



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

DÉBORA NOGUEIRA LOPES

ANÁLISE DA DINÂMICA COSTEIRA E VULNERABILIDADE DO
MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE - CE

FORTALEZA

2021

DÉBORA NOGUEIRA LOPES

ANÁLISE DA DINÂMICA COSTEIRA E VULNERABILIDADE DO
MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE - CE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, para obtenção de título de doutora. Área de concentração: Geologia.

Orientador: Prof^a. Dra. Cynthia Romariz Duarte.

Coorientador: Prof. Dr. Alfredo Marcelo Grigio.

FORTALEZA

2021

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

- L851a Lopes, Débora Nogueira.
 Análise da dinâmica costeira e vulnerabilidade do município de São Gonçalo do Amarante - CE / Débora Nogueira Lopes. – 2021.
 81 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2021.
 Orientação: Profa. Dra. Cynthia Romariz Duarte.
 Coorientação: Profa. Dra. Alfredo Marcelo Grigio.
1. vulnerabilidade. 2. DSAS. 3. evolução costeira. I. Título.

CDD 551

DÉBORA NOGUEIRA LOPES

ANÁLISE DA DINÂMICA COSTEIRA E VULNERABILIDADE DO
MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE - CE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, para obtenção de título de doutora. Área de concentração: Geologia.

Aprovada em: 22 / 12 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Cynthia Romariz Duarte (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Eduardo Viana Freires
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Prof. Dr. Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Prof. Dra. Mary Lucia Silva Nogueira
Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)

A Deus.

E aos meus pais e familiares.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. A Universidade Federal do Ceará e ao departamento de Geologia por todo o apoio e estrutura disponibilizada, aos professores que tornaram possível a minha formação profissional, pelo apoio e incentivo, em especial a professora Dra. Cynthia Romariz Duarte por todos os ensinamentos transmitidos e paciência.

Ao Laboratório de Geoprocessamento de Ceará (GeoCE) e aos colegas do doutorado por todo o apoio e amizade ao longo dessa jornada. E aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dra. Mary Lucia Silva Nogueira, ao Dr. Eduardo Viana Freires, Prof. Dr. Emanuel Lindemberg Silva Albuquerque e ao Prof. Dr. Daniel Dantas Moreira Gomes pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

RESUMO

A zona litorânea corresponde a uma área cujos potenciais vêm convergindo em um regime de ocupação, em ritmo cada vez mais acelerado, associados ao desenvolvimento, à industrialização, urbanização e a exploração turística. As mudanças morfológicas costeiras consistem em um conjunto de transformações desencadeadas por processos naturais e antrópicos, que atuam em várias escalas temporais e espaciais. É nesse contexto ambiental em que está inserida a área de estudo, o município de São Gonçalo do Amarante, litoral do Estado do Ceará, na qual ocorreram os estudos integrados sobre a paisagem, buscando reconhecer a estrutura, a dinâmica e a sua evolução, colaborando no entendimento das relações entre homem e o meio. Através da vulnerabilidade natural e ambiental do município, por meio da integração das características físicas e antrópicas, foi possível determinar que na porção litorânea do município a predisposição do ambiente frente a fatores naturais e antrópicos e a susceptibilidade do ambiente a pressões antrópicas foi classificada alta e muito alta. Posteriormente, analisou o comportamento da linha de costa nos últimos 36 anos (1984-2020), por meio da análise multitemporal de imagens de satélite da série Landsat com auxílio da extensão DSAS do *software* ArcGis por meio do método *Linear Regression Rate*. Nesta análise, foi possível determinar que o município de São Gonçalo do Amarante, tem sofrido alterações na dinâmica local costeira e afetado a capacidade natural dos sistemas em responder efetivamente a eventos climáticos extremos, tornando assim essas regiões mais vulneráveis. E por fim, baseado nos resultados obtidos anteriormente definiu-se analisar o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), a fim de avaliar o potencial de risco de eventos naturais ao longo da costa, e identificar e medir os elementos e quais fatores ampliam ou atenuam os efeitos de um evento natural, tecnológico ou humano extremo. Sendo assim, essa tese buscou analisar o meio ambiente na sua forma mais ampla, isto é, focar a análise nos componentes ambientais naturais e antrópicos com vista a produzir informações e/ou indicadores que poderão ajudar às autoridades competentes e aos demais interessados a desenvolverem leis, planos, projetos e programas que buscam a melhoria da qualidade ambiental da localidade.

Palavras-chave: vulnerabilidade; DSAS; evolução costeira.

ABSTRACT

The coastal zone corresponds to a common learned area converging in an occupation regime, at an increasingly accelerated pace, associated with development, industrialization, urbanization and tourist exploitation. Coastal morphological changes consist of a set of transformations triggered by natural and anthropic processes, which act at various temporal and spatial scales. It is in this environmental context that an area of study is inserted, in the municipality of São Gonçalo do Amarante, coast of the State of Ceará, in which integrated studies on the landscape took place, recognizing the structure, dynamics and its evolution, collaborating in the understanding of the relationship between man and the environment. Through the natural and environmental vulnerability of the municipality, through the integration of physical and anthropogenic characteristics, it was possible to determine that in the coastal portion of the municipality the predisposition of the environment to natural and anthropogenic factors and the susceptibility of the environment to anthropogenic pressures was very high. Subsequently, analysis of the behavior of the coastline in the last 36 years (1984-2020), through the analysis of multitemporal satellite images from the Landsat series with the aid of the DSAS extension of the ArcGis software using the linear regression rate method. In this analysis, it was possible to determine that the municipality of São Gonçalo do Amarante has undergone changes in local coastal dynamics and affected the natural capacity of systems to respond to extreme weather events, thus making these regions more vulnerable. Finally, based on the results obtained previously, the analysis of the Coastal Vulnerability Index (IVC) was defined, in order to assess the potential risk of natural events along the coast, and to identify and assess the elements and which factors increase or mitigate the effects of an extreme natural, technological or human event. Therefore, this thesis sought to analyze the environment in its broadest form, that is, to focus on analyzing natural and anthropogenic environmental components with a view to producing information and/or indicators that can help competent authorities and others to develop laws, plans, projects and programs that seek to improve the environmental quality of the location.

Keywords: vulnerability; DSAS; coastal evolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura da tese.....	17
Figura 2 – Fluxograma da metodologia	20
Figura 3 – Localização da área de estudo	26
Figura 4 – Mapa de vulnerabilidade natural.....	30
Figura 5 – Mapa de vulnerabilidade ambiental.....	32
Figura 6 – Impactos ocasionado na praia da Taíba pela ação das ondas.....	34
Figura 7 – Mapa de localização do município de São Gonçalo do Amarante, CE.....	41
Figura 8 – Composição NIR-G-NDWI em RGB.....	44
Figura 9 – Processos deposicionais da área de estudo com base na integração dos dados através dos transectos gerados.....	45
Figura 10 – Variação da linha de costa do município de São Gonçalo do Amarante (1984-2020).....	46
Figura 11 – Taxa de variação da linha de costa pelo método da <i>Linear Regression Rate</i> (LRR).....	47
Figura 12 – Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 1984 a 1990.....	48
Figura 13 – Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 1990 a 2000.....	49
Figura 14 – Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 2000 a 2009.....	49
Figura 15 – Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 2009 a 2020.....	50
Figura 16 – Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 1984 a 2020.....	51
Figura 17 – Mapa de localização do município de São Gonçalo do Amarante, CE.....	60
Figura 18 – Classes de Índice de Vulnerabilidade Costeira.....	68
Figura 19 – Índice de Vulnerabilidade Costeira do município de São Gonçalo do Amarante.....	69

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Imagens utilizadas para delimitação da linha de costa.....	19
Quadro 2 – Valor de vulnerabilidade dos atributos físicos e antrópicos.....	28
Quadro 3 – Classes identificadas de uso e cobertura da terra no município de São Gonçalo do Amarante, CE.....	28
Quadro 4 – Classes de vulnerabilidade natural e suas respectivas áreas.....	29
Quadro 5 – Classes de vulnerabilidade ambiental e suas respectivas áreas.....	31
Quadro 6 – Lista de imagens utilizadas para delimitação da linha de costa.....	43
Quadro 7 – Comportamento morfológicos das linhas de costa.....	44
Quadro 8 – União de anos consecutivos (exemplo para os anos de 1984-1990).....	45
Quadro 9 – Ranking da Vulnerabilidade Costeira.....	62
Quadro 10 – Imagens utilizadas para delimitação da linha de costa.....	65
Quadro 11 – Classes do Índice de Vulnerabilidