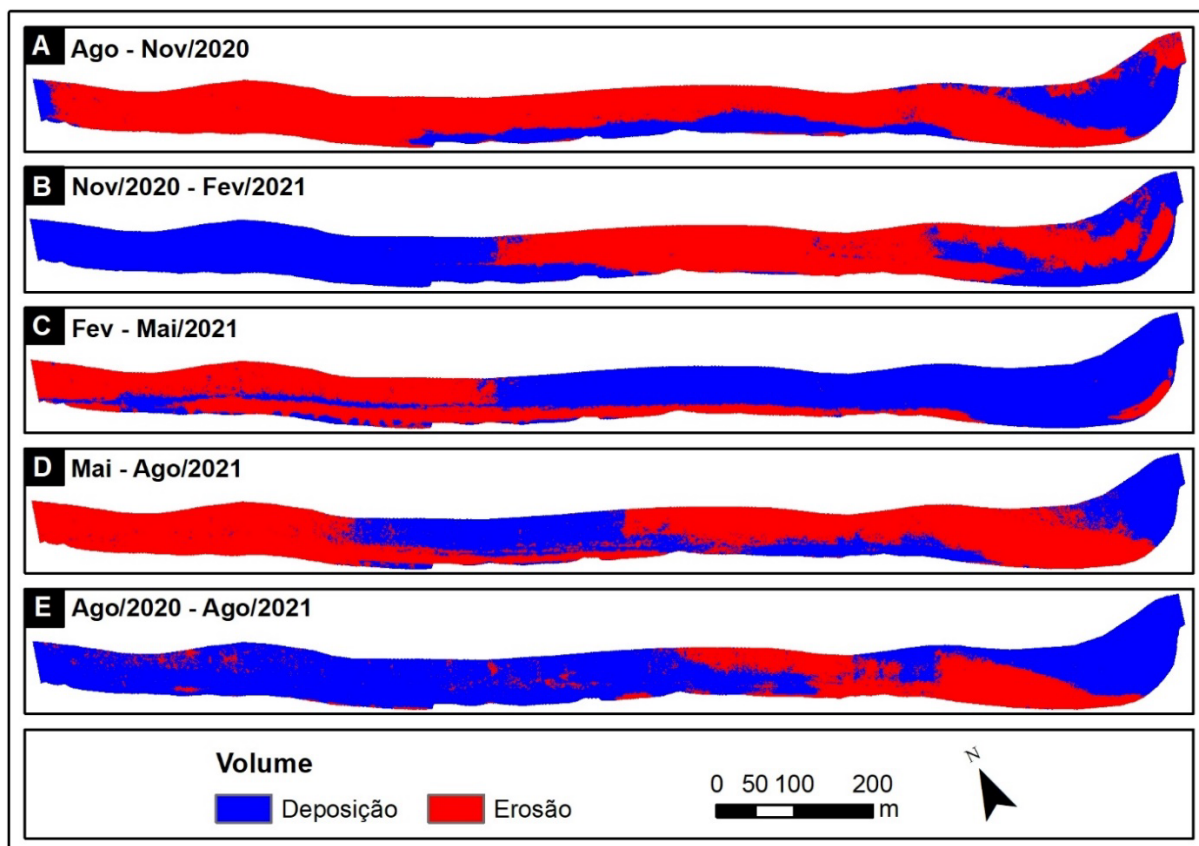
Figura 20 - DEMs individuais de cinco períodos, gerados a partir de dados coletados na praia de Peroba (setor 1).



Fonte: Autor.

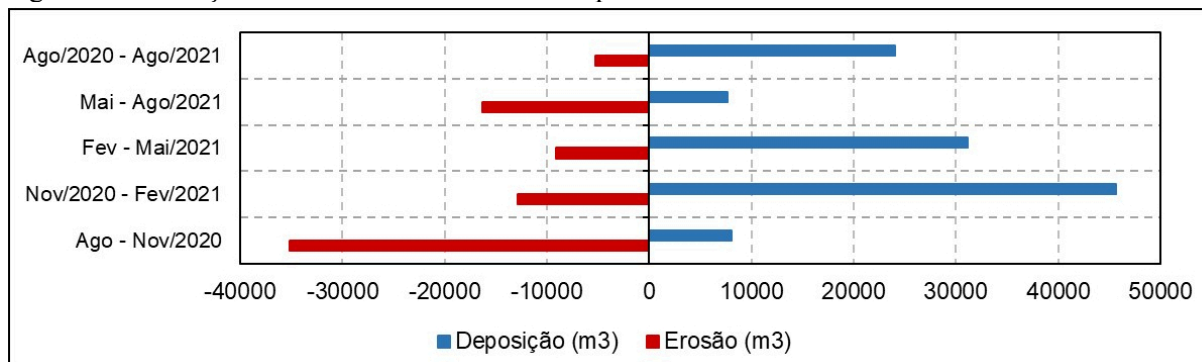
Os resultados da variação do volume para praia de Peroba indicaram um balanço positivo de 32% de sedimentos ganhos em todo período analisado entre agosto de 2020 e agosto de 2021, na ordem de  $18.815 \text{ m}^3$  a uma taxa mensal estimada em  $1.568 \text{ m}^3/\text{mês}$ . Neste período o volume de sedimentos depositado foi calculado em cerca de  $24.059 \text{ m}^3$  e erodidos em  $-5.244 \text{ m}^3$ , o desequilíbrio entre entrada e saída de sedimentos foi de aproximadamente 32%, onde cerca de 75% da praia experimentou deposição (Figuras 21E e 22). No período entre agosto e novembro de 2020, a praia passou um por processo erosivo com perda de sedimentos calculada em  $-27.061 \text{ m}^3$  (Figura 21A e 22). Os períodos entre novembro de 2020 e fevereiro de 2021 e fevereiro e maio de 2021 registraram sucessivas deposições de sedimentos estimados em  $32.235$  e  $22.042 \text{ m}^3$ , respectivamente (Figura 21B, C, e 22). Já no último período, entre maio e agosto de 2021, o balanço foi negativo na ordem de  $-8.620 \text{ m}^3$  (Figura 21D e 22).

Figura 21 - Representação espacial de variação do volume de sedimentos erodido e depositado na praia de Peroba.



Fonte: Autor.

Figura 22 - Variação de volume de sedimentos na praia de Peroba.

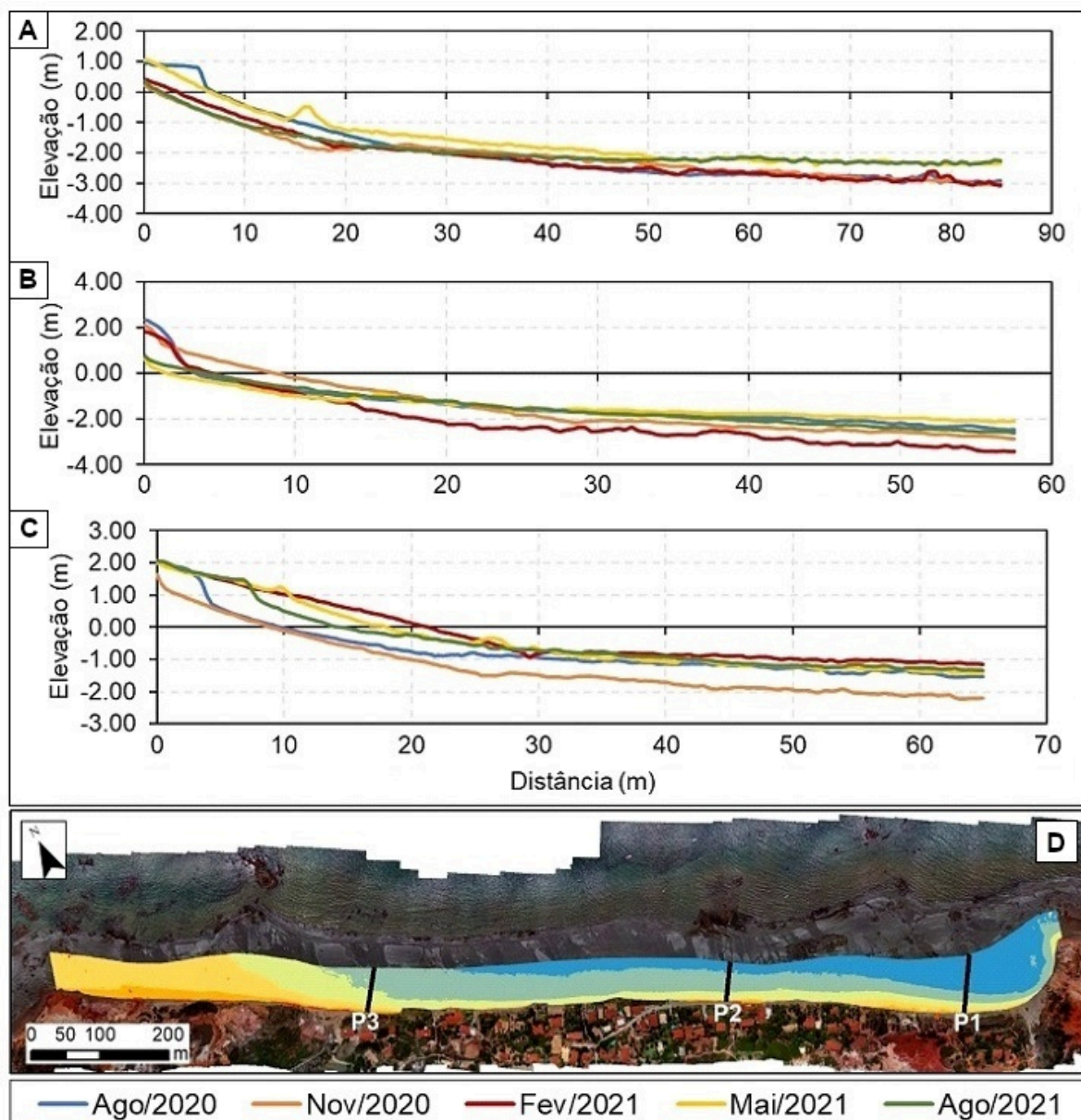


Fonte: Autor.

As variações em volume ocorridas na praia de Peroba também são refletidas nas séries de perfis topográficos gerados a partir dos DEMs (Figura 23). As variações ocorridas no extremo leste da praia de Peroba apontaram que os sedimentos erodidos próximos à linha de costa podem ter sido remobilizados e depositados em sentido ao mar (Figura 23A). Perdas acima de um metro

ocorreram junto à linha de costa no trecho central da praia (Figura 23B), enquanto que no extremo oeste ocorreram deposições mais intensas em áreas próximas à linha de costa (Figura 23C).

Figura 23 - Perfis perpendiculares a linha de costa mostrando variações altimétricas ao longo da praia de Peroba entre agosto de 2020 e agosto de 2021. A) Perfil P1; B) Perfil P2; C) Perfil P3; e D) Localização dos perfis.



Fonte: Autor.

#### 5.4.1.2 Variação da linha de costa entre agosto/2020 e agosto/2021

A Tabela 9 aponta que no período entre agosto de 2020 e agosto de 2021 a taxa de variação da linha de costa de curto prazo na praia de Peroba foi estimada em 0,87 m/ano.

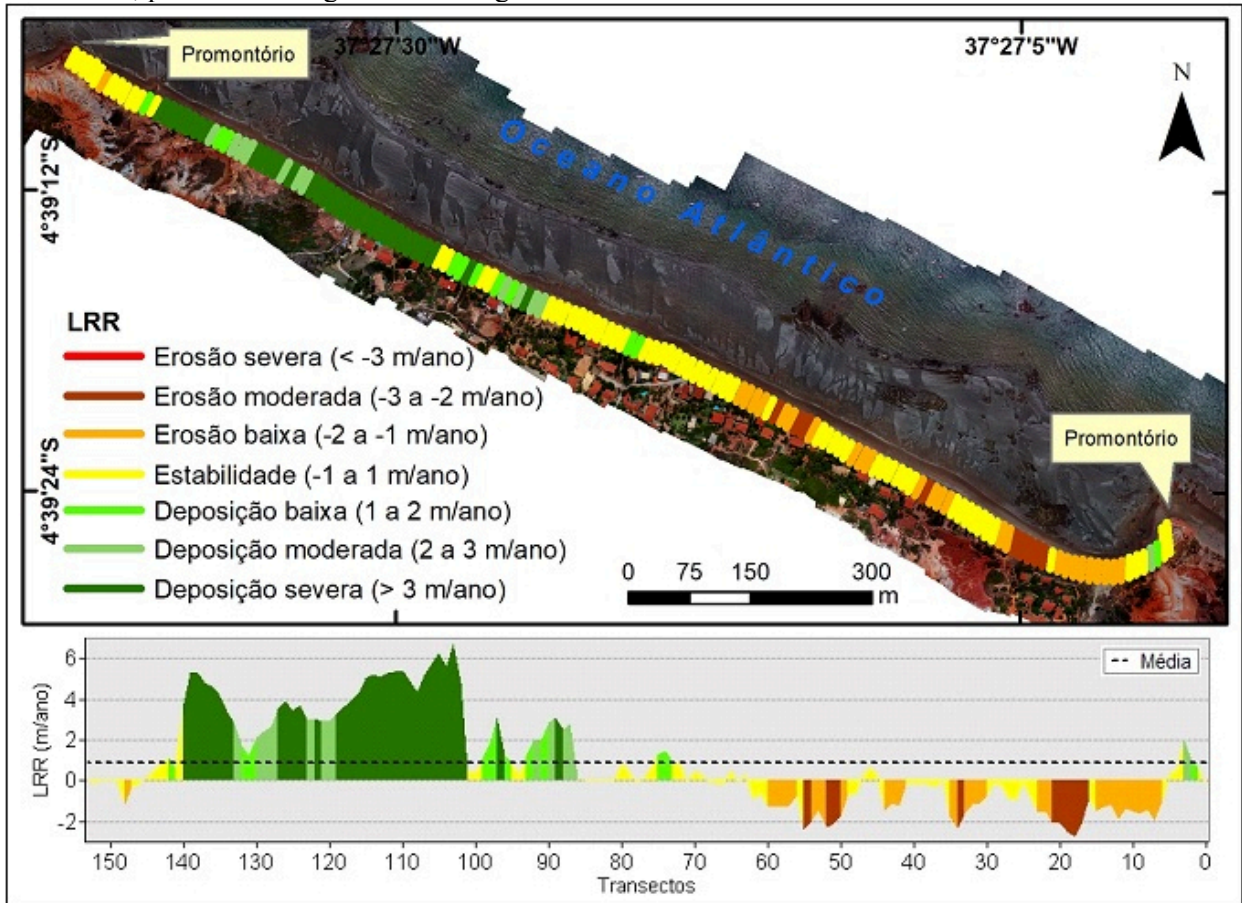
Tabela 9 - Taxas de variação e movimento linear da linha de costa para o setor 1 (Praia de Peroba), período entre agosto de 2020 e agosto de 2021.

Parâmetro	Mín	Med	Máx	Desvio padrão
LRR (m/ano)	-2,74	0,87	6,72	±2,28
NSM (m)	-6,01	0,32	6,18	±2,59

Fonte: Autor.

Em geral, a taxa média de variação estabelecida a partir da estatística de regressão linear, apontou para estabilidade na linha de costa. A aparente estabilidade vem corroborar a estabilidade identificada por Silva Neto *et al.* (2020) quando analisaram a mobilidade da linha de costa aplicando imagens de satélite em intervalos acima de 10 anos no litoral de Icapuí. Na Figura 24, é visível que as maiores taxas de retrogradação da linha de costa foram registradas no trecho leste da praia e as maiores taxas de progradação no trecho oeste.

Figura 24 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa aplicada ao parâmetro LRR na praia de Peroba, período entre agosto/2020 e agosto/2021.



Fonte: Autor.

#### 5.4.1.3 Relação volume da praia com a dinâmica da linha de costa na praia de Peroba

Neste setor, os resultados da variação do volume indicaram tendências similares à da linha de costa (Figura 21E e 24). Em todo período analisado o balanço sedimentar de variação do volume e taxa de variação da linha de costa foram positivos, com valores de 18.815 m<sup>3</sup> e 0,87 m/ano respectivamente. Apesar da média de variação da linha de costa apresentar valor que se enquadra na classe de estabilidade, perda de sedimentos no extremo leste da praia resultaram no recuo da linha de costa em até 6 m (Tabela 9).

Os eventos erosivos no trecho leste da praia de Peroba estão ameaçando a destruição de residências (Figura 25B, C, E e F). Este processo tem impulsionado intervenções humanas diretas com construções de estruturas de contenção de erosão na base de madeira em trechos localizados da praia (Figura 25B-F). Estas ações contribuem na estabilização temporária da linha

de costa. Em contrapartida ocorreram deposições no trecho oeste que resultaram na progradação da linha de costa em até 6 m (Tabela 9). Estas deposições ocorrem devido a um cenário cíclico de períodos antecidos de erosão e posterior deposição na área conforme identificado por Costa (2019). Estes eventos cíclicos segundo Silva e Oliveira *et al.* (2022) podem estar relacionadas à causa na origem da divisão de opiniões em relação a construção de uma obra de proteção costeira na área em que uma parte da comunidade local se opõe e outra é a favor. Estas duas realidades segundo Jayson-Quashigah *et al.* (2019) sugerem a adoção de uma abordagem de gestão sustentável do sistema praial de modo a aumentar a resiliência do mesmo e de seus usuários.

Figura 25 - Mosaico de imagens representando trechos erosivos e deposicionais. A) Visão leste da praia de Peroba; B e C) Vistas diferentes do mesmo trecho erodido com estruturas de proteção costeira de madeira e reposição do acesso que havia sido destruído; D e E) Mesmo trecho de praia onde a primeira imagem de agosto de 2020 com cota maior e a segunda de agosto de 2021 com cota mais baixa devido à perda de sedimento; F) Escarpa erosiva, controlada pela comunidade com constantes reposições de sedimentos no sentido de manter o acesso as demais infraestruturas que se encontram a leste da praia; e G-I) Imagens no ponto de levantamento do perfil P3 em três períodos, a primeira em agosto de 2020 (G), segunda em novembro de 2020 (H) e a terceira em agosto de 2021 (I).



Fonte: Autor.

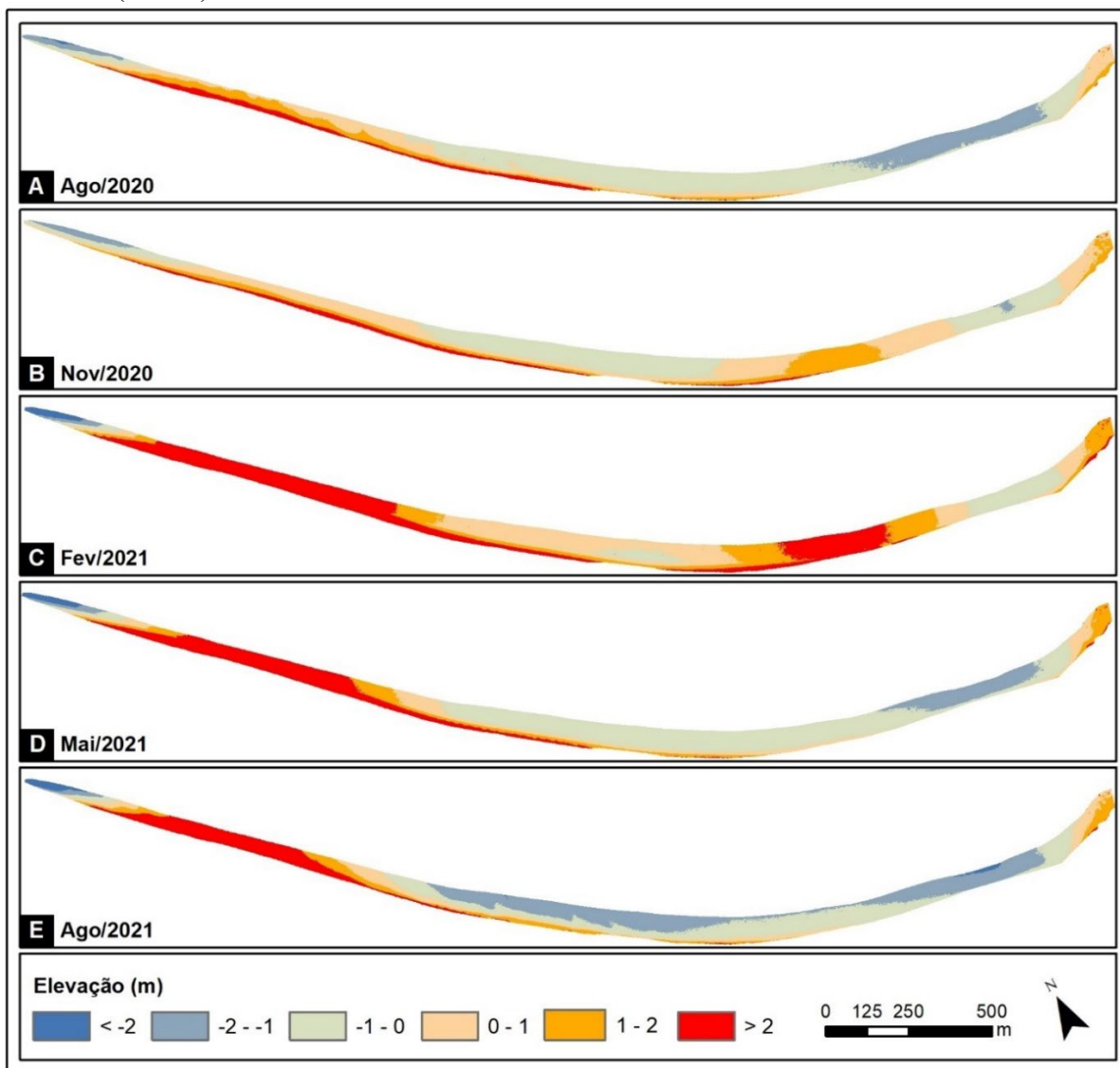


## **5.4.2 Mudanças morfológicas no Setor 2 (Praia de Redonda)**

### **5.4.2.1 Variação do volume de sedimento**

O setor 2 é representado por duas características distintas. O trecho leste é ausente de praia recreativa em períodos de maré alta de sizígia, com retropraia completamente ocupada por residências e pousadas. Já o trecho a oeste é praticamente desocupado por ser uma área conservada integrante da reserva ambiental que se estende até a praia de Ponta Grossa, situada mais a oeste da área. Neste setor a área analisada foi cerca de 214.321 m<sup>2</sup>. As variações altimétricas ocorridas no período analisado, indicaram altimetrias entre -4,7 e 8,2 m (Figura 26).

Figura 26 - DEMs individuais de cinco períodos, gerados a partir de dados coletados na praia de Redonda (setor 2).

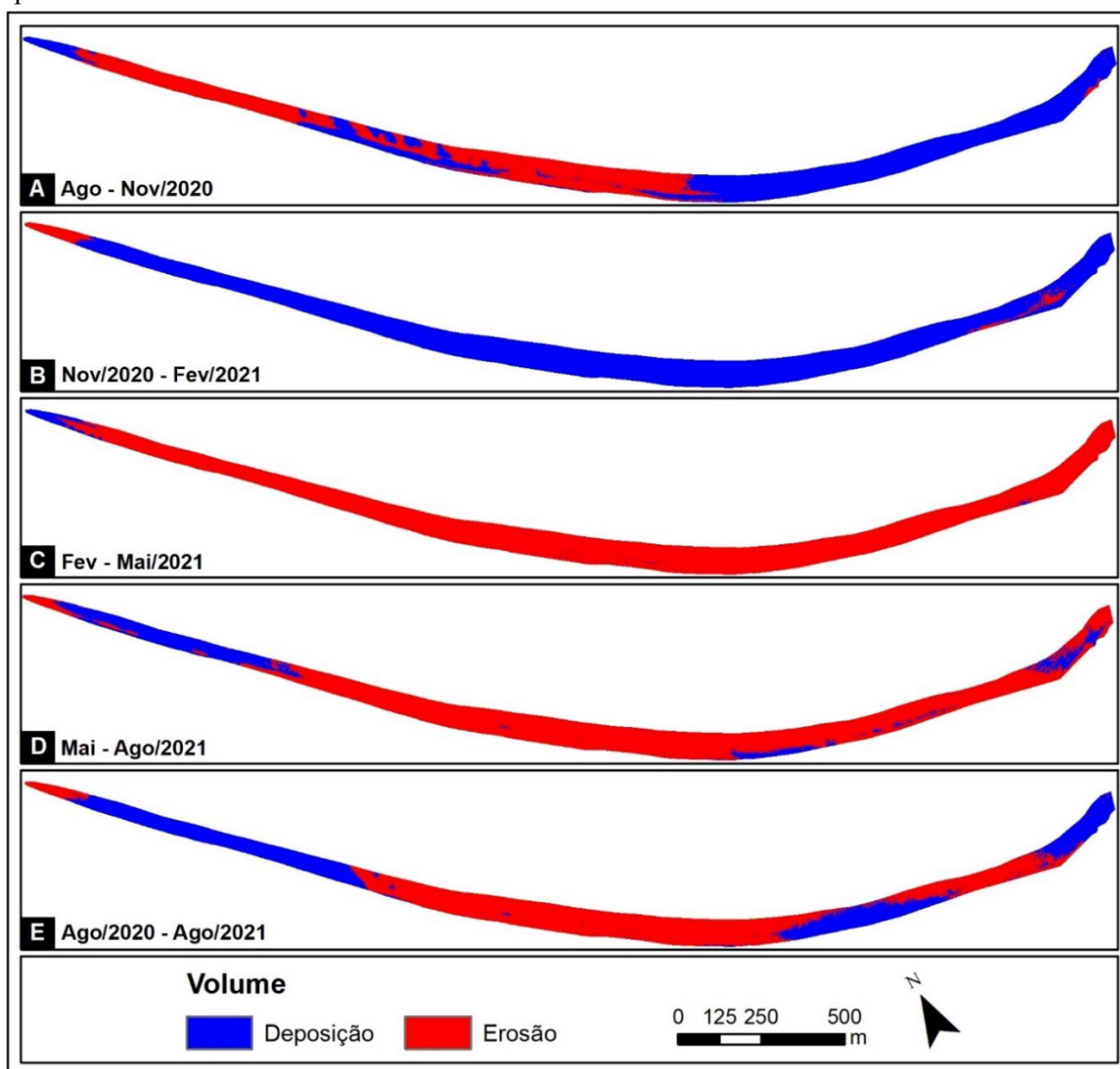


Fonte: Autor.

Durante o período analisado a praia de Redonda obteve um balanço sedimentar negativo estimado em  $-1.230 \text{ m}^3$  o equivalente a uma taxa mensal cerca de  $-103 \text{ m}^3/\text{mês}$ . Foram depositados cerca de  $72.719 \text{ m}^3$  e erodidos cerca de  $-73.950 \text{ m}^3$  (Figura 27E e 28) onde o desequilíbrio entre deposição e erosão foi de apenas 0,4%. De uma forma geral, este valor aponta que em um ano a quantidade de sedimento erodido na praia de Redonda foi proporcional ao sedimento depositado. Os primeiros dois períodos entre agosto e novembro de 2020, novembro de 2020 e fevereiro de 2021 foram marcados por sucessivas deposições com ganho de sedimentos estimado em  $73.023$  e  $247.638 \text{ m}^3$ , respectivamente (Figura 27A, B, e 28). Processos inversos

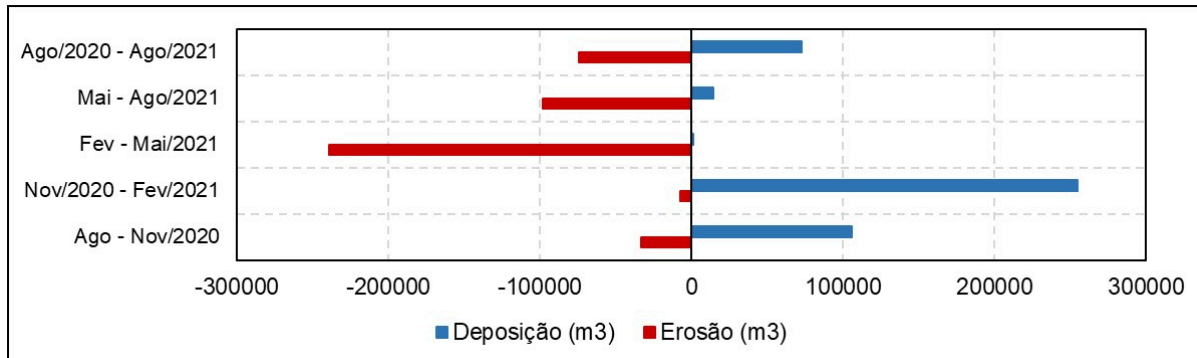
ocorreram nos dois últimos períodos entre fevereiro e maio de 2021 e entre maio e agosto de 2021 quando as perdas de sedimentos foram estimadas em  $-238.054$  e  $-83.424$   $m^3$ , respectivamente (Figura 27C, D, e 28).

Figura 27 - Representação espacial de variação do volume de sedimentos erodido e depositado na praia de Redonda.



Fonte: Autor.

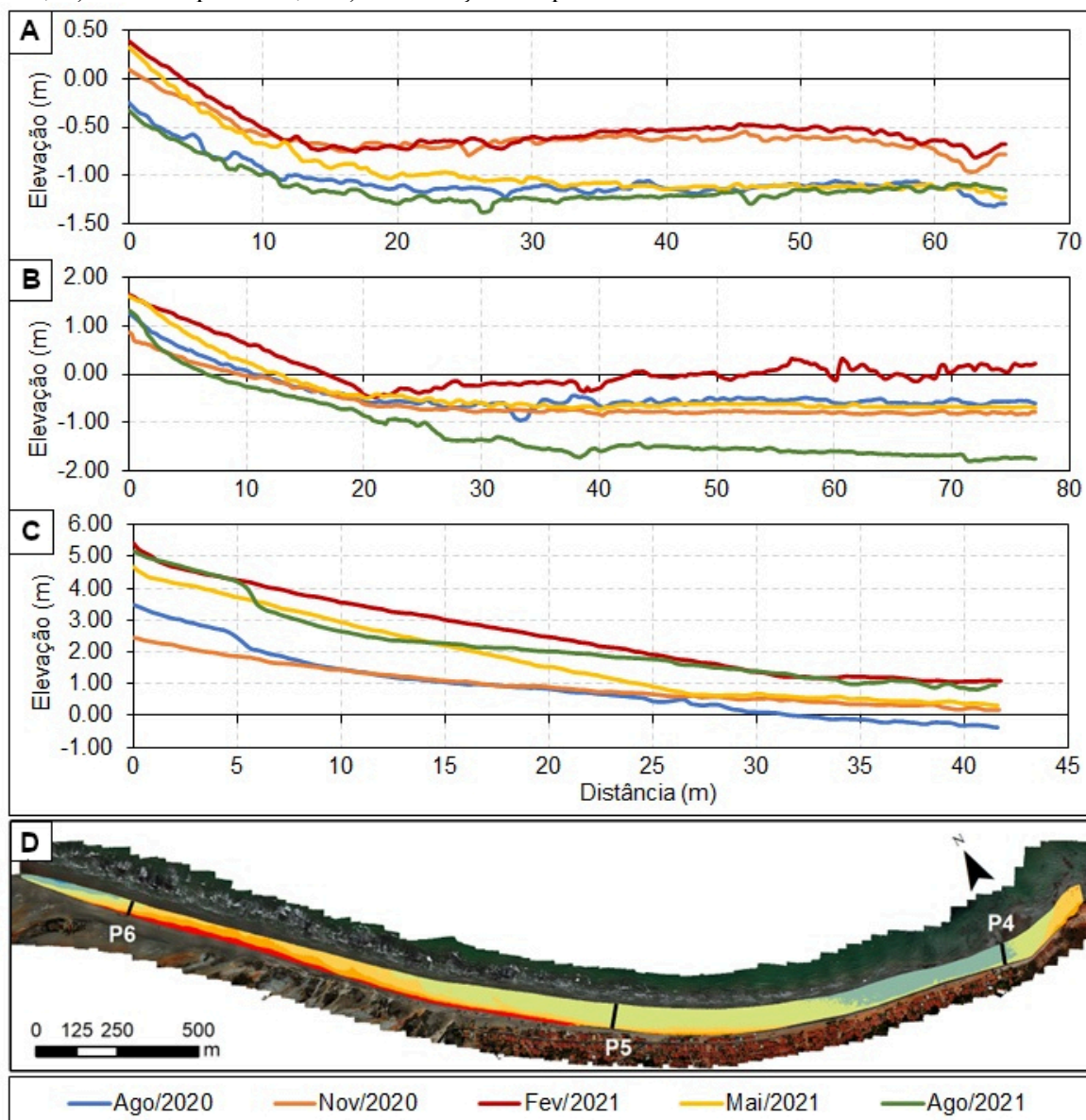
Figura 28 - Variação de volume de sedimentos na praia de Redonda.



Fonte: Autor.

Deposições de sedimentos ocorridas na porção oeste da praia também foram refletidas nos perfis topográficos, onde variações superiores a um metro ocorreram entre agosto de 2020 e agosto de 2021, tendo resultado no movimento da linha de costa em direção ao mar (Figura 29C). No mesmo período, a erosão ocorrida nos trechos leste e central da praia também resultou em variações superiores a um metro (Figura 29A, B).

Figura 29 - Perfis perpendiculares a linha de costa mostrando variações altimétricas ao longo da praia de Redonda entre agosto de 2020 e agosto de 2021. A) Perfil no ponto P4; B) Perfil no ponto P5; C) Perfil no ponto P6; e D) Localização dos perfis.



Fonte: Autor.

#### 5.4.2.2 Variação da linha de costa entre agosto/2020 e agosto/2021

A Tabela 10 indica que entre agosto de 2020 e agosto de 2021 a taxa de variação da linha de costa de curto prazo no setor 2 foi estimada em uma média 1,27 m/ano, com maior retração estimada em -2,89 m/ano e maior atração em cerca de 6,04 m/ano. No subsetor leste da praia foi onde ocorreu o registro de estabilidade na linha de costa e no subsetor oeste ocorreram as maiores

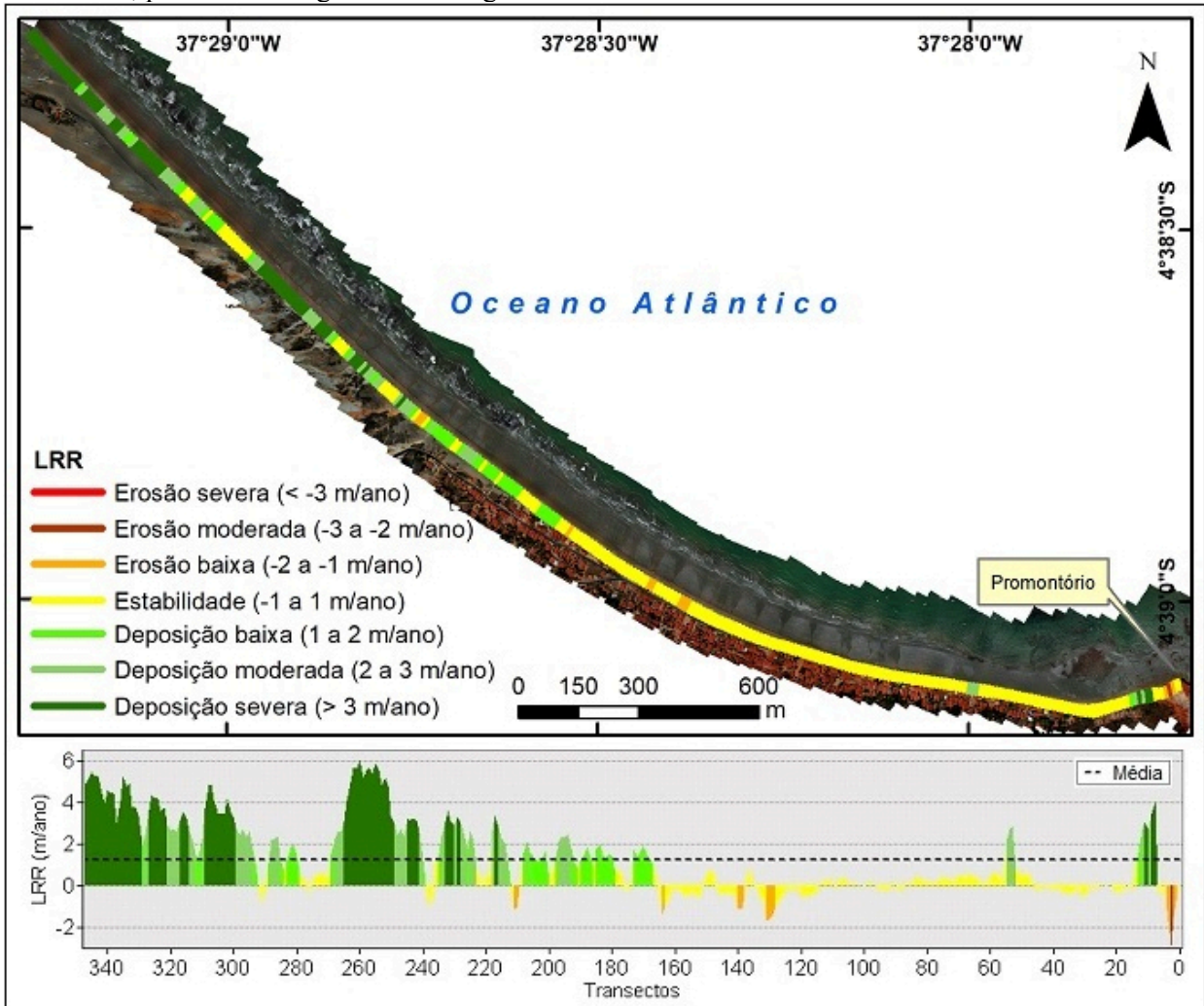
taxas de progradação (Figura 30). Em 12 meses de monitoramento observou-se que a linha de costa se deslocou cerca de 1,06 m em direção ao mar. Os maiores movimentos da linha em direção ao mar foram registrados no subsetor oeste com valores que alcançaram cerca de 5,65 m e no subsetor leste foram registradas as menores variações da linha de costa a qual manteve-se estável em grande parte do trecho praial e com pequenos trechos localizados onde o recuo alcançou valores próximo de 3 m (Tabela 10).

Tabela 10 - Taxas de variação e movimento linear da costa para o setor 2 (Praia de Redonda), período entre agosto de 2020 e agosto de 2021.

Parâmetro	Mín	Med	Máx	Desvio padrão
LRR (m/ano)	-2,89	1,27	6,04	±1,76
NSM (m)	-2,97	1,06	5,65	±1,61

Fonte: Autor.

Figura 30 - Visualização espacial e taxa de variação da linha de costa aplicada ao parâmetro LRR na praia de Redonda, período entre agosto/2020 e agosto/2021.



Fonte: Autor.

#### 5.4.2.3 Relação volume da praia com a dinâmica da linha de costa na praia de Redonda

Resultados de variação do volume apontaram que houve um balanço negativo para a praia de Redonda em cerca de  $-1.230 \text{ m}^3$  onde 61% da praia passou por processos erosivos. Apesar do balanço ter sido negativo, em um ano a linha de costa progradiu cerca de um metro (Tabela 10). Nesta praia as maiores taxas de progradação ocorreram no trecho oeste, tendo a linha de costa atingido avanços superiores a 5 m, o que ocasionou o aumento da largura da retropraia e consequente redução da praia. O ataque de ondas associada a menor largura da praia pode estar na origem do surgimento de escarpa erosiva entre o maio e agosto de 2021 (Figura 31D). Ações humanas como o acesso à praia podem causar impacto negativo sobre a escarpa onde por ação do

vento sedimentos podem ser erodidos e remobilizados para formarem dunas frontais. As perdas em volume de sedimentos nos trechos leste e central da praia não tiveram influência sobre linha de costa devido a fixação da mesma por estrutura rígida de proteção costeira (Figura 31).

Figura 31 - Mosaico de imagens. A) Visão oeste da praia de Redonda, mostrando estrutura de proteção costeira do tipo enrocamento, fixador de linha de costa; B) Fase de conclusão da obra de proteção costeira; C) Incidência de ondas sobre a estrutura de proteção; e D) Escarpa erosiva com mais de meio metro de altura.



Fonte: Autor.

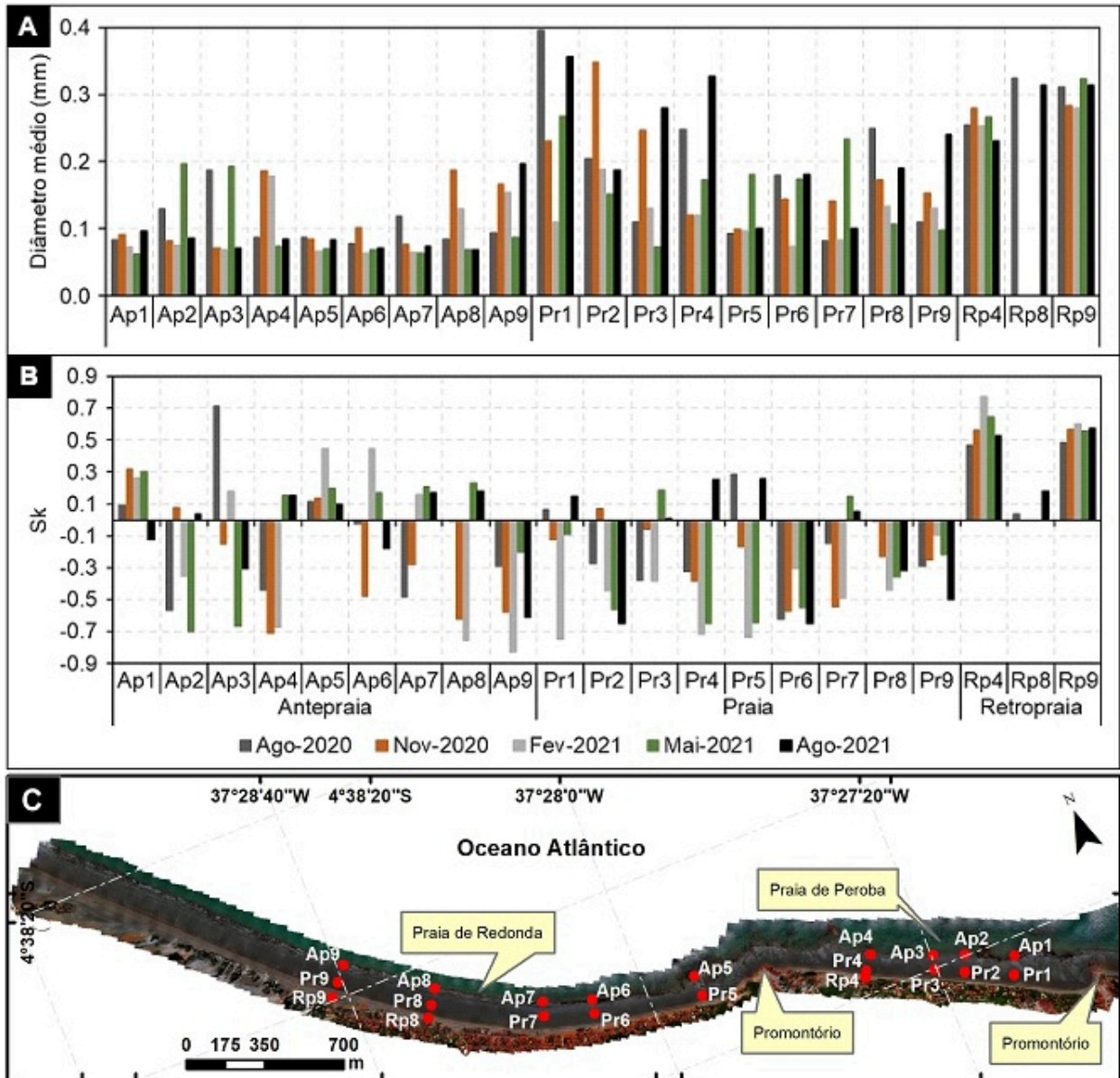


### 5.4.3 *Caracterização sedimentar*

Análise de 102 amostras de sedimentos coletadas em cinco campanhas de campo em 21 pontos de monitoramento distribuídos na área de estudo indicaram, segundo classificação de Shepard (1954), que 87% das amostras foram sedimentos do tipo areia e 13% do tipo areia lamosa. Todas as amostras classificadas como areia lamosa foram coletadas na zona de antepraia principalmente na segunda metade do período analisado. Em relação ao tamanho médio os sedimentos foram compostos por areia muito fina com 49%, areia fina com 33%, areia média com 17% e lama grossa com 1%. Em relação à assimetria, 37% das amostras foram classificadas com assimetria muito negativa, 13% assimetria negativa, 20% aproximadamente simétrica, 24% assimetria positiva e 6% com assimetria muito positiva. O percentual maior de sedimentos finos, revela que as praias podem estar a receber sedimentos de outras fontes.

Em relação ao grau de seleção sedimentos de antepraia e de retropraia foram majoritariamente de seleção moderada e amostras de praia foram pobres a moderadamente selecionados e enquadram-se entre as faixas de areia muito fina a areia média de assimetria negativa a aproximadamente simétrica. Amostras de retropraia foram moderadamente selecionados com classificação de areia média e a assimetria variou entre positiva a aproximadamente simétrica (Figura 32A).

Figura 32 - Sedimentos distribuídos antepraia de Ap1 a Ap9, praia de Pr1 a Pr9 e retropraia de Rp4, Rp8 e Rp9, em nove pontos de monitoramento ao longo da linha de costa da área de estudo. A) Variação do tamanho médio do grão; B) Assimetria – Sk; e C) Localização das amostras de sedimentos.



Fonte: Autor.

Em praias, as areias que geralmente apresentam classificações de moderadamente a bem selecionadas indicam que os sedimentos são oriundos de fontes com as mesmas características (MARTINS, 2003; BARROS, 2018). Sedimentos mais finos geralmente são bem selecionados (MCLAREN; BOWLES, 1985). Neste caso foram majoritariamente de seleção moderada. No local as classificações pobremente selecionadas podem estar associadas a sedimentos erodidos de falésias ativas e pela interação direta da praia com o sistema de dunas frontais através de

transferências de sedimentos pelo efeito *by pass*. Em processos costeiros sempre que o tamanho do sedimento se tornar mais fino a assimetria tende a ser mais negativa, onde os graus finos e leves tendem a serem erodidos e transportados facilmente do que os pesados (MCLAREN; BOWLES, 1985), refletido na Figura 32B. Assimetria negativa surge quando os sedimentos finos são removidos pelo processo de separação por retrolavagem dando lugar a sedimentos mais grosseiros devido à alta energia de onda que a praia fica sujeita onde também podem ser causadas através da adição de material mais grosseiro e a assimetria positiva é da competência do agente de transporte no fluxo unidimensional (MARTINS, 2003).

A concentração de sedimentos de fração de areia muito fina e de assimetria negativa situados na porção leste, imediatamente a sotamar do promontório na praia de Redonda, pode estar associada a combinação de afloramentos rochosos existentes no local que atuam como plataforma de abrasão, influenciando diretamente na corrente de ondas e maré que chegam à praia, consequentemente alterando os parâmetros granulométricos, pela incompetência dos agentes de transporte. O processo de transporte e deposição de sedimentos superficiais mais finos assimetricamente negativos geralmente ocorrem quando a energia decresce e os mais grossos e assimetricamente positivos quando a energia for alta (MCLAREN; BOWLES, 1985).

Sedimentos de frações mais finos apresentam menor espaço entre as partículas o que reduz a percolação da água, podendo ocorrer com intensidade o transporte de sedimento durante o refluxo da onda do que no espraiamento (NORDSTROM, 2010). Facilmente são suspensos e retirados da praia e são depositados no mar (NORDSTROM, 2010; JAYSON-QUASHIGAH *et al.*, 2019). A taxa de percolação aumenta à medida que a fração de sedimento aumenta de tamanho (PITMAN *et al.*, 2019). Estas condições podem estar associadas as deposições na porção oeste sobretudo da praia de Redonda.

A erosão, transporte e deposição de sedimentos geralmente varia em diferentes escalas de tempo, podendo ser influenciadas pela sazonalidade da maré, corrente longitudinais, energia de onda, bem como pela mudança de estações ao longo do ano (QI *et al.*, 2022). Por outro lado, a presença de sedimentos muito finos na porção mais a leste da praia de Redonda indica que a deriva litorânea não seja o importante fator contribuinte na mobilização de sedimentos de finos para o local.

## 5.5 Discussão

Observou-se que os trechos de linha de costa de relativa estabilidade têm influência antrópica pela construção de estruturas de contenção da erosão. Já as maiores taxas de progradação e deposições de sedimentos ocorridos no trecho oeste da praia de Peroba assim como na praia de Redonda podem estar relacionadas a erosão das áreas leste das duas praias, pois o balanço sedimentar positivo na praia de Peroba e negativo em Redonda, indicam que devem existir outras fontes de aporte alimentando as praias através da deriva litorânea. Embora as taxas médias de variação da linha de costa tenham sido positivas nas duas praias, a presença de obras de proteção costeira rígida na praia de Redonda e as constantes intervenções locais em trechos localizados na praia de Peroba, são indicativos de erosão costeira. Geralmente, as intervenções condicionam a ação hidrodinâmica modificando o sistema de transporte de sedimentos podendo acelerar ou retardar processos erosivos ou deposicionais (COWELL; THOM, 1994). Se as intervenções costeiras forem por obras longitudinais muitas vezes tem limitado a evolução da linha de costa (SOUZA *et al.*, 2005; COSTA; COELHO, 2013; BORETTO *et al.*, 2018; GRIGGS; PATSCH, 2019), característica esta existente na praia de Redonda.

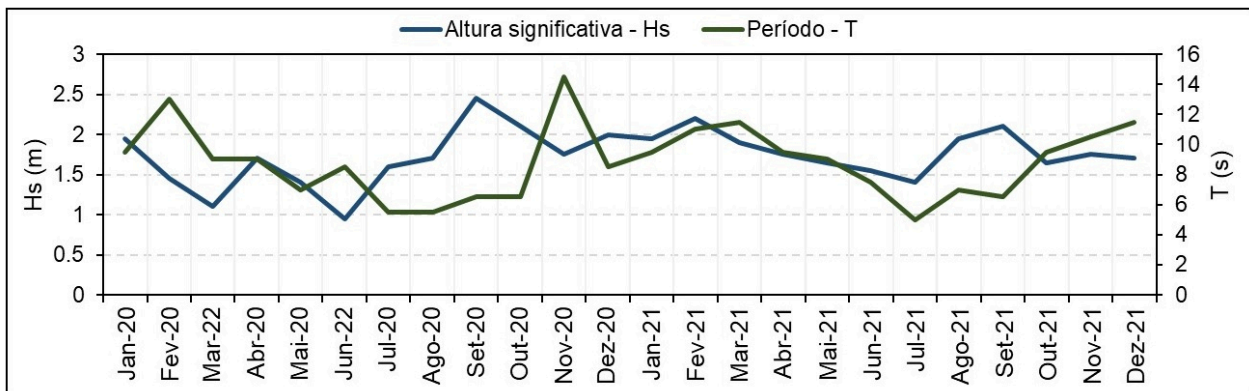
Barros (2018) menciona que em Icapuí, eventos como superluas, marés de sizígia e ressacas associados ao baixo gradiente topográfico das praias, como grandes causadores da erosão costeira onde durante o processo de transgressão da maré sedimentos são erodidos da berma e são direcionados para o mar e durante a regressão acontece o processo inverso com deposições ocorrendo nas bermas.

A erosão prevalecente nos extremos lestes sobretudo imediatamente a sotamar dos promontórios tanto na praia de Peroba como na praia de Redonda podem estar associados ao efeito de refração das ondas quando elas atingem os promontórios, os sedimentos erodidos são transferidos para as entranças, os depositados a barlar ficar retidos permitindo a engorda da área e os depositados a sotamar, são transportados pela ação da deriva litorânea e depositados nas porções a oeste, avantajado pelo formato curvilíneo sobretudo da praia de Redonda. Portela *et al.* (2014) reportou eventos erosivos na praia de Redonda, como resultante de ataques de ondas.

Processos costeiros que resultem em alterações da posição da linha de costa também são altamente influenciados pelas mudanças climáticas, em escala global com a elevação do nível do mar e em escala local pela mudança do clima de ondas, tornando as costas vulneráveis a

ocorrência de inundações ou erosão costeira (MASSELINK *et al.*, 2016). Dados de onda do modelo global Wavewatch III, indicaram que quando se aproxima o mês de agosto existe uma tendência no aumento de altura significativa de onda com períodos que variam entre 5 e 8 segundos (Figura 33). Neste período a velocidade do vento também tem sido alta. Entre 2020 e 2021 apesar de ter sido um período dominado pela passagem do fenômeno *La Niña*, o que muitas vezes coincide com períodos de abundância de chuvas. A erosão no extremo leste e engorda dos trechos oeste das praias de Peroba e Redonda pode estar relacionado ao que Muehe (2011) afirma que, baixas precipitações e ventos fortes do Nordeste favorecem a formação e engorda de campos de dunas resultando no balanço negativo de sedimentos nas praias e a consequente retrogradação da linha de costa.

Figura 33 - Dados de onda do modelo global Wavewatch III. Altura significativa e período de onda.



Fonte: Surf guru.

Outro fator ainda não muito explorado que possivelmente interfere na dinâmica sedimentar mesmo que ínfimo nas praias do nordeste brasileiro são os fluxos de segunda ordem resultados da neotectônica onde regiões com falhas que são alvos de ocorrência de microsismos (SOUZA *et al.*, 2005). As praias de Peroba e Redonda encontram-se numa área entre falhas devidamente cartografadas. Não sendo este o objetivo de estudo do presente trabalho, sugere-se que as próximas pesquisas analisem a possível contribuição da neotectônica nos processos erosivos ou deposicionais costeiros na área. O entendimento apurado do tectonismo atual é de extrema importância para estudos que primem na definição de modelos evolutivos costeiros.

O presente estudo soma-se a outros na validação de dados usando técnicas de aerofotogrametria com RPA e o respectivo processamento através do algoritmo SfM na geração de DEMs e Ortomosáicos de imagens de alta resolução a custos acessíveis. Por outro lado, os resultados servirão como ferramenta alternativa para a gestão costeira do município de Icapuí.

## 5.6 Conclusões

Os resultados desta pesquisa foram baseados no levantamento de dados fotogramétricos com RPA nas praias de Peroba e Redonda, onde mostrou-se extremamente importante na detecção de mudanças morfológicas e o cálculo do balanço sedimentar de curto prazo ao longo das praias. A resolução dos DEMs e ortomosaicos gerados foram de 23 cm e 2,88 cm, respectivamente, e a alta resolução do produto permitiu o cálculo do volume e a estimação de mudança de posição da linha de costa mais próxima à realidade.

O litoral costeiro de Icapuí é extremamente dinâmico apresentando taxas de erosão e deposição diferenciadas de praia para praia em resultado do regime de marés, ondas e de intervenções humanas. Entre o período de agosto de 2020 e agosto de 2021 a praia de Peroba teve balanço positivo que resultou em ganho de sedimento estimado em 18.815 m<sup>3</sup>. Já na praia de Redonda o balanço foi negativo e o volume de sedimento erodido foi estimado em cerca de -1.230 m<sup>3</sup>. No mesmo período a taxa média de variação da linha de costa na praia de Peroba foi cerca de 0,87 m/ano representando uma estabilidade e na praia de Redonda a taxa média de mobilidade da linha de costa foi estimada em 1,27 m/ano representando uma suave progradação.

As praias foram caracterizadas por sedimentos arenosos com frações que variam entre areia muito fina a areia média apontando para o domínio de areia muito fina a areia fina. O grão médio de areia muito fina está associado a melhor seleção e estão concentradas imediatamente a sotamar do promontório que separa as duas praias, podendo-se concluir que este em conjunto com a plataforma de abrasão gerada pelos afloramentos rochosos exercem influência direta nos processos hidrodinâmicos que incidem nas correntes de ondas e marés nesta porção, consequentemente alterando estes parâmetros granulométricos.

Este estudo detectou que as porções lestes das praias de Peroba e Redonda passam por processos erosivos. Como consequência ocorre a retração da linha de costa. As porções a oeste de maiores deposições em volume e altas taxas de progradação da linha de costa. A erosão pode ser atribuída às combinações entre os promontórios rochosos, correntes de marés, as ondas e a baixa declividade das praias. As deposições podem ser associadas à característica curvilínea da linha de costa, aos afloramentos rochosos entre Peroba e Redonda que atuam como plataforma de abrasão e possibilitam a retenção de sedimentos transportados por deriva litorânea de leste a oeste da costa, sobretudo as correntes na praia de Redonda. A estabilidade da linha de costa em trechos localizados

da praia de Peroba e em todo trecho leste e central da praia de Redonda pode ser atribuída a ações humanas devido a construção de obras de contenção da erosão costeira.

O método aplicado neste trabalho pode ser replicado em outras praias do Município de Icapuí assim como em qualquer costa do estado do Ceará e do Brasil para estimar a variação volumétrica de sedimento e a dinâmica de transporte no sentido de contribuir como fonte de informação para gestão da vulnerabilidade de áreas costeiras.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.C.D.; ALBUQUERQUE, M.G.; ALVES, D.C.L., and ESPINOZA, J.M.A. 2021. Uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) no estudo da geomorfometria de sangradouros: estudo de caso do balneário Cassino, RS. *Labomar – Arquivos de Ciências do Mar*. Fortaleza. 53(especial): 61-69. ISSN 0374-5686. <http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v53,supl.,42680>
- ALBUQUERQUE, M.G.; Alves, D.C.L.; ESPINOZA, J.M.A.; OLIVEIRA U.R., and SIMÕES, R.S. 2018a. Determining shoreline response to meteoro-oceanographic events using remote sensing and unmanned aerial vehicle (UAV): case study in southern Brazil. *In*: SHIM, J.S.; CHUN, I., and LIM, H.S. (eds.). *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018a* (Busan, Republic of Korea). *Journal of Coastal Research*. Special Issue No. 85, pp. 766–770. Coconut Creek (Florida). ISSN 0749-0208. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107539>
- ALBUQUERQUE, M.G.; ESPINOZA, J.M.A., and ALVES, D.C.L. 2018b. Uso de geotecnologias no gerenciamento de riscos associados à ação de eventos meteorológicos de grande intensidade no extremo sul do Brasil. *Mares e Litorais; Perspetivas transdisciplinares – Tomo VII da Rede BRASPOR*. Disponível no site: <https://www.researchgate.net/profile/Deivid-Leal-Alves/publication/341827754>. Acesso 05/04/2021.
- BARROS, E.L. *Erosão Costeira no Litoral do Município de Icapuí-CE na Última Década: Causas, Consequências e Perspectivas Futuras*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais. Fortaleza. 2018. 254p.
- BLANCHARD, S.D.; ROGAN, J. and WOODCOCK, D.W. 2010. Geomorphic Change Analysis Using ASTER and SRTM Digital Elevation Models in Central Massachusetts, USA. *GIScience & Remote Sensing*. 47:1, 1-24. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.47.1.1>
- BORETTO, G.M.; ROUZAUT, S.; CIOCCALE, M.; GORDILLO, S. and BENITEZ, Y. 2018. La estructura cortical del arco de las Antillas Menores estimada a partir de técnica de funciones receptoras. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. V. 35, n. 3. p. 291-306. doi: <http://dx.doi.org/10.22201/cgeo.200072902e.2018.3.865>

- BRASINGTON, J.; LANGHAM, J., and RUMSBY, B. 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. *Geomorphology* 53: 299-316. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00320-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00320-3)
- CASELLA, E.; ROVERE, A.; PEDRONCINI, A.; MUCERINO, L.; CASELLA, M.; CUSATI, L.A.; VACCHI, M.; FERRARI, M. and FIRPO, M. 2014. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 149, 160-167 <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.012>
- CHEN, B.; YANG, Y.; WEN, H.; RUAN, H.; ZHOU, Z.; LUO, K., and ZHONG, F. 2018. High-resolution monitoring of – Beach topography and its change using unmanned aerial vehicle imagery. *Ocean and Coastal Management* 160. 103-116. 0964-5691. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.04.007>
- COSTA, L.R.F.G. Geotecnologias aplicadas ao monitoramento da cobertura sedimentar do litoral de Icapuí (Ceará) entre 1985 e 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-graduação em Geologia. Fortaleza. 2019. 143p.
- COSTA, S. and COELHO, C., 2013. Northwest coast of Portugal – Past behavior and future coastal defense options *In: CONLEY, D.C., MASSELINK, G., RUSSELL, P.E. and O'HARE, T.J. (eds.), Proceedings 12<sup>th</sup> International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp. 921-926, ISSN 0749-0208.
- COWELL, P.J. and THOM, B.J. 1994. Morphodynamic of coastal evolution. *In: CARTER, R.W.G. and WOODROFFE, C.D. (eds.). Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge. Cambridge University Press. (2), p. 33-59. ISBN 0-521-41976 X
- DAI, W.Q.; LI, H.; ZHOU, Z.; CYBELE, S.; LU, C.Z.; ZHAO, K.; ZHANG, X.Y.; YANG, H.T., and LI, D.Y. 2018. UAV Photogrammetry for Elevation Monitoring of Intertidal Mudflats. *In: SHIM, J.S.; CHUN, I., and LIM, H.S. (eds.), Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018* (Busan, Republic of Korea). *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 85, pp. 236-240. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208
- DEL RÍO, L.; GRACIA, F.J. and BENAVENTE, J. 2016. Multiple-source cliff erosion in Southern Spain: current risk and future perspectives. *In: VILA-CONCEJO, A.; BRUCE, E.; KENNEDY, D.M. and McCARROLL, R.J. (eds.). Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Coastal Symposium* (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research*. Special Issue. No. 75; pp. 1072 - 1077. Coconut Creek (Florida). ISSN 0749-0208.
- EICHMANNS, C. and SCHÜTTRUMPF, H. 2021. Influence of Sand Trapping Fences on Dune Toe Growth and Its Relation with Potential Aeolian Sediment Transport. *Journal of Marine Science and Engineering*. 9, 850. <https://doi.org/10.3390/jmse9080850>.
- FOLK, R.L. and WARD, W.C. 1957. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. 27. No. 1. Pp. 3-26.



GOVAERE, G.; VIQUEZ, R. and ALFARO, H. 2016. Use of Drone Technology and Photogrammetry for Beach Morphodynamics and Breakwater Monitoring. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science (Coastlab16). Ottawa, Canada. May 10-13.

GRIGGS, G. and PATSCH, K., 2019. The protection/hardening of California's coast: Times are changing. *Journal of Coastal Research*. 00(0), 000–000. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

HIMMELSTOSS, E.A.; HENDERSON, R. E.; KRATZMANN, M.G. and FARRIS, A.S. 2018. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179, 110p. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Ceará em Números. Caracterização Territorial. 2007. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara\\_em\\_numeros/2008/infra/](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2008/infra/). [acessado em 03/06/2019].

JANUŠAITĖ, R.; KARALIŪNAS, V. and BEVAINIS, L. 2019. Application of Remote Sensing Methods in Research of Nearshore Sandbars, Curonian Spit, Lithuania. *Baltic J. Modern Computing*, Vol. 7. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2019.7.4.08>

JAUD, M.; DELACOURT, C.; DANTEC, N.L.; ALLEMAND, P.; AMMANN, J.; GRANDJEAN, P.; NOUAILLE, H.; PRUNIER, C.; CUQ, V.; AUGEREAU, E.; COCQUEMPOT, L. and FLOC'H, F. 2019. Diachronic UAV Photogrammetry of a Sandy Beach in Brittany (France) for a Long-Term Coastal Observatory. *International Journal of Geo-Information*. <https://doi.org/10.3390/ijgi8060267>

JAUD, M.; BERTIN, S.; BEAUVERGER, M.; AUGEREAU, E. and DELACOURT, C. 2020. RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring. *Remote Sens*. 12, 1889. <https://doi.org/10.3390/rs12111889>

JAYSON-QUASHIGAH, P-N.; APPEANING ADDO, K. and KUFOGBE, S.K. 2013. Shoreline monitoring using medium resolution satellite imagery, a case study of the eastern coast of Ghana. In: CONLEY, D.C.; RUSSELL, P.E., and O'HARE, T.J. (eds.). *Proceedings 12<sup>th</sup> International Coastal Symposium* (Plymouth, England), *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, pp.511-516; ISSN 0749-0208. <http://dx.doi.org/10.2112/SI65-087.1>

JAYSON-QUASHIGAH, P-N.; APPEANING ADDO, K.; AMISIGO, B. and WIAFE, G. 2019. Assessment of short-term beach sediment change in the Volta Delta coast in Ghana using data from Unmanned Aerial Vehicles (Drone). *Ocean and Coastal Management*. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104952>

KALIRAJ, S; CHANDRASEKAR, N. and RAMACHANDRAN, K.K. 2017. Mapping of coastal landforms and volumetric change analysis in the south west coast of Kanyakumari, South India using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 20, 265–282. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.12.006>

- KIM, C.H.; KIM, H.W.; PARK, C.H.; KIM, W.H.; LEE, M.H.; CHOI, S.Y. and DO, J.D. 2018. Coastline change measurement using shipborne mobile LiDAR in Anmok Beach, Gangneung, Korea. In: SHIM, J.-S.; CHUN, I. and LIM, H.S. (eds.). *Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018* (Busan, Republic of Korea). *Journal of Coastal Research*. Special Issue. No. 85; pp. 601–605. Coconut Creek (Florida). ISSN 0749-0208. <https://doi.org/10.2112/SI85-121.1>
- LAPORTE-FAURET, Q.; MARIEU, V.; CASTELLE, B.; MICHALET, R.; BUJAN, A. and ROSEBERRY, D. 2019. Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7. 63. <http://dx.doi.org/10.3390/jmse7030063>
- LANE, S.N.; WESTAWAY, R.M., and HICKS, D.M. 2003. Estimation of Erosion and Deposition Volumes in a Large, Gravel-Bed, Braided River Using Synoptic Remote Sensing. *Earth Surface Processes and Landforms* 28, 249-271. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.483>
- MARTINS, L.R. 2003. Análise Recente de Sedimentos e Tamanho de Grão. Gravel. Porto Alegre. ISSN 1678-5975. No. 2. 40-56.
- MASSELINK, G.; CASTELLE, B.; SCOTT, T.; DODET, G.; SUANEZ, S.; JACKSON, D.; FLOC'H, F. 2016. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophysical Research Letters*, 43(5). 2135-2143. doi: <http://dx.doi.org/10.1002/2015GL067492>
- MCLAREN, P.; BOWLES, D. The effects of sediment transport on grain-size distributions. 1985. *Journal of Sedimentary Petrology*. Vol. 55, No. 4. p. 0457-0447.
- MEIRELES, A. J. A.; SANTOS, A.M.F. 2012. Atlas de Icapuí - CE. Projeto de Olho na Água. Editora Fundação Brasil Cidadão. 1ª Edição. Fortaleza. 156p.
- MEIRELES, A.J.A.; SOUZA, W.F.; LIMA, A.P.S. Atlas Socioambiental Cartografia Social das Comunidades de Icapuí. Projeto de Olho na Água. Editora Fundação Brasil Cidadão. 1ª Edição. Fortaleza. 2016. 153p.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II). Brasília-DF. (s.d.). Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/pngc2\\_78.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/pngc2_78.pdf). Acesso 12/09/2019.
- MUEHE, D. 2011. Erosão Costeira - Tendência ou Eventos Extremos? O Litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management*. Vol. 11, núm. 3. pp. 315-325 Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos Lisboa, Portugal.
- MUEHE, D. 2013. Erosão costeira, mudança do clima e vulnerabilidade. In: GUERRA, A.J.T.; JORGE, M.C.O. (eds.). *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. Oficina de Textos. São Paulo. 161-186p. ISBN 978-85-7975-079-3

- NAGDEE, M.R.M.S.; NURSE, L.; INNIS, L.; CHADWICK, A. and JOHNSON, T. 2020. Historical shoreline mapping: Application of the Digital Shoreline Analysis System to the evolution of Worthing Beach, Barbados, following Hurricanes Allen (1980) and Ivan (2004). *Journal of Coastal Research*. 36(2), 313–318. Coconut Creek (Florida). ISSN 0749-0208.
- NORDSTROM, K.F., Recuperação de praias e dunas. Oficina de Textos. São Paulo. 2010. 263p. ISBN 978-85-7975-006-9.
- PAGÁN, J.I.; BAÑÓN, L.; LÓPEZ, I.; BAÑÓN, C. and ARAGONÉS, L. 2019. Monitoring the dune-beach system of Guardamar del Segura (Spain) using UAV, SfM and GIS techniques. *Science of the Total Environment* 687. 1034-1045. ISSN 0048–9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.186>
- PINHEIRO, L.d.S.; MORAIS, J.O. de; MAIA, L.P. 2016. The Beaches of Ceará. *In*: SHORT, A.D., and KLEIN, A.H. da F. (eds). *Brazilian Beach Systems*. Coastal Research Library. pp. 175-199. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_7)
- PITMAN, S.J.; HART, D.E. and KATURJI, M.H. 2019. Application of UAV techniques to expand beach research possibilities: A case study of coarse clastic beach cusps. *Continental Shelf Research* 184. 44-53. 0278–4343. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.07.008>
- PORTELA, J.P.; FREIRE, G.S.S.; MORAES, M.V.A.R. and SILVA, C.A. 2014. Evolução da Morfologia Costeira do Litoral Oeste de Icapuí - CE. *Revista Geonorte, Edição Especial* 4, V.10, N.1, p.89-93, 2014. ISSN 2237-1419.
- QI, F.; WU, X.; WANG, Z.; WANG, C.; DUAN, H.; LIU, M. and XU, J. 2022. Transport and deposition processes of the sediment depocenter off the Shandong Peninsula: An observational study. *Continental Shelf Research* 244. 104763. 0278–4343. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2022.104763>
- SHEPARD, F.P. 1954. Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*. 24(3). 151-158.
- SILVA, R.V.M.; AGUIAR, L.S.; MAIA, J.L.A. and LIMA, M.Z.C. 2019. Uso de veículos aéreos não tripulados nos estudos da zona costeira no litoral sul do Rio Grande do Norte, Brasil. XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE. 11 a 15 de junho de 2019.
- SILVA NETO, C.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S.; FREIRES, E.V.; SOUSA, W.R.N. and SILVA, M.T. 2020. Caracterização dos setores erosivos e deposicionais da linha de costa de Icapuí (CE) com base em produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.13, n. 01. 143-155.
- SIMÕES, R.S., and OLIVEIRA, U.R. 2020. Monitoramento mensal da linha de costa no Balneário Mostardense – RS entre 2016/2017 utilizando dados de VANT. *Quaternary and Environmental Geosciences*. 11(1): 1-18.

SMITH, M.W.; CARRIVICK, J.L. and QUICEY, D.J. 2015. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*. 40, 247-275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>

SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S. and OLIVEIRA, P.E. (eds.). *Quaternário do Brasil*. 1ª ed. ABEQUA. Ribeirão Preto/SP. pp. 382. ISBN 85-86699-47-0.

SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. 1ª ed. Blucher. São Paulo. 2003. 11-42.

SUGUIO, K. *Geologia do Quaternário e mudanças ambientais*. Oficinas de Textos. São Paulo. 2010. 408p.

TAAOUATI, M.; EL MRINI, A.; NACHITE, D. 2011., Beach Morphology and Sediment Budget Variability Based on High Quality Digital Elevation Models Derived from Field Data Sets. *International Journal of Geosciences*. 2, 111-119. <https://doi.org/10.4236/ijg.2011.22012>

WENTWORTH, C.H. 1922. A scale of grade and depositional processes. *Journal of Geology* 30: 377-392.

WHEATON, J.M., BRASINGTON, J., DARBY, S.E., and SEAR, D.A. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. *Earth Surf. Process. Landforms* 35, 136-156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>

## **6 VULNERABILIDADE COSTEIRA NO TRECHO ENTRE AS PRAIAS DE PEROBA E REDONDA NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ-CEARÁ, BRASIL**

### **COASTAL VULNERABILITY IN THE STRETCH BETWEEN BEACHES OF PEROBA AND REDONDA IN THE MUNICIPALITY OF ICAPUÍ-CEARÁ, BRAZIL**

#### **RESUMO**

Zonas costeiras são regiões dinâmicas cuja morfologia é diretamente influenciada por fatores físicos naturais ou de origem antrópica. A depender do nível de ocupação e do estágio de desenvolvimento, estas áreas podem estar sujeitas a riscos associados à ocorrência de inundações ou processos erosivos que as tornam vulneráveis. Considerando esse contexto, este trabalho quantificou a vulnerabilidade relativa da costa quanto às alterações físicas entre as praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí, litoral leste do Ceará, destacando os trechos de praia onde os efeitos na linha costa pode ser extremos. Na implementação do Índice de Vulnerabilidade Costeira, foram utilizadas as variáveis naturais geomorfologia, declividade, taxa de variação da linha de costa, amplitude média de maré, altura significativa de onda e variação do nível médio do mar. Os resultados indicaram a ocorrência de três classes de vulnerabilidade, desde moderada a muito alta. Cerca de 2.940 m (58%) foram registrados como trecho de moderada vulnerabilidade, 2.100 m (41%) de alta vulnerabilidade e cerca de 30 m (1%) muito alta vulnerabilidade. Os trechos com maior vulnerabilidade estão associados a faixas de praias arenosas e os de menor vulnerabilidade a falésias ativas constituintes dos tabuleiros costeiros e áreas de conservação. Os resultados apresentados auxiliam na gestão costeira e na minimização de situações de risco, ressaltando a importância de medidas mitigatórias para a área de estudo, principalmente no trecho de vulnerabilidade muita alta, frente aos riscos naturais – como os oriundos das mudanças climáticas – ou resultantes das intervenções antrópicas.

**Palavras-chaves:** erosão; inundação; risco; mapeamento; IVC.

#### **ABSTRACT**

Coastal zones are dynamic regions whose morphology is directly influenced by natural or anthropic physical factors. Depending on the level of occupation and stage of development, these areas may be subject to risks associated with floods or erosive processes that make them vulnerable. Considering this context, this work quantified the relative vulnerability of the coast to physical changes between the Peroba and Redonda beaches in the municipality of Icapuí, east coast of Ceará, highlighting the stretches of beach where the effects on the coastline can be extreme. In the implementation of the Coastal Vulnerability Index, the natural variables geomorphology, slope, shoreline variation rate, mean tidal range, significant wave height, and mean sea level variation were used. The results indicated the occurrence of three vulnerability classes, ranging from moderate to very high. About 2,940 m (58%) were recorded as moderate vulnerability, 2,100 m

(41%) as high vulnerability and about 30 m (1%) as very high vulnerability. The most vulnerable stretches are associated with sandy beaches. The less vulnerable ones are with active cliffs that are part of the coastal tablelands and conservation areas. The results presented help in coastal management and the minimization of risk situations, highlighting the importance of mitigation measures for the study area, especially in the very high vulnerability section, facing natural risks - such as those arising from climate change - or resulting from human interventions.

**Keywords:** erosion; flooding; risk; mapping; CVI.

## 6.1 Introdução

Zonas costeiras são áreas extremamente dinâmicas por conta de sua interação entre o mar, continente e atmosfera. Seu alto dinamismo geralmente é influenciado por agentes físicos que podem atuar de forma isolada ou em conjunto, tornando a costa vulnerável à ocorrência de inundações, mudanças na posição de sua linha de costa, e até ocorrência da intrusão salina (KANTAMANENI *et al.*, 2018; GHOSSEIN *et al.*, 2018). As constantes mudanças que ocorrem nas zonas costeiras também são fortemente influenciadas pela atividade antropogênica devido à crescente ocupação do solo resultante do aumento da população, aumento da urbanização e industrialização, entre outras atividades de desenvolvimento, e têm acentuado o problema de erosão costeira (DEL RÍO; GRACIA, 2009; MUTMAINAH, 2022).

A vulnerabilidade destas áreas apresenta diferentes graus de intensidade em função das ocupações relacionadas à distância segura em relação à praia (NEVES *et al.*, 2010; MUEHE, 2011; KOROGLU, 2019; KOVALEVA *et al.*, 2022). Em situações de ocorrência de eventos extremos, como marés de sizígia, áreas costeiras com faixas de praia de menor declividade tendem a apresentar um maior potencial de risco à ocorrência de inundação e rapidez de recuo da linha de costa (DENNER *et al.*, 2015; LOPES, 2021). Com isso, um dos problemas mais relevantes da geologia costeira reside na determinação da resposta física da costa à elevação do nível do mar e a previsão do recuo da linha de costa face à crescente vulnerabilidade associada à ocupação do solo costeiro (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000).

Atualmente, a avaliação de vulnerabilidade costeira tem sido amplamente usada em vários estudos pela sua importância na identificação em primeira instância de segmentos costeiros suscetíveis ao risco de exposição a vários fatores naturais (APPEANING ADDO, 2013; KOVALEVA *et al.*, 2022). Diversos estudos já aplicaram o Índice de Vulnerabilidade Costeira

(IVC) na escala regional e local em diferentes costas do planeta, empregando diferentes variáveis naturais e socioeconômicas para avaliar a susceptibilidade da costa a desastre face à elevação do nível do mar (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000; MUEHE *et al.*, 2011; LINS-DE-BARROS, 2017; PANTUSA *et al.*, 2018; KOMI *et al.*, 2022; LOPES *et al.*, 2022). Estudos de vulnerabilidade já foram aplicados em praias da zona costeira do Nordeste do Brasil, Araújo *et al.* (2019) estimou o índice de vulnerabilidade costeira no litoral do Estado do Piauí. Lopes (2021) estudou a vulnerabilidade no litoral do município de São Gonçalo do Amarante no Ceará. Amaro *et al.* (2021) estabeleceram o índice de vulnerabilidade costeira à erosão a partir de variáveis naturais e ambientais, considerando a dinâmica das mudanças climáticas para diferentes cenários futuros estabelecidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, para a região da Barreira do Inferno/RN. Mishra *et al.* (2022) aplicaram indicadores globais no estudo da vulnerabilidade costeira a gestão da erosão, no litoral norte do estado do Pernambuco. Lacerda *et al.* (2022) através de variáveis naturais analisaram a vulnerabilidade costeira antes e depois da instalação do parque eólico nas cidades de Pedra Grande e São Miguel do Gostoso/RN.

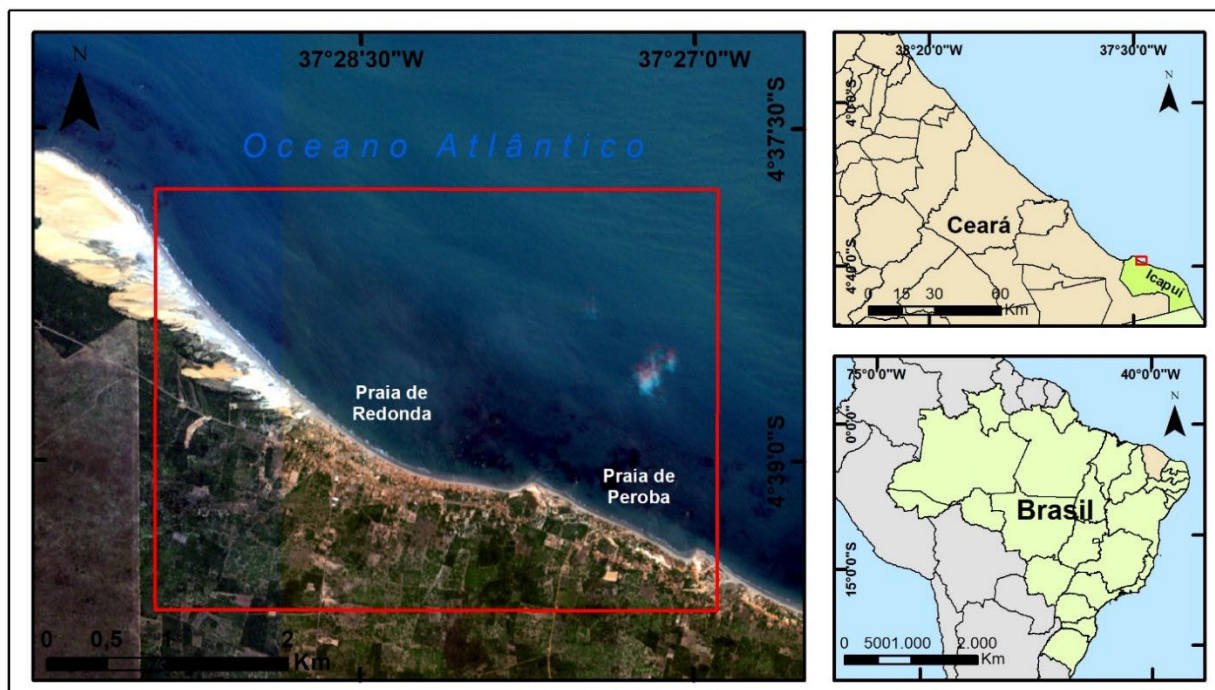
Diante da situação de erosão observada na zona costeira do município de Icapuí, litoral leste do estado Ceará (BARROS *et al.*, 2020; SILVA, 2021; CHACANZA *et al.*, 2022), o objetivo deste estudo é de mapear e quantificar as áreas de vulnerabilidade relativa da costa susceptíveis às alterações físicas entre as praias de Peroba e Redonda do município de Icapuí, destacando os trechos de praia onde os riscos naturais ou antrópicos na linha costa podem ser extremos e ambientalmente impactantes.

## **6.2 Materiais e métodos**

### **6.2.1 Área de estudo**

A área de estudo compreende a extensão do trecho entre as praias de Peroba e Redonda, litoral do Município de Icapuí extremo leste do estado do Ceará. Nordeste do Brasil (Figura 34). A área de estudo é constituída de duas praias, a leste a praia de Peroba (setor 1) e a oeste a praia de Redonda (setor 2). A área é caracterizada por uma topografia constituída de falésias ativas, formando acidentes geográficos em forma de promontórios, sobretudo no extremo leste do setor 1 e na região entre os dois setores. Campos de dunas são observados na porção oeste do setor 2.

Figura 34 - Área de estudo no município de Icapuí–Ceará, Brasil, a qual é constituída pelas Praias de Peroba (setor 1) e Redonda (setor 2).



Fonte: Autor. Elaborado com base em dados cartográficos do IBGE e Imagem RapidEye/REIS de 27/06/2015 disponibilizado pelo MMA.

### 6.2.2 Índice de vulnerabilidade costeira (IVC)

Para cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira foram escolhidas seis variáveis físicas, utilizando como referências as abordagens de Thieler e Hammar-Klose (2000); Ghoussein *et al.* (2018); Pantusa *et al.* (2018). As variáveis aplicadas foram: geomorfologia, declividade da costa, taxa de variação da linha de costa, amplitude média de maré, altura significativa de onda e nível médio do mar. Para quantificar a vulnerabilidade costeira foram atribuídas, seguindo Thieler e Hammar-Klose (2000), classificações individuais para cada variável, com valores de 1 a 5, onde 1 indica menor risco e 5 maior risco face à elevação do nível do mar (Tabela 11). Em seguida, foi atribuída uma porcentagem para cada classe, indicando o impacto específico; ou seja, o nível de resposta que cada parâmetro exerce num determinado trecho de praia. Os valores de ponderação foram de 0,2 para vulnerabilidade muito baixa, 0,4 baixa, 0,6 moderada, 0,8 alta e 1,0 muito alta.



Tabela 11 - Ranking da vulnerabilidade costeira segundo os Índice de Vulnerabilidade costeira (ICV).

Referência	Variável	Peso (x)	Muito Baixa	Baixa	Moderada	Alta	Muito Alta
			1	2	3	4	5
Thieler; Hammar-Klose (2000); Pantusa <i>et al.</i> (2018)	Taxa de variação da linha de costa (m/ano)	15%	> 2.0 Acreção	1.0 – 2.0	-1.0 – 1.0 Estabilidade	-1.0 – -2.0	< -2.0 Erosão
Ghoussein <i>et al.</i> (2018)	Declividade da costa (%)	25%	> 45	30 – 45	15 – 30	8 – 15	< 8
Thieler; Hammar-Klose (2000)	Geomorfologia	10%	-	Costa de falésias	-	-	Praia arenosa, dunas
Thieler; Hammar-Klose, 2000	Amplitude média de maré (m)	30%	> 6.0	4.0 – 6.0	2.0 – 4.0	1.0 – 2.0	< 1.0
Thieler; Hammar-Klose (2000)	Altura significativa de onda (m)	15%	< 1,1	1,1 – 2.0	2,0 – 2,25	2,25 – 2,60	> 2,60
Thieler; Hammar-Klose, 2000	Nível médio do mar (mm/ano)	5%	< -1,21	-1,21 – 0,1	0,1 – 1,24	1,24 – 1,36	> 1,36

Fonte: Autor.

As variáveis definidas receberam um determinado valor de risco que indica sua influência em relação ao trecho costeiro. Foi usado como base para mapear e calcular a vulnerabilidade costeira, todos os pontos de intercessão dos transectos com a linha de costa de agosto de 2021. O IVC foi calculado a partir da expressão proposta por Denner *et al.* (2015) e Mutmainah (2022), que consiste na soma do produto das variáveis envolvidas na análise com o respectivo peso (Equação 4).

$$IVC = (a * x_1) + (b * x_2) + (c * x_3) + (d * x_4) + (e * x_5) + (f * x_6) \quad (4)$$

onde a = taxa de variação da linha de costa, b = declividade da costa, c = geomorfologia, d = amplitude média de maré, e = altura significativa de onda e f = nível médio do mar. Os valores de x representam os pesos das variáveis.  $x_1$  = peso da taxa de variação da linha de costa,  $x_2$  = peso da declividade da costa,  $x_3$  = peso da geomorfologia da costa,  $x_4$  = peso da amplitude média de maré,  $x_5$  = peso de altura significativa de onda e  $x_6$  = peso do nível médio do mar.

*Geomorfologia:* Foi definida através de observações em campo e do ortomosaico gerado do conjunto de imagens de alta resolução coletadas por uma aeronave remotamente pilotada (RPA). Neste contexto, o valor correspondente a esta variável foi extraído com base na forma do relevo local, considerando o método descrito por Thieler e Hammar-Klose (2000). A

geomorfologia regional, onde a área de estudo se enquadra, engloba tabuleiros pré-litorâneos e a planície litorânea. Esta última engloba as praias, dunas, lagoas costeiras e interdunares, sistema estuarino-lagunar e os terraços marinhos, enquanto que os tabuleiros pré-litorâneos agregam grande parte do território de Icapuí, estendendo-se nas regiões adjacentes à costa onde, em algumas áreas, está coberto por antigas dunas, limitado interiormente por falésias mortas e por falésias vivas quando alcançam o litoral (MEIRELES; SANTOS, 2012).

*Declividade da costa:* A variável declividade é tida como um indicador primário de risco de inundação ou da rapidez de recuo da linha de costa (HEGDE; REJU, 2007). Esta variável foi calculada a partir de valores extraídos do modelo digital de elevação (MDE) gerado a partir de dados coletados em campo em agosto de 2021, com uso de uma aeronave remotamente pilotada. A variável foi expressa em porcentagem (%), e os intervalos de valores das classes foram definidos segundo Ghousein *et al.* (2018). Nos dados extraídos foi considerado a declividade presente sobre a linha de costa em agosto de 2021 onde todos valores superiores 45% indicam muito baixa sensibilidade e valores inferiores a 8% sensibilidade muito alta a ocorrência de erosão.

*Taxas de variação da linha de costa:* Os valores foram obtidos a partir do histórico de curto prazo baseado na taxa de regressão linear (LRR) resultado de cinco cenas obtidas de composição de imagens coletadas trimestralmente por RPA no período entre agosto de 2020 e agosto de 2021. As imagens foram processadas no *software* Agisoft Metashape Pro, onde no final foi gerado o ortofotomosaico. O ortofotomosaico foi exportado para o *software* ArcGIS 10.8, onde foram vetorizadas cinco linhas de costa e posteriormente aplicado a ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), versão 5.0. A taxa média de variação da linha de costa foi de 1,15 m/ano. As classes de vulnerabilidade foram baseadas em Thieler e Hammar-Klose (2000) e Pantusa *et al.* (2018). Prever taxas de recuo costeiro, perda de sedimentos e erosão de falésias é importante para melhor planejar o gerenciamento costeiro (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000). A taxa de variação da linha de costa é uma variável que também valida a metodologia de cálculo do IVC (MANNO *et al.*, 2013).

*Amplitude média de maré:* A variável maré está ligada aos riscos de inundação permanente e episódica (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000). A amplitude média da maré foi calculada a partir de valores históricos de 15 anos disponibilizados pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), referentes aos registros do Porto de Areia Branca (RN), o mais próximo da área

de estudo. A média anual foi de 1,83 m, que se enquadra da classe de vulnerabilidade alta, segundo a classificação de Thieler e Hammar-Klose (2000).

*Altura significativa de onda (Hs):* A altura significativa de onda é usada como indicador de energia das ondas que atingem na costa, por ser um importante influenciador de processos costeiros que impulsiona o transporte de sedimentos, resultando em erosão costeira (GAKI-PAPANASTASSIOU *et al.*, 2010). Os dados de altura significativa de onda foram baseados no modelo Wavewatch III da NOAA, disponível no site do Surf guru. O valor médio de *Hs* entre 2020 e 2021 foi de 1,71 m, classificado como de baixa vulnerabilidade.

*Nível médio do mar:* O sexto relatório do IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) prevê o aumento do nível do mar até 2100, com intervalo provável entre 0,26 a 0,55 m para uma estimativa otimista (média de 0,40 m). Para variações entre 0,58 a 1,07 m em uma estimativa pessimista, o incremento médio será 0,81 m (IPCC, 2021). Qualquer erosão ou avanço visível na costa está diretamente relacionado com a variação do nível do mar (GHOUSSEIN *et al.*, 2018). Partindo deste pressuposto, variações superiores a 1,36 mm/ano enquadram-se na classe de vulnerabilidade muito alta (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000). Segundo Lopes (2021), todos cenários propostos pelo relatório do IPCC apresentam variações superiores a 1,36 mm/ano.

### 6.3 Resultados

As taxas de variação da linha de costa e a declividade da costa apresentaram valores IVC que variaram entre muito baixa a muito alta vulnerabilidade. Já em relação à variável geomorfologia, o registro foi apenas de duas feições classificadas como baixa e muito alta vulnerabilidade (Tabela 12). Quanto às variáveis hidrodinâmicas os valores foram constantes, a amplitude média de maré apresentou uma média correspondente a alta vulnerabilidade, a altura significativa de onda apresentou uma média correspondente a baixa vulnerabilidade e o nível médio do mar com valor correspondente a muito alta vulnerabilidade.

Tabela 12 - Valores de vulnerabilidade por variáveis

<b>Variáveis</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Taxa de variação da linha de costa	0,2	0,48	1,0	± 0,21
Declividade da costa	0,2	0,39	1,0	± 0,24
Geomorfologia	0,4	0,93	1,0	± 0,19

Fonte: Autor.

As variáveis envolvidas no processo, apresentaram valores do índice de vulnerabilidade diferentes ao longo da linha de costa (Tabela 13).

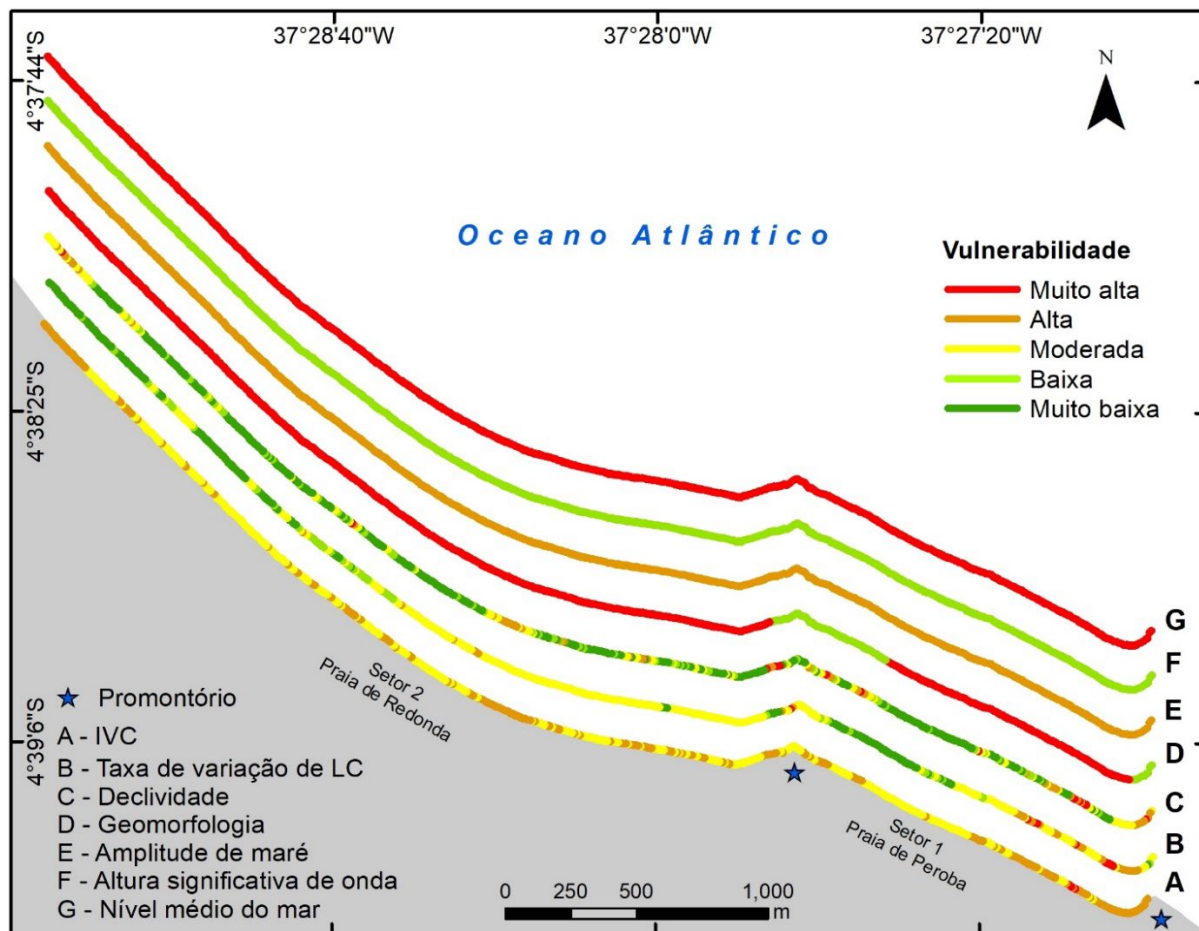
Tabela 13 - Valores do Índice de Vulnerabilidade Costeira ao longo da linha de costa

<b>Variáveis</b>	<b>Ranking de vulnerabilidade</b>									
	<b>Muito baixa (1)</b>		<b>Baixa (2)</b>		<b>Moderada (3)</b>		<b>Alta (4)</b>		<b>Muito alta (5)</b>	
	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
Taxa de variação da linha de costa (m/ano)	1550	30,57	560	11,05	2530	49,90	330	6,51	100	1,97
Declividade da costa (%)	2770	54,63	650	12,82	970	19,13	520	10,26	160	3,16
Geomorfologia	-	-	620	12,23	-	-	-	-	4450	87,77
Amplitude média de maré (m)	-	-	-	-	-	-	5070	100	-	-
Altura significativa de onda (m)	-	-	5070	100	-	-	-	-	-	-
Nível médio do mar (mm/ano)	-	-	-	-	-	-	-	-	5070	100

Fonte: Autor.

Implementado o IVC, os níveis de vulnerabilidade encontrados variaram de moderado a muito alto (Figura 35A), onde os valores variaram entre 0,47 e 0,85, com média de  $0,61 \pm 0,07$ . Este valor indicou uma classificação de alta vulnerabilidade costeira entre o trecho das praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí. Os trechos com registro de vulnerabilidade muito alta encontram-se na porção leste da praia de Peroba e os valores variaram entre 0,82 e 0,85.

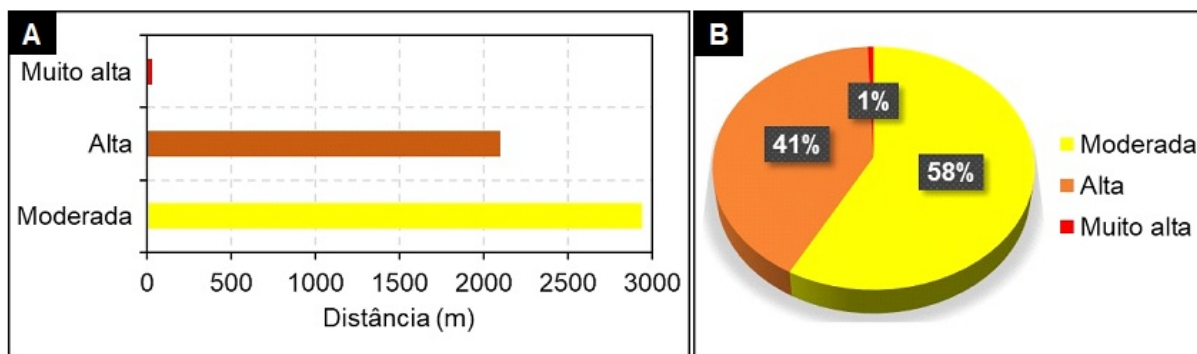
Figura 35 - (A) IVC: Índice de vulnerabilidade costeira entre as praias de Peroba e Redonda; (B - G) Classes de índice de vulnerabilidade costeira por variáveis. LC: linha de costa.



Fonte: Autor.

A Figura 36 mostra os gráficos de distância e porcentagem de vulnerabilidade costeira onde dos 5.070 m de linha de costa do trecho analisado, cerca de 2.940 m (58%) foram registrados como trecho de moderada vulnerabilidade, 2.100 m (41%) como trecho de alta vulnerabilidade e cerca de 30 m (1%) como de muito alta vulnerabilidade.

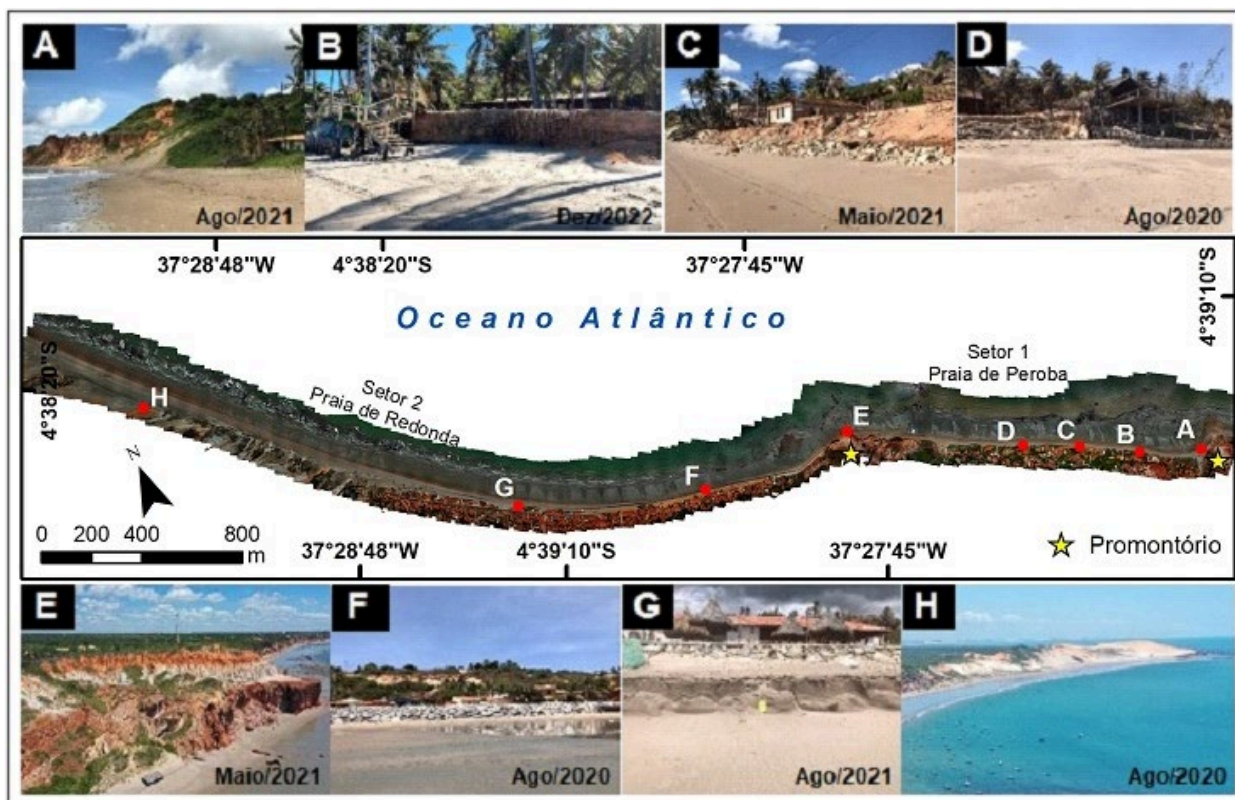
Figura 36 - Classes de vulnerabilidade costeira. (A) Distância em relação a linha de costa; (B) Porcentagem de vulnerabilidade ao longo do trecho analisado.



Fonte: Autor.

O índice de vulnerabilidade mais alto está concentrado a leste do setor 1, coincidindo com as maiores variações negativas da linha de costa (Figura 35A e 37B, C e D). No setor 2, os trechos de alta vulnerabilidade se encontram distribuídos ao longo do subsetor leste, área com estruturas de contenção à erosão (Figura 35A e 37F e G), enquanto que o subsetor a oeste apresenta uma vulnerabilidade moderada com trechos localizados de alta vulnerabilidade.

Figura 37 - Trechos de praia representando diferentes morfologias face ao nível de resposta da linha de costa em relação aos riscos físicos devido à interação com mar. (A) Promontório rochoso no extremo leste do setor 1; (B, C e D) Trechos do setor 1 que representam uma alta vulnerabilidade costeira; (E) Área de falésia ativa com promontório rochoso entre os setores 1 e 2; (F e G) Trechos do setor 2 com vulnerabilidade alta e temporariamente controlada devido à estrutura de contenção à erosão; (H) Trecho com uma extensa área de retropraia (área de conservação).



Fonte: Autor.

## 6.4 Discussão

A classe de vulnerabilidade moderada coincide com trechos de praia onde ocorrem maiores taxas de progradação da linha de costa, principalmente nas porções a oeste dos dois setores analisados. Os trechos de costa com vulnerabilidade alta estão concentrados nas porções mais a leste, também coincidindo com as maiores taxas de retrogradação da linha de costa. A linha de costa variou a uma taxa correspondente a 1,15 m/ano, onde o setor 1, o mais vulnerável, apresentou uma taxa média equivalente a 0,87 m/ano e no setor 2 a taxa média foi de 1,27 m/ano. Meireles *et al.* (2020) descreveram o trecho entre as praias de Peroba e a porção leste de Redonda como estágio crítico de erosão e a porção oeste de Redonda como temporariamente estável face à elevação do

nível do mar. Neste trabalho, o estágio temporariamente estável também foi encontrado ao longo do trecho oeste da praia de Peroba (Figura 35A).

A variável geomorfologia apresenta trechos com baixa e muito alta vulnerabilidade. Os trechos de baixa vulnerabilidade estão associados às falésias ativas e os de alta, às porções de praias arenosas (Figura 35D). A geomorfologia de falésias proporciona alta declividade na linha de costa junto ao sopé da falésia e isto faz com que a vulnerabilidade face à elevação do nível mar, seja minimizada nos trechos com declividade muito íngreme apesar dos valores terem apontado para classificações de moderada a alta vulnerabilidade. Por mais que os processos erosivos estejam num estágio progressivo, em áreas de declividade íngreme devido à presença de falésias ativas, a velocidade de erosão é minimizada (HEGDE; RUJU, 2007; MEIRELES *et al.*, 2020). Pontos localizados de falésia ativa apresentaram alta vulnerabilidade e estes valores coincidiram com taxas de recuo da linha de costa iguais ou superior a 2 m/ano. Processos erosivos em falésia na área analisada foram reportados por Silva (2021) em sua análise de vulnerabilidade de erosão de falésias no leste do Ceará.

Na porção oeste da praia de Redonda, área caracterizada por campo de dunas que integram a reserva estadual marinha de Ponta Grossa, há uma ampla região de retropraia constituída por dunas frontais e campo de dunas móveis e fixas que interagem diretamente com a praia, trocando sedimentos no sentido duna-praia ou vice-versa, fazendo com que a alta taxa de vulnerabilidade desta praia arenosa seja, na prática, muito baixa em relação ao risco de perda de patrimônio edificado como resultado de impacto de erosão. A ausência da pressão urbana neste subsetor da praia de Redonda também minimiza a vulnerabilidade local e impactos sociais.

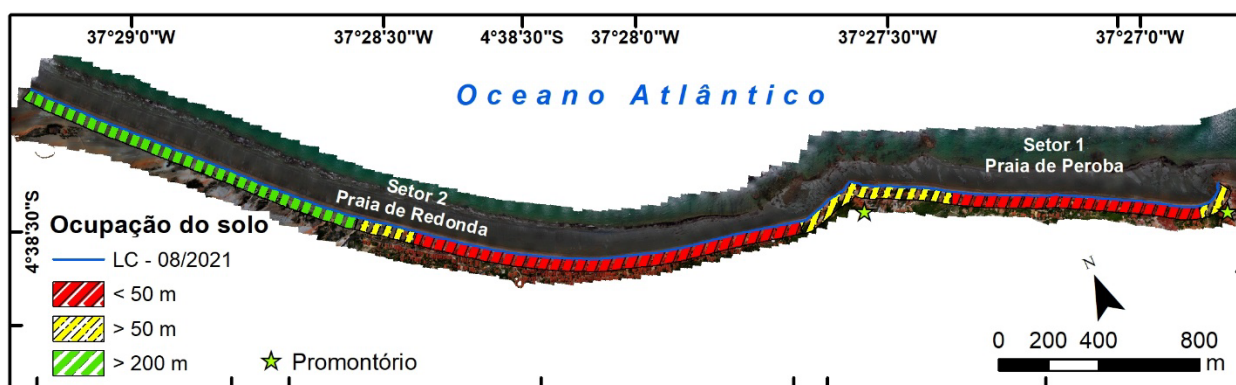
A alta amplitude de maré (1,83 m) associada à baixa declividade da faixa de praia são as variáveis que mais contribuem na variação do IVC na área. Quando conjugadas com a altura significativa de onda, aumentam a vulnerabilidade costeira face à elevação do nível do mar em relação à capacidade de resposta num cenário de eventos extremos. Ações antrópicas tem fortemente influenciado os processos costeiros e, tratando-se de praias arenosas, muitas vezes tem sido a principal causa da vulnerabilidade costeira, tais como construções em áreas próximas à linha de costa, bem como a mineração de areia e aterros em novos locais, construção de estruturas de contenção a erosão sem o devido respeito aos processos geológicos (THIELER; HAMMAR-KLOSE, 2000; GHOUSSEIN *et al.*, 2018). Em campo esta situação foi amplamente verificada no setor 1, principalmente quando comparado ao setor 2, com uma vasta presença de infraestruturas



em estágio de vulnerabilidade alta a muito alta, situadas a menos de 20 m de distância da linha de costa e, em alguns casos, juntas a atual linha de costa (Figura 37B, C e D). Este cenário local desvaloriza as infraestruturas no mercado imobiliário.

Como forma de minimizar os níveis de exposição a riscos, alguns países instituíram distância mínima da linha de costa. Segundo Dronkers (2022), vários países da América Latina estabeleceram distâncias de recuo que variam entre 20 e 80 m da linha de costa, com exceção das Bahamas e Venezuela, com distâncias inferiores a 20 m; e Brasil e Costa Rica, com distâncias entre 50 e 200 m. A distância estabelecida no Brasil, 50 m, foi definida para áreas urbanizadas e 200 m para áreas não urbanizadas (MMA, s.d.). Esta distância mínima não foi verificada na área de estudo, principalmente na praia de Peroba e no subsetor leste de Redonda, com exceção dos trechos com falésias ativas. A distância foi verificada apenas no subsetor oeste da praia de Redonda, onde não existem ocupações por ser uma área de conservação (Figura 38). Além das distâncias estabelecidas para o recuo é importante que se inclua o turismo no plano de gerenciamento costeiro sobretudo em municípios com praias de elevado potencial turístico, pois esta atividade contribui na degradação dos ambientes costeiros (LINS-DE-BARROS, 2017). Este potencial turístico pode ser encontrado nas praias de Peroba e Redonda.

Figura 38 - Uso e ocupação do solo costeiro em função a distância de recuo em relação a linha de costa. A cor vermelha indica ocupações numa distância inferior à 50 m da linha de costa, a cor amarela ocupações numa distância superior a 50 m e a cor verde sem ocupação no raio superior a 200 m (área de conservação).



Fonte: Autor.

A implementação de ações que visam minimizar a vulnerabilidade costeira está de acordo com o ODS 13 (objetivos de desenvolvimento sustentáveis) que diz: “reforçar a resiliência e a capacidade de adaptação a riscos relacionados ao clima e às catástrofes naturais em todos países; integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais” (ONU,

2018). A não tomada de medidas poderá implicar na ocorrência de danos ambientais e socioeconômicos (SANTOS *et al.*, 2015).

## 6.5 Conclusões

A metodologia aplicada neste estudo permitiu a determinação de forma detalhada da vulnerabilidade costeira de cerca de 5 km das praias de Peroba e Redonda face às alterações físicas ao longo da linha de costa, onde o valor médio de vulnerabilidade foi classificado como alto (IVC 0,61). As praias anteriormente mencionadas apresentaram três níveis de vulnerabilidade: moderada com 58% (2.940 m), alta com 41% (2.100 m) e muito alta com 1% (30 m).

A praia de Peroba foi classificada com os três níveis de vulnerabilidade, enquanto que a praia de Redonda apresentou dois níveis, moderada e alta. Os trechos de maior vulnerabilidade estão associados a praias arenosas e dunas, os de menor vulnerabilidade associados a trechos de falésias ativas, pois o processo erosivo é mais lento quando comparado com faixas de praia arenosas e de dunas.

A vulnerabilidade natural apresentada neste trabalho, pode ser relacionada a variáveis socioeconômicas na perspectiva de uso e ocupação do solo costeiro, considerando que os dados aplicados na análise de vulnerabilidade da linha de costa foram com base em produtos de alta resolução espacial. Com isso, este estudo abre espaço para que os gestores locais possam obter informações importantes que auxiliem na tomada de decisões inerente à gestão do solo costeiro, podendo reduzir os níveis de vulnerabilidade a riscos de erosão e perda de propriedades nas áreas costeiras.

Com isso, duas estratégias podem ser aplicadas sobretudo no setor 1: (1) Construção de estrutura de contenção a erosão com soluções baseadas na natureza (*nature based solutions*); (2) Realocação de infraestruturas em situação de risco para áreas seguras, para que a praia estabeleça um novo estágio de equilíbrio natural. Para qualquer ação que os gestores locais possam tomar com vista a reduzir a vulnerabilidade costeira local associada ao estágio erosivo progressivo sobretudo no setor 1, é necessário que se faça uma análise profunda entre os custos e benefícios com implantação e manutenção de uma estrutura de proteção costeira, quando comparado com os custos de realocação das pessoas em situação de vulnerabilidade. Em relação ao setor 2, é

necessário que se faça uma importante análise detalhada sobre os recursos a serem investidos com a manutenção da estrutura de proteção existente na área.

## REFERÊNCIAS

- AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C.; OLIVEIRA, D.S.; LACERDA, I.L.C. & MATOS, M.F.A. 2021. Análise de Índice de Vulnerabilidade Física com uso de Geotecnologias na Região da Barreira do Inferno. *Revista de Geociências do Nordeste*, Caicó, v.7, n.2, p.179–192. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID22034>
- APPEANING ADDO, K. 2013. Assessing Coastal Vulnerability Index to Climate Change: the Case of Accra – Ghana. Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England). *Journal of Coastal Research*. Special Issue. No. 65, pp. 1892-1897. ISSN 0749-0208. <http://dx.doi.org/10.2112/SI65-320.1>
- ARAÚJO, I.R.G.; GOMES, E.R.; GONÇALVES, R.M. & QUEIROZ, H.A.A. 2019. Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 20(1). 105–118. <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v20i1.1260>
- BARROS, E.L.; PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O. 2020. Análise dos Indicadores do Processo Erosivo no Litoral do Município de Icapuí, Ceará, Nordeste do Brasil. *Rede - Revista Eletrônica do PRODEMA*. Fortaleza. v.14. n.1. 69–86. ISSN: 1982-5528. <https://doi.org/1022411/rede2020.1401.05>
- CHACANZA, M.S.; ALMEIDA, N.M.; FREIRE, G.S.S; SILVA NETO, C.A.; ABREU NETO, J.C. & JALANE, O.I. 2022. Análise da Variação da Linha de Costa no Trecho Entre as Praias de Peroba e Redonda no Município de Icapuí-Ceará, Brasil, a Partir de Imagens de Satélite Aplicando o DSAS. São Paulo. UNESP. *Geociências*. v.41, n.4, p.377–396. 2022. ISSN: 1980-900X. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i04.16718>
- DEL RÍO, L. and GRACIA, F.J. 2009. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology* 112. 82–95. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.05.009>
- DENNER, K.; PHILLIPS, R.E.; JENKINS, R.E. and THOMAS, T. 2015. A coastal vulnerability and environmental risk assessment of Loughor Estuary, South Wales. *Ocean and Coastal Management*. 116. 478–490. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.09.002>
- DRONKERS, J. 2022. Área de recuo. Disponível em: [http://www.coastalwiki/Setback\\_area](http://www.coastalwiki/Setback_area) [acessado em 22.01.2023].
- GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; KARYMBALIS, E.; POULOS, S.E.; SENI, A. and ZOUVA, C. 2010. Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and

oceanographical parameters: the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece. *Hellenic Journal of Geosciences*, vol. 45. 109–121.

GHOUSSEIN, Y.; MHAWEJ, M.; JAFFAL, A.; FADEL, A.; EL HOURANY, R.; FAOUR, G. 2018. Vulnerability assessment of the South-Lebanese coast: A GIS-based approach. *Ocean and Coastal Management*. 158, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.028>

HEGDE, A.V. and REJU, V.R. 2007. Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India. *Journal of Coastal Research*. West Palm Beach, Florida. 23(5), 1106–1111. ISSN 0749-0208.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. Summary for policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; MATTHEWS, J.B.R.; BERGER, S.; HUANG, M.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; LEITZELL, K. and CAUD, N. (eds). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <http://dx.doi.org/10.1017/9781009157896>. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>

KANTAMANENI, K.; PHILLIPS, M.; THOMAS, T. and JENKINS, R. 2018. Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. *Ocean and Coastal Management*. 158. 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.039>

KOMI, A.; PETROPOULOS, A.; EVELPIDOU, N.; POULOS, S. and KAPSIMALIS, V. 2022. Coastal Vulnerability Assessment for Future Sea Level Rise and a Comparative Study of Two Pocket Beaches in Seasonal Scale, Ios Island, Cyclades, Greece. *Journal of Mar. Sci. Eng.* 10: 1673. <https://doi.org/10.3390/jmse10111673>

KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J.A. and DASTGHEIB, A. 2019. Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*. 178. 104799. ISSN 0964-5691. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.05.001>

KOVALEVA, O.; SERGEEV, A.; RYABCHUK, D. 2022. Coastal vulnerability index as a tool for current state assessment and anthropogenic activity planning for the Eastern Gulf of Finland coastal zone (the Baltic Sea). *Applied Geography* 143. 102710. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2022.102710>

LACERDA, I.L.C.; AMARO, V.E.; MATOS, M.F.A. and SCUDELARI, A.C. 2022. Physical vulnerability of the coastal zone under wind farms influence of the cities of Pedra Grande and São Miguel do Gostoso/RN, Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*. v.57. n.3. 422–433. ISSN 2176-9478. <https://doi.org/10.5327/Z2176-94781244>

LINS-DE-BARROS, F.M. 2017. Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions – case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. *Ocean and Coastal Management*. 149: 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2017.09.007>

LIRA, C.W.P.; FREIRE, G.S.S.; SOARES JUNIOR, F.A.; MANSO, V.A.V. 2015. Determinação da Vulnerabilidade e da Zona não Edificante para as Praias de Tabuba e Cumbuco Município de Caucaia Ceará. São Paulo. UNESP. *Geociências* v.34. n.2. 302–311.

LOPES, D.N. Análise da Dinâmica Costeira e Vulnerabilidade do Município de São Gonçalo do Amarante-CE. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Programa de Pós-graduação em Geologia. Fortaleza. 2021. 81p.

LOPES, N.D.R.; LI, T.; MATOMELA, N. and SÁ, R.M. 2022. Coastal vulnerability assessment based on multi-hazards and bio-geophysical parameters. case study – northwestern coastline of Guinea-Bissau. *Natural Hazards*. 114: 989–1013. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05420-w>

MANNO, G.; AZZARA, G.; LO RE, C.; MARTINELLO, C.; BASILE, M.; ROTIGLIANO, E.; CIRAOLO, G. 2023. Na Approach for the Validation of a Coastal Erosion Vulnerability Index: An Application in Sicily. *Journal of Mar. Sci. Eng.* 11, 23. <https://doi.org/10.3390/jmse11010023>

MEIRELES, A.J.A.; SANTOS, A.M.F. 2012. Atlas de Icapuí - CE. Projeto de Olho na Água. Editora Fundação Brasil Cidadão. 1a Edição. Fortaleza. 156p.

MEIRELES, A.J.A.; SOUSA, W.F.; SILVA, A.L.B; LIMA, A.P.S.; SILVA, J.A. 2020. Geomorfologia e os Serviços Ecológicos como Fundamentos para a Gestão Integrada da Planície Costeira de Icapuí, Ceará, Nordeste do Brasil. *Revista de Geomorfologia*. 1(1). 210–231. <https://doi.org/10.48025.ISSN2675-6900.v1n1.p210-231.2020>

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II). Brasília-DF. (s.d.). Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/pngc2\\_78.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/pngc2_78.pdf). [acessado em 12/09/2019].

MUEHE, D. 2011. Erosão Costeira - Tendência ou Eventos Extremos? O Litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management*. Vol. 11, núm. 3. pp. 315-325 Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos Lisboa, Portugal.

MUEHE, D.; FERNANDEZ, G.B.; BULHOES, E.M.R.; AZEVEDO, I.F. 2011. Avaliação da vulnerabilidade física da orla costeira em nível local, tomando como exemplo o arco praiial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 12(2). 45–58. <https://doi.org/10.20502/rbg.v12i2.234>

MUTMAINAH, H. 2022. Coastal Vulnerability at West Pasaman Regency. IOP Conf. Series: *Earth and Environmental Science*. 1105: 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1/012021>

NEVES, M.M.; BELTRÃO, J.A. & NEVES, S.M. 2010. Análise da dinâmica costeira em praias do Município de Cabedelo-PB. *Anais XVI Encontro Nacional dos Geógrafos – Crise, práxis e autonomia: espaços de resistência e de esperanças. Espaço de Diálogo e Práticas*. Porto Alegre-RS. ISBN 978-85-99907-02-3.

ONU – Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. [acessado em 23.01.2023].

PANTUSA, D.; D'ALSSANDRO, F.; RIEFOLO, L.; PRINCIPATO, F. and TOMASICCHIO, G.R. 2018. Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. *Water*. 10, 1218. <https://doi.org/10.3390/w10091218>

QUEIROZ, H.A.A.; GONÇALVES, R.M.; MISHRA, M. 2022. Characterizing global satellite-based indicators for coastal vulnerability to erosion management as exemplified by a regional level analysis from Northeast Brazil. *Science of the Total Environment* 817. 152849. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152849>

SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E.; FERREIRA, A.T.S.; BARBOZA, A.A.; FIGUEIREDO, M.C. & ARAÚJO, A.G. 2015. Metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira à Elevação do Nível Médio do Mar (NMM) em Escala Local. *Bol. Ciênc. Geod.* 21:4. 691–705. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000400040>

SILVA, R.R. Evolução e Vulnerabilidade das Falésias na Costa Leste do Ceará-Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas e Tropicais. Fortaleza. 2021. 160p.

THIELER, E.R. and HAMMAR-KLOSE, E.S. 2000. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast. U.S. Geological Survey. Woods Hole, Massachusetts.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Resultados obtidos e apresentados ao longo do trabalho permitiram entender a dinâmica dos processos erosivos e deposicionais costeiros nas praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí, analisados a partir: do comportamento da linha de costa de médio prazo com base em imagens de satélite, de variações sazonais do volume de sedimentos, da linha de costa e de perfis praias de curto prazo com base em dados obtidos por RPA e das características sedimentares sazonais com base em análise de amostras coletadas em campo e do mapeamento da vulnerabilidade ambiental. A partir do qual se pode concluir:

- a) Em 15 anos, entre 2005 e 2020, a linha de costa entre os trechos que compreende as praias de Peroba e Redonda, apresentou um estágio de estabilidade, pelos valores médios fornecidos através dos parâmetros EPR e LRR estarem na faixa de -1 a 1 m/ano. No entanto, a mesma estabilidade não podia ser entendida como equilíbrio pelos valores serem negativos e mostrarem tendências para um estágio erosivo. Análises quinquenais, entre 2005 e 2010, 2010 e 2015, e 2015 e 2020, revelaram uma possível existência de tendência cíclica entre períodos dominados por eventos retrogradacionais, intercalados por intervalos progradacionais.
- b) As análises periódicas também revelaram que os trechos situados mais a leste, sobretudo, imediatamente a sotamar dos promontórios, quer para o setor 1 assim como para o setor 2, são os mais dinâmicos em relação aos processos de progradação e retrogradação, com maior incidência para retrogradação.
- c) Resultados de dados obtidos de RPA na análise de curto prazo de variação do volume, apontaram que o setor 1 obteve um balanço positivo de sedimento e o setor 2, um balanço negativo. Em relação a linha de costa, a média apontou para estabilidade no setor 1 e uma progradação no setor 2. Ambos os setores mostraram que seus trechos lestes são áreas mais propensas a erosão e a porção oeste, mais propensa a deposição, validando assim os resultados gerados a partir das imagens de satélite. No setor 1, a erosão e retrogradação da linha de costa no trecho leste configura-o como crítico por este apresentar construções junto à posição atual da linha de costa. Já no setor 2, a erosão em volume não se configura crítica, pois a

linha de costa neste trecho encontra-se provisoriamente estabilizada por meio de estrutura de proteção costeira.

- d) Em relação aos sedimentos, as amostras distribuídas pelos diversos pontos dos dois setores praias foram classificadas majoritariamente por sedimentos de grãos de areia muito fina a fina. Os sedimentos mais finos estão associados às áreas mais propensas a erosões, sobretudo nas porções leste dos setores e os mais grossos, às áreas de maiores deposições. Presume-se que, a baixa turbulência nos padrões de energia de ondas na zona de surfe em períodos de preamar na maré baixa, associado a baixa declividade das praias e os afloramentos rochosos existentes junto dos promontórios tenham contribuído com a fraca mobilização de sedimentos mais grossos nos trechos leste, conseqüentemente mantendo a presença de sedimentos de grãos mais finos depositados no fundo da porção submersa assim como da emersa.
- e) Com base nas classificações de assimetria dos sedimentos distribuídos entre as praias de Peroba e Redonda, os quais possuem uma assimetria majoritariamente negativa e muito negativa, entende-se que as deposições ocorridas nos trechos oeste dos dois setores tenham muito pouca relação com sedimentos oriundos de fontes distantes do local, podendo presumir-se que as deposições a oeste sejam resultadas de sedimentos erodidos nos trechos leste e transferidos pelo processo conhecido como mudança do espaço de acomodação.
- f) Nas áreas de intensa ocupação humana, mesmo que o trecho costeiro esteja protegido por estrutura de proteção (porção leste da praia de Redonda), a erosão continuará ocorrendo a uma taxa superior que a de acreção, devido aos bloqueios de fontes continentais de nutrição das praias.
- g) O trecho praias em análise foi classificado com um nível alta de vulnerabilidade costeira com um IVC de 0,61, representados por três níveis de vulnerabilidade: moderada, alta e muito alta.

Considerando os resultados do monitoramento anual terem fornecido informações em relação à dinâmica sedimentar das praias de Peroba e Redonda, recomenda-se que nos próximos estudos seja feito um monitoramento com intervalo temporal mais estendido, com levantamentos anuais ou semestrais, de modo a obter informações que agreguem maior robustez nos resultados e



que permita que os gestores tomem as melhores decisões em relação a ações práticas que visam minimizar os problemas associados a erosão costeira.

Também se recomenda estudos adicionais que combinem o uso de tecnologia de RPA, histórico de imagens de satélite e uma profunda análise da possível influência da neotectônica nos processos costeiros.

Recomenda-se aos gestores, à escolha de uma das estratégias que visam minimizar os riscos face a processos progressivos de erosão costeira, sobretudo no setor 1: (1) Construção de estrutura de contenção a erosão com soluções baseadas na natureza (*nature based solutions*); e (2) Realocação de infraestruturas em situação de risco para áreas seguras, para que a praia estabeleça um novo estágio de equilíbrio natural. Para qualquer ação que os gestores locais possam tomar com vista a reduzir a vulnerabilidade costeira local associada ao estágio erosivo progressivo, sobretudo no setor 1, é necessário que se faça uma análise profunda entre os custos e benefícios com a implantação e manutenção de uma estrutura de proteção costeira, quando comparados com os custos de realocação das pessoas em situação de vulnerabilidade. Em relação ao setor 2, é necessário que se faça uma importante análise detalhada sobre os recursos a serem investidos com a manutenção da estrutura de proteção existente na área.

## REFERÊNCIAS

ALADWANI, N.S. Shoreline change rate dynamics analysis and prediction of future positions using satellite imagery for the southern coast of Kuwait: a case study. **Oceanologia**, *S. l.*, v. 64, . 3, p. 417–432, 2022.

ALBUQUERQUE, M.G.; ALVES, D.C.L.; ESPINOZA, J.M.A.; OLIVEIRA U.R.; SIMÕES, R.S., Determining shoreline response to meteo-oceanographic events using remote sensing and unmanned aerial vehicle (UAV): case study in southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, n. 85, p. 766-770, 2018a. Special Issue. Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2018 (Busan, Republic of Korea). Eds.: SHIM, J.-S.; CHUN, I.; LIM, H.S.

ALBUQUERQUE, M.G.; ESPINOZA, J.M.A.; ALVES, D.C.L., Uso de geotecnologias no gerenciamento de riscos associados à ação de eventos meteorológicos de grande intensidade no extremo sul do Brasil. *In*: ROQUE, A. C. *et al.* **Mares e Litorais: Perspectivas transdisciplinares**: tomo VII da Rede BRASPOR. Rio de Janeiro: UERJ, 2018b. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Deivid-Leal-Alves/publication/341827754>. Acesso em: 05/04/2021.

ALFREDINI, P. **Obras e Gestão de Portos e Costas**: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

ALLEN, J. R. Field evaluation of beach profile response to wave steepness as predicted by the Dean model. **Coastal Engineering**, [*S. l.*], v. 9, n. 1, p. 71-80, 1985.

ALMEIDA, J.C.D.; ALBUQUERQUE, M.G.; ALVES, D.C.L.; ESPINOZA, J.M.A. Uso de aeronave remotamente pilotada (ARP) no estudo da geomorfometria de sangradouros: estudo de caso do balneário Cassino, RS. **Arquivos de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 53, n. 2, p. 61-69, 2020.

AMORIM, T.S. **Variações Geomorfológicas**: análise comparativa da evolução da linha de costa da região bragantina: praia de Perimirim (Augusto Corrêa), praia de Ajuruteua (Bragança) e suas implicações socioambientais. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Geografia)– Universidade Federal do Pará, Mocajuba, 2018.

AMARO, V.E.; GOMES, L.R.S.; LIMA, F.G.F.; SCUDELARI, A.C.; NEVES, C.F.; BUSMAN, D.V.; SANTOS, A.L.S. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra Beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, [*S. l.*], v. 38, n. 1, p. 1-25, 2015.

AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C.; OLIVEIRA, D.S.; LACERDA, I.L.C.; MATOS, M.F.A. 2021. Análise de índice de vulnerabilidade física com uso de geotecnologias na região da Barreira do Inferno. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 7, n. 2, p. 179–192.

- ANAM, M.M.; AL-JABIR, A.; JAHID HASSN, G.M. Bank-Line Behaviour of the Main Rivers Located Within Sundarbans Using Digital Shoreline Analysis System. **MIST International Journal of Science and Technology**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 11–21, 2021.
- ANDRADE, C.F. **Dinâmica, Erosão e Conservação das Zonas de Praias**. Lisboa: Parque Expo 98, 1998.
- ANDRADE, R.I.L. **Dinâmica e conflitos na Zona Costeira de Aquiraz: Porto das Dunas e Prainha em análise**. 2008. Dissertação (Mestrado em Geologia)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.
- APPEANING ADDO, K. Assessing Coastal Vulnerability Index to Climate Change: the Case of Accra – Ghana. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 65, p. 1892-1897, 2013. Special Issue.
- APPEANING ADDO, K. Assessing ocean wave dynamics, potential sediment transport, and coastal erosion along Accra coast in Ghana. *In*: ALMAR, R.; ALMEIDA, L.P.; TRUNG VIET, N., and SALL, M. (ed.). Tropical Coastal and Estuarine Dynamics. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, n. 81, Special Issue, p. 76–85, 2018.
- ARAÚJO, I.R.G.; GOMES, E.R.; GONÇALVES, R.M.; QUEIROZ, H.A.A. Estimativa do índice de vulnerabilidade à erosão costeira (IVC) para o litoral do Piauí, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 105-118, 2019.
- BAIG, M.R.I.; AHMAD, I.A.; SHAHFAHAD; TAYYAB, M.; RAHMAN, A. Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). **Annals of GIS**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 361–376, 2020.
- BARROS, E.L. **Erosão Costeira no Litoral do Município de Icapuí-CE na Última Década: Causas, Consequências e Perspectivas Futuras**. 2018. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- BARROS, E.L.; PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O. Análise dos Indicadores do Processo Erosivo no Litoral do Município de Icapuí, Ceará, Nordeste do Brasil. **Rede: Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 14, n. 1, p. 69-86, 2020.
- BASCO, D.R. Seawall impacts on adjacent beaches: Separating fact from fiction. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 39, p. 741-744, 2006. Special Issue. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium (ICS 2004).
- BELCHIOR, C.C. **Gestão Costeira Integrada – Estudo de Caso do Projeto ECOMANAGE na Região Estuarina de Santos – São Vicente, SP, Brasil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental)–Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- BLANCHARD, S.D.; ROGAN, J.; WOODCOCK, D.W. Geomorphic Change Analysis Using ASTER and SRTM Digital Elevation Models in Central Massachusetts, USA. **GIScience & Remote Sensing**, [S. l.], v. 47, n. 1, p. 1-24, 2010.

BRASINGTON, J.; LANGHAM, J.; RUMSBY, B., Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport. **Geomorphology**, [S. l.], n. 53, p. 299-316, 2003.

BORETTO, G.M.; ROUZAUT, S.; CIOCCALE, M.; GORDILLO, S.; BENITEZ, Y. La estructura cortical del arco de las Antillas Menores estimada a partir de técnica de funciones receptoras. **Revista Mexicana de Ciencias Geológicas**, [S. l.], v. 35, n. 3. p. 291-306, 2018.

CALLIARI, L.J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F.G.; TOLDO Jr., E., Morfodinâmica praial: uma breve revisão. **Revista Brasileira de Oceanografia**, São Paulo, v. 51, p. 63-78, 2003.

CÂMARA, I.F.; RODRIGUES DA SILVA, R. Mapeamento e Evolução da Ocupação Irregular em Falésias do Litoral Leste Cearense, Nordeste do Brasil. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 4, p. 1033-1046, 2021.

CASELLA, E.; ROVERE, A.; PEDRONCINI, A.; MUCERINO, L.; CASELLA, M.; CUSATI, L.A.; VACCHI, M.; FERRARI, M.; FIRPO, M. Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, [S. l.], v. 149, p. 160-167, 2014.

CBMSC. **Salvamento Aquático e Coordenação de Praia: Versão 1**. Florianópolis: CBMSC, 2016.

CHACANZA, M.S.; ALMEIDA, N.M.; FREIRE, G.S.S; SILVA NETO, C.A.; ABREU NETO, J.C.; JALANE, O.I. Análise da Variação da Linha de Costa no Trecho Entre as Praias de Peroba e Redonda no Município de Icapuí-Ceará, Brasil, a Partir de Imagens de Satélite Aplicando o DSAS. **Geociências**, São Paulo, v. 41, n. 4, p. 377-396, 2022.

CHEN, B.; YANG, Y.; WEN, H.; RUAN, H.; ZHOU Z.; LUO, K.; ZHONG, F. High-resolution monitoring of – Beach topography and its change using unmanned aerial vehicle imagery. **Ocean and Coastal Management**, [S. l.], v. 160, p. 103-116, 2018.

CLAUDINO-SALES, V.; CARVALHO, A.M. Dinâmica Costeira Controlada por Promontórios no Estado do Ceará, Nordeste do Brasil. **Geociências**, S. l., v. 33, n. 4, p. 579–595, 2014.

COSTA, L.R.F.G. **Geotecnologias aplicadas ao monitoramento da cobertura sedimentar do litoral de Icapuí (Ceará) entre 1985 e 2018**. 2019. Tese (Doutorado em Geologia)– Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

COSTA, S.; COELHO, C. Northwest coast of Portugal – Past behavior and future coastal defense options. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], v. 65, Special Issue, p. 921-926, 2013.

COWELL, P.J.; THOM, B.J. Morphodynamic of coastal evolution. *In*: CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C.D. (ed.). **Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. p. 33-59.

DAI, W.Q.; LI, H.; ZHOU, Z.; CYBELE, S.; LU, C.Z.; ZHAO, K.; ZHANG, X.Y.; YANG, H.T.; LI, D.Y., UAV Photogrammetry for Elevation Monitoring of Intertidal Mudflats. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 85, Special Issue, p. 236-240, 2018.

DEL RÍO, L.; GRACIA, F.J. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. **Geomorphology**, [S. l.], v. 112, p. 82-95, 2009.

DEL RÍO, L.; GRACIA, F.J.; BENAVENTE, J. Multiple-source cliff erosion in Southern Spain: current risk and future perspectives. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 75, Special Issue, p. 1072-1076, 2016.

DELGADILLO-CALZADILLA, M.A.; MENDOZA, E.; SILVA, R.; GONZÁLEZ-VÁZQUEZ, J.A.; INFANTE-MATA, D. Beach erosion in San Benito Chiapas, Mexico: Assessment and possible solution. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 71, Special Issue, p. 114-121, 2014.

DENNER, K.; PHILLIPS, R.E.; JENKINS, R.E.; THOMAS, T. A coastal vulnerability and environmental risk assessment of Loughor Estuary, South Wales. **Ocean and Coastal Management**, [S. l.], v. 116, p. 478-490, 2015.

DHN. **Tábuas de maré**. [S. l.]: Marinha do Brasil, [20--?]. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 26 out. 2021.

DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. **Coastal Barriers**: an introduction. *In*: DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. (Ed.), *Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil*. Heidelberg: Springer, 2009. p. 1-15.

DRONKERS, J. Área de recuo. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível no site: [http://www.coastalwiki/Setback\\_area](http://www.coastalwiki/Setback_area) acessado em 22 jan. 2023.

FLORENZANO, T.G., Introdução à Geomorfologia. *In*: FLORENZANO, T.G. (org.). **Geomorfologia**: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

ESTEVES, L.S.; FINKL, C.W., Jr. The problem of critically eroded areas (CEA): An evaluation of Florida beaches. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 26, p. 11-18, 1998. Special issue. Proceedings of the Palm Beach International Coastal Symposium, 19-23 May, 1998.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 3-26, 1957.

FUNCEME. [Site **Séries históricas**]. Fortaleza: FUNCEME, 2021. Disponível em: [http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Download\\_de\\_series\\_historicas/DownloadChuvasPublico.php](http://www.funceme.br/produtos/script/chuvas/Download_de_series_historicas/DownloadChuvasPublico.php). Acesso em: 27 mar. 2021.

GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; KARYMBALIS, E.; POULOS, S.E.; SENI, A.; ZOUVA, C. Coastal vulnerability assessment to sea-level rise based on geomorphological and

oceanographical parameters: the case of Argolikos Gulf, Peloponnese, Greece. **Hellenic Journal of Geosciences**, [S. l.], v. 45, p. 109-121, 2010.

GARROTE, J.; DÍAZ-ÁLVAREZ, A.; NGANHANE, H.V.; HEYDT, G.G. The Severe 2013-14 Winter Storms in the Historical Evolution of Cantabrian (Northern Spain) Beach-Dune Systems. **Geosciences**, [S. l.], v. 8, n. 12, p. 1-16, 2018.

GHOUSSEIN, Y.; MHAWAJ, M.; JAFFAL, A.; FADEL, A.; EL HOURANY, R.; FAOUR, G. Vulnerability assessment of the South-Lebanese coast: A GIS-based approach. **Ocean and Coastal Management**, [S. l.], v. 158, p. 56-63, 2018.

GI-GERCO/CIRM. **Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira**. Brasília, DF: CIRM, 2018.

GOVAERE, G.; VIQUEZ, R.; ALFARO, H. Use of Drone Technology and Photogrammetry for Beach Morphodynamics and Breakwater Monitoring. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE APPLICATION OF PHYSICAL MODELLING IN COASTAL AND PORT ENGINEERING AND SCIENCE (COASTLAB16), 6., 2016, Ottawa. **Anais [...]**. Ottawa: UCR, 2016.

GRAAFF, J.V.; KOSTER, M.J. Dune and beach erosion and nourishment. *In*: PILARCZYK, K.W. (ed.). **Coastal Protection**. Rotterdam: Balkema, 1990.

GRIGGS, G.; PATSCH, K. The protection/hardening of California's coast: Times are changing. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 35, n. 5, p. 1051-1061, 2019.

HEGDE, A.V.; REJU, V.R. Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India. **Journal of Coastal Research**, West Palm Beach, v. 23, n. 5, p. 1106-1111, 2007.

HIMMELSTOSS, E.A.; HENDERSON, R.E.; KRATZMANN, M.G.; FARRIS, A.S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**. Virginia: USGS, 2018.

HOUSTON, J.R.; DEAN, R.G. Shoreline change on the east coast of Florida. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 30, n. 4, p. 647-660, 2014.

HOUSTON, J.R. Shoreline response to sea-level rise on the southwest coast of Florida. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 31, n. 4, p. 777-789, 2015.

HOUSTON, J.R. Shoreline change in response to sea-level rise on Florida's west coast. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 33, n. 6, p. 1243-1260, 2017.

IBGE. **Indicadores de desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/biblioteca/visualizacao/livros/liv94254.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2021.

IBGE. **Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 1º de Julho de 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. Disponível em:

[https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas\\_de\\_Populacao/Estimativas\\_2021/POP2021\\_20221212.pdf](https://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2021/POP2021_20221212.pdf). Acesso em: 10 fev. 2023.

IPCC; MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; CHEN, Y.; GOLDFARB, L.; GOMIS, M.I.; MATTHEWS, J.B.R.; BERGER, S.; HUANG, M.; YELEKÇI, O.; YU, R.; ZHOU, B.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.K.; WATERFIELD, T.; LEITZELL, K.; CAUD, N. (ed.). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 28 nov. 2021.

IPECE. **Ceará em números. Caracterização territorial**. Fortaleza: Ipece, 2007. Disponível em: [http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara\\_em\\_numeros/2008/infra/](http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/ceara_em_numeros/2008/infra/). Acesso em: 3 jul. 2018.

ISLAM, M.A.; HOSSAIN, M.S.; HASAN, T.; MURSHED, S. Shoreline Changes Along the Kutubdia Island, South East Bangladesh Using Digital Shoreline Analysis System. **Bangladesh Journal Science Research**, [S. l.], v. 27, n. 1, p. 99-108, 2014.

JAKOB, A.A.E.; YOUNG, A.F. O uso de métodos de interpolação especial de dados nas análises sociodemográficas. *In*: ENCONTRO DE ESTUDOS POPULACIONAIS, 15., 2006, Caxambu, MG. **Anais [...]**. Caxambú, MG: ABEP, 2006. p. 1-22.

JANUŠAITĖ, R.; KARALIŪNAS, V.; BEVAINIS, L. Application of Remote Sensing Methods in Research of Nearshore Sandbars, Curonian Spit, Lithuania. **Baltic J. Modern Computing**, [S. l.], v. 7, n. 4, p. 449-562, 2019.

JAUD, M.; DELACOURT, C.; DANTEC, N.L.; ALLEMAND, P.; AMMANN, J.; GRANDJEAN, P.; NOUAILLE, H.; PRUNIER, C.; CUQ, V.; AUGEREAU, E.; COCQUEMPOT, L.; FLOC'H, F. Diachronic UAV Photogrammetry of a Sandy Beach in Brittany (France) for a Long-Term Coastal Observatory. **International Journal of Geo-Information**, [S. l.], v. 8, n. 6, p. 1-13, 2019.

JAUD, M.; BERTIN, S.; BEAUVERGER, M.; AUGEREAU, E.; DELACOURT, C. RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 12, n. 11, p. 1-15, 2020.

JAYSON-QUASHIGAH, P-N.; APPEANING ADDO, K.; KUFOGBE, S.K. Shoreline monitoring using medium resolution satellite imagery, a case study of the eastern coast of Ghana. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 65, Special Issue, p.511-516, 2013.

JAYSON-QUASHIGAH, P-N.; APPEANING ADDO, K.; AMISIGO, B.; WIAFE, G. Assessment of short-term beach sediment change in the Volta Delta coast in Ghana using data from Unmanned Aerial Vehicles (Drone). **Ocean and Coastal Management**, [S. l.], v. 182, 2019.

JESUS, L.V.; ANDRADE, A.C.S.; CONCEIÇÃO, H. Textura e composição dos sedimentos das praias da atalaia e dos artistas, Aracaju, Sergipe. **Caderno de Geociências**, Salvador, v. 14. n. 1-2, p. 36-45, 2018.

KALIRAJ, S.; CHANDRASEKAR, N.; RAMACHANDRAN, K.K. Mapping of coastal landforms and volumetric change analysis in the south west coast of Kanyakumari, South India using remote sensing and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, [S. l.], v. 20, n. 2, p. 265-282, 2017.

KANTAMANENI, K.; PHILLIPS, M.; THOMAS, T.; JENKINS, R. Assessing coastal vulnerability: Development of a combined physical and economic index. **Ocean and Coastal Management** [S. l.], v. 158, p. 164–175, 2018.

KIM, C.H.; KIM, H.W.; PARK, C.H.; KIM, W.H.; LEE, M.H.; CHOI, S.Y.; DO, J.D. Coastline change measurement using shipborne mobile LiDAR in Anmok Beach, Gangneung, Korea. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 85, Special Issue, p. 601-605, 2018.

KOMI, A.; PETROPOULOS, A.; EVELPIDOU, N.; POULOS, S.; KAPSIMALIS, V. Coastal Vulnerability Assessment for Future Sea Level Rise and a Comparative Study of Two Pocket Beaches in Seasonal Scale, Ios Island, Cyclades, Greece. **Journal of Marine Science Engineering**, [S. l.], v. 10, n. 11, p. 1-22, 2022.

KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J.A.; DASTGHEIB, A. Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. **Ocean and Coastal Management**, [S. l.], v. 178, p. 1-13, 2019.

KOVALEVA, O.; SERGEEV, A.; RYABCHUK, D. Coastal vulnerability index as a tool for current state assessment and anthropogenic activity planning for the Eastern Gulf of Finland coastal zone (the Baltic Sea). **Applied Geography**, [S. l.], v. 143, 2022.

KUC CASTILLA, A.; MENDOZA, E.; POSADA, G.; SILVA, R. Design of hybrid ecosystem based strategies for the control of erosion at Sabancuy beach, Campeche, Mexico.. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 92, Special Issue, p. 85–91, 2019.

LANE, S.N.; WESTAWAY, R.M.; HICKS, D.M. Estimation of Erosion and Deposition Volumes in a Large, Gravel-Bed, Braided River Using Synoptic Remote Sensing. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 28, n. 3, p. 249-271, 2003.

LACERDA, I.L.C.; AMARO, V.E.; MATOS, M.F.A.; SCUDELARI, A.C. Physical vulnerability of the coastal zone under wind farms influence of the cities of Pedra Grande and São Miguel do Gostoso/RN, Brazil. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, [S. l.], v. 57, n. 3, p. 422-433, 2022.

LAPORTE-FAURET, Q.; MARIEU, V.; CASTELLE, B.; MICHALET, R.; BUJAN, A.; ROSEBERRY, D. Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change



Monitoring Using Photogrammetry. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 1-16, 2019.

LEHUGEUR, L.G.O.; SILVA, P.R.F.G.; SILVA, J.G.; CASTELO BRANCO, M.P.N.; RODRIGUES, A.C.B. Morfodinâmica da praia da Barra do Ceará, Município de Fortaleza, Estado do Ceará, Brasil. **Arquivo de Ciências do Mar**, Fortaleza, v. 36, n. 1-2, p. 7-17, 2003.

LINS-DE-BARROS, F.M. Integrated coastal vulnerability assessment: A methodology for coastal cities management integrating socioeconomic, physical and environmental dimensions – case study of Região dos Lagos, Rio de Janeiro, Brazil. **Ocean and Coastal Management**, [S. l.], v. 149, p. 1-11, 2017.

LIRA, C.W.P.; FREIRE, G.S.S.; SOARES JUNIOR, F.A.; MANSO, V.A.V. Determinação da Vulnerabilidade e da Zona não Edificante para as Praias de Tabuba e Cumbuco Município de Caucaia Ceará. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 2, p. 302–311, 2015.

LOPES, D.N. **Análise da dinâmica costeira e vulnerabilidade do município de São Gonçalo do Amarante-CE**. 2021. Tese (Doutorado em Geologia)–Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2021.

LOPES, N.D.R.; LI, T.; MATOMELA, N.; SÁ, R.M. Coastal vulnerability assessment based on multi-hazards and bio-geophysical parameters. case study – northwestern coastline of Guinea-Bissau. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 114, p. 989-1013, 2022.

MACÊDO, R.J.A. **Caracterização morfodinâmica e geoambiental da praia de Maracaípe**, Ipojuca - PE. 2011. Dissertação (Mestrado em Geociências)–Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MANNO, G.; AZZARA, G.; LO RE, C.; MARTINELLO, C.; BASILE, M.; ROTIGLIANO, E.; CIRAOLO, G. Na Approach for the Validation of a Coastal Erosion Vulnerability Index: An Application in Sicily. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 1, 2023.

MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALA, R.C.S.; CUNHA, A.P.; BRITO, S.; MORAES, O.L.L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Rio de Janeiro, v. 90, n. 2, sup. 1, 2018.

MARINO, M.T.R.D.; FREIRE, G.S.S. Análise da evolução da linha de costa entre as Praias do Futuro e Porto das Dunas, Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, Portugal, v. 13, n. 1, p. 113-129, 2013.

MASSELINK, G.; CASTELLE, B.; SCOTT, T.; DODET, G.; SUANEZ, S.; JACKSON, D.; FLOC'H, F. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 43, n. 5, p. 2135-2143, 2016.

MARTÍNEZ, R.; SILVA, R.; MENDOZA, E. Identification of coastal erosion causes in Matanchén Bay, San Blas, Nayarit, Mexico. *In*: SILVA, R.; STRUSÍNSKA-CORREIA, A. (eds.), Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases. **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, n. 71, p. 93-99, 2014.

MARTINS, L.R. Análise Recente de Sedimentos e Tamanho de Grão. **Gravel**, Porto Alegre, n. 2, p. 40-56, 2003.

MASSELINK, G.; SHORT, A.D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology: A conceptual beach model. **Journal of Coastal Research**, Fort Lauderdale, v. 9, n. 3, p. 785-800, 1993.

MASSELINK, G.; CASTELLE, B.; SCOTT, T.; DODET, G.; SUANEZ, S.; JACKSON, D.; FLOC'H, F. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. **Geophysical Research Letters**, [S. l.], v. 43, n. 5, p. 2135-2143, 2016.

MCLAREN, P.; BOWLES, D. The effects of sediment transport on grain-size distributions. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S. l.], v. 55, n. 4, p. 457-447, 1985.

MEIRELES, A.J.A.; SANTOS, A.M.F. **Atlas de Icapuí - CE**. 1. ed. Fortaleza: Fundação Brasil Cidadão, 2012. Projeto de Olho na Água.

MEIRELES, A.J.A.; SOUZA, W.F.; LIMA, A.P.S. **Atlas Socioambiental Cartografia Social das Comunidades de Icapuí**. 1. ed. Fortaleza: Fundação Brasil Cidadão, 2016. Projeto de Olho na Água.

MEIRELES, A.J.A.; SOUZA, W.F.; SILVA, A.L.B.; LIMA, A.P.S.; SILVA, J.A. Geomorfologia e os Serviços Ecológicos como Fundamentos para a Gestão Integrada da Planície Costeira de Icapuí, Ceará, Nordeste do Brasil. **Revista de Geomorfologia**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 210–231, 2020.

MMA. **Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II)**. Brasília, DF: MMA, [199-?]. Disponível em: [https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_sigercom/\\_arquivos/pngc2\\_78.pdf](https://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_arquivos/pngc2_78.pdf). Acesso em: 12 set. 2019.

MORORÓ, E.A.A.; SILVA, R.M.N.; SOUTO, M.V.S.; DUARTE, C.R. Análise de 22 anos (1991 – 2013) da evolução costeira para a porção do litoral cearense, a oeste da cidade de Fortaleza, por meio de imagens históricas da série Landsat. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: INPE, 2015.

MOURA, F.M. **Análise Geoespacial de Dados Multiespectrais no Estudo Temporal da Linha de Costa da Praia de Parajuru, Ceará – Nordeste do Brasil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Geologia)–Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2018.

MUEHE, D. Geomorfologia Costeira. *In*: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (coord.). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. 3. ed. Rio de Janeiro: BCD União de Editoras, 1998.

MUEHE, D. Critérios Morfodinâmicos para o Estabelecimento de Limites da Orla Costeira para Fins de Gerenciamento. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 35-44, 2001.

MUEHE, D. Erosion in the brazilian coastal zone: an overview. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], special issue 39, p. 43-48, 2006. Proceedings of the 8th International Coastal Symposium. Itajaí, SC, Brazil.

MUEHE, D. Erosão Costeira: tendência ou eventos extremos? o litoral entre Rio de Janeiro e Cabo Frio, Brasil. **Revista de Gestão Costeira**, Portugal, v. 11, n. 3, p. 315-325, 2011.

MUEHE, D. Erosão costeira, mudança do clima e vulnerabilidade. *In*: GUERRA, A.J.T.; JORGE, M.C.O. (org.). **Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. p. 161-186.

MUEHE, D.; FERNANDEZ, G.B.; BULHOES, E.M.R.; AZEVEDO, I.F. Avaliação da vulnerabilidade física da orla costeira em nível local, tomando como exemplo o arco praial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 45-58, 2011.

MUTMAINAH, H. Coastal Vulnerability at West Pasaman Regency. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1105, p. 1-9, 2022.

NAGDEE, M.R.M.S.; NURSE, L.; INNIS, L.; CHADWICK, A.; JOHNSON, T. Historical Shoreline Mapping: Application of the Digital Shoreline Analysis System to the Evolution of Worthing Beach, Barbados, Following Hurricanes Allen (1980) and Ivan (2004). **Journal of Coastal Research**, Coconut Creek, v. 36, n. 2, p. 313-318, 2020.

NEVES, M.M.; BELTRÃO, J.A.; NEVES, S.M. Análise da dinâmica costeira em praias do Município de Cabedelo-PB. *In*: ENCONTRO NACIONAL DOS GEÓGRAFOS: CRISE, PRÁXIS E AUTONOMIA: ESPAÇOS DE RESISTÊNCIA E DE ESPERANÇAS, 16., Porto Alegre, 2010. **Anais [...]**. Porto Alegre: [s. n.], 2010. p. 1-12.

NICOLODI, J.L. **A morfodinâmica praial como subsídio ao gerenciamento costeiro: o caso da Praia de Fora – Parque Estadual de Itapuã, RS**. Dissertação (Mestrado em Geociências)– Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

NOAA. **Cold & Warm Episodes by Season**. [S. l.]: NOAA, 2021. Disponível em: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Acesso em: 23 mar. 2021.

NORDSTROM, K.F. **Recuperação de praias e dunas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. [S. l.]: ONU, 2018. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 23 jan. 2023.

PAGÁN, J.I, BAÑÓN, L., LÓPEZ, I., BAÑÓN, C. & ARAGONÉS, L., Monitoring the dune-beach system of Guardamar del Segura (Spain) using UAV, SfM and GIS techniques. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 687, p. 1034-1045, 2019.

PANTUSA, D.; D'ALSSANDRO, F.; RIEFOLO, L.; PRINCIPATO, F.; TOMASICCHIO, G.R. Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. **Water**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. 1-16, 2018.

PILARCZYK, K.W. Design of seawalls and dikes – Including overview of revetments. *In*: PILARCZYK, K.W. (ed.). **Coastal Protection**. Rotterdam: Balkema, 1990.

PINHEIRO, L.S.; XIMENES NETO, A.R.; MEDEIROS, D.H.M.; PESSOA, P.R.S.; MORAIS, J.O. A Plataforma Continental Semiárida do Brasil. *In*: MUEHE, D.; LINS-DE-BARROS, F.M.; PINHEIRO, L.S. (Coordr.) **Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos**. Rio de Janeiro: PGGM, 2020. p. 129-152.

PITMAN, S.J.; HART, D.E.; KATURJI, M.H. Application of UAV techniques to expand beach research possibilities: A case study of coarse clastic beach cusps. **Continental Shelf Research**, *S. l.*, v. 184, p. 44-53, 2019.

PORTELA, J.P.; FREIRE, G.S.S.; MORAES, M.V.A.R.; SILVA, C.A. Evolução da Morfologia Costeira do Litoral Oeste de Icapuí - CE. **Revista Geonorte**, [S. l.], v. 10, n. 1, p.89-93, 2014. Edição Especial 4.

POTT, C.M.; ESTRELA, C.C. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 31, n. 89, p. 271-283, 2017. Disponível no site: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v31n89/0103-4014-ea-31-89-0271.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2019.

PRUDÊNCIO, M.C.; AMARO, V.E.; SCUDELARI, A.C. Análise da Evolução costeira entre os Anos de 1984 e 2014 de Trecho do Litoral Oriental do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 4, p. 189–205, 2019.

PUIG, M.; DEL RÍO, L.; PLOMARITIS, T.A.; BENAVENTE, J. **Influence of storms on coastal retreat in SW Spain**. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 70, p. 193-198, 2014. Special Issue. Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), eds.: Green, A.N. and Cooper, J.A.G.

QI, F.; WU, X.; WANG, Z.; WANG, C.; DUAN, H.; LIU, M.; XU, J. Transport and deposition processes of the sediment depocenter off the Shandong Peninsula: An observational study. **Continental Shelf Research**, [S. l.], v. 244, 2022.

QUEIROZ, H.A.A.; GONÇALVES, R.M.; MISHRA, M. Characterizing global satellite-based indicators for coastal vulnerability to erosion management as exemplified by a regional level analysis from Northeast Brazil. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 817, 2022.

RANDAZZO, G.; CIGALA, C.; CRUPI, A.; LANZA, S. The natural causes of shoreline evolution of Capo Peloro, the northernmost point of Sicily (Italy). **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 70, p. 199-204, 2014. Special Issue. Proceedings 13th International Coastal Symposium (Durban, South Africa), eds.: Green, A.N. and Cooper, J.A.G.

ROSSETTI, D.F. Ambientes Costeiros. In: FLORENZANO, T.G. (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

SAMSUDDIN, M.; SUCHINDAN, G.K. Beach Erosion and Accretion in Relation to Seasonal Longshore Current Variation in the Northern Kerala Coast, India. **Journal of Coastal Research**, Charlottesville, v. 3, n. 1, p. 55–62, 1987.

SANHORY, A.; EL-TAHAN, M.; MOGHAZY, H.M.; REDA, W. Natural and manmade impact on Rosetta eastern shoreline using satellite Image processing technique. **Alexandria Engineering Journal**, [S. l.], v. 61, n. 8, p. 6247–6260, 2022.

SANTOS, M.F. **Geotecnologias para a gestão pública: uma aplicação em Icapuí/CE**. 2014. Tese (Doutorado em Geografia)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SANTOS, M.S.T.; AMARO, V.E.; FERREIRA, A.T.S.; BARBOZA, A.A.; FIGUEIREDO, M.C.; ARAÚJO, A.G. Metodologia para mapeamento de vulnerabilidade costeira à Elevação do Nível Médio do Mar (NMM) em Escala Local. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 691–705, 2015.

SAVI, D.C. Erosão e acresção costeira dos Anjos, Arraial do Cabo, RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, [S. l.], v. 25, supl. 1, p. 91-99, 2007.

SEMACE. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – Zona Costeira**. Fortaleza: SEMACE, 2006.

SEMACE. **Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – zona costeira e unidades de conservação costeiras: Relatório Final de Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo**. Fortaleza: SEMACE, 2016.

SHEPARD, F.P. Nomenclature Based on Sand-Silt-Clay Ratios. **Journal of Sedimentary Petrology**, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 151-158, 1954.

SHETTY, A.; JAYAPPA, K.S.; MITRA, D. Shoreline Change Analysis of Mangalore Coast and Morphometric Analysis of Netravathi-Gurupur and Mulky-Pavanje Spits. **Aquatic Procedia**, [S. l.], v. 4, p. 182–189, 2015.

SILVA, D.S. **Indicadores das Oscilações da Linha de Costa nas Praias de Aracaju entre os Anos 2013-2018 e sua Relação com as Derivações Antropogênicas**. 2019. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)–Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

SILVA, R.R. **Evolução e Vulnerabilidade das Falésias na Costa Leste do Ceará-Nordeste do Brasil**. 2021. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas e Tropicais)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

SILVA, A.L.B.; OLIVEIRA, A.R.; MEREILES, A.J.A. Comunidade dividida e o mar avançando: conflito socioambiental em obra de intervenção costeira na Praia de Peroba – Icapuí/Ceará/Brasil. *In*: MARINHO, A.S.; SILVA, J.F.S.; SILVA, M.H.L.; RAMOS, F.S.N.; MACHADO, A.M.B.; SOUSA, A.C.R.C. (Coord.). **Análise de fragilidades e vulnerabilidades socioambientais**. São Paulo: EDUFMA, 2022. p. 143-151.

SILVA, B.M.F.; SANTOS JÚNIOR, O.F.; FREITAS NETO, O.; SCUDELARI, A.C. Erosão em Falésias Costeiras e Movimento de Massas do Rio Grande do Norte do Brasil. São Paulo. UNESP. **Geociências**, [S. l.], v.39, n. 2, p. 447–461, 2020.

SILVA, R.V.M.; AGUIAR, L.S; MAIA, J.L.A.; LIMA, M.Z.C. Uso de veículos aéreos não tripulados nos estudos da zona costeira no litoral sul do Rio Grande do Norte, Brasil. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 18., 2019, Fortaleza. **Anais [...]**. Fortaleza: UFC, 2019.

SILVA NETO, C.A.; DUARTE, C.R.; SOUTO, M.V.S.; FREIRES, E.V.; SOUSA, W.R.N.; SILVA, M.T. Caracterização dos setores erosivos e deposicionais da linha de costa de Icapuí (CE) com base em produtos de sensoriamento remoto e técnicas de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 143-155, 2020.

SIMÕES, R.S.; OLIVEIRA, U.R. Monitoramento mensal da linha de costa no Balneário Mostardense – RS entre 2016/2017 utilizando dados de VANT. **Quaternary and Environmental Geosciences**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 1-18, 2020.

SMITH, M.W.; CARRIVICK, J.L.; QUICEY, D.J. Structure from motion photogrammetry in physical geography. **Progress in Physical Geography**, [S. l.], v. 40, n. 2, p. 247-275, 2015.

SOUSA, C.C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Pontiguar (NE do Brasil)**. 2002. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica)–Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

SOUZA, W.F.; LEITE, N.S.; MEIRELES, A.J.A.; SILVA, E.V. O uso de SIG na análise da evolução de linha de costa controlada por promontório: trecho entre as praias de Ponta Grossa e Retiro grande, Icapuí-Ceará. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**, Sobral, v. 18, n. 2, p. 20-35, 2016. Edição especial. Trabalho apresentado no V Congresso Brasileiro de Educação Ambiental Aplicada à Gestão Territorial.

SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K. The Coastal Erosion Risk Zoning and the São Paulo State Plan for Coastal Management. **Journal of Coastal Research**, [S. l.], n. 35, p. 530-547, 2003. Proceedings of the Brazilian Symposium on Sandy Beaches: Morphodynamics, Ecology, Uses, Hazards and Management, Itajaí, SC – Brazil.

SOUZA, C.R.G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A.M.S.; OLIVEIRA, P.E. (ed.). **Quaternário do Brasil**. 1. ed. Ribeirão Preto, SP: ABEQUA, 2005.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2003.

SUGUIO, K. **Geologia do Quaternário e mudanças ambientais**. São Paulo: Oficinas de Textos., 2010.

SPISKE, M.; PILARCZYK, J.E.; MITCHELL, S.; HALLEY, R.B.; OTAI, T. Coastal erosion and sediment reworking caused by hurricane Irma – implication for storm impact on low-lyigh tropical. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 47, n. 4, p. 891-907, 2022.

STUMPF, R.P. Sediment transport in Chasapeake Bay during floods: analysis using satellite and surface observation. **Journal of Coastal Research**, Charlottesville, v. 4, n. 1, p. 1–15, 1988.

TAAOUATI, M.; EL MRINI, A.; NACHITE, D. Beach Morphology and Sediment Budget Variability Based on High Quality Digital Elevation Models Derived from Field Data Sets. **International Journal of Geosciences**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 111-119, 2011.

TEIXEIRA, C.P.B.; SOUTO, M.V.S.; PINHEIRO, L.R.S.G.; MATOS, M.F.A.; GOMES, D.D.M. Análise da Evolução Costeira no Município de Beberibe, Estado do Ceará, entre os Anos de 1979 a 2019. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 4, p. 1005–1031, 2021.

THIELER, E.R.; HAMMAR-KLOSE, E.S. **National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Pacific Coast**. Massachusetts: USGS, 2000.

THINH, N.A.; HENS, L. A Digital Shoreline Analysis System (DSAS) applied on mangrove shoreline changes along the Giao Thuy Coastal area (Nam Dinh, Vietnam) during 2005-2014. **Vietnam Journal of Earth Sciences**, [S. l.], v. 39, n. 1, p. 87–96, 2017.

VASSEUR, B.; HEQUETTE, A. Storm surges and erosion of coastal dunes between 1957 and 1988 near Dunkerque (France), southwestern North Sea. *In*: PYE, K.; ALLEN, J. R. L. (ed.). **Coastal and Estuarine Environments: sedimentology, geomorphology and geoarchaeology**. London: The Geological Society of London, 2000. p. 99-107. Disponível em: <http://sp.lyellcollection.org/>. Acesso em: 27 jun. 2019.

WENTWORTH, C.H. A scale of grade and depositional processes. **Journal of Geology**, [S. l.], n. 30, p. 377-392, 1922.

WHEATON, J.M., BRASINGTON, J., DARBY, S.E.; SEAR, D.A. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 35, n. 2, p.136-156, 2010.

XIMENES, D.R.B.; SOUTO, M.V.S.; DUARTE, C.R. Análise multitemporal da linha de costa para avaliação da evolução costeira na região de Icapuí/CE, Nordeste brasileiro, no período de 1984 a 2011. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: INPE, 2013.

ZHANG, X.; PAN, D.; CHEN, J.; ZHAO, J.; ZHU, Q.; HUANG, H. Evaluation of Coastline Changes under Human Intervention Using Multi-Temporal High-Resolution Images: A Case Study of the Zhoushan Islands, China. **Remote Sensing**, S. l., v. 6, n. 10, p. 9930-9950, 2014.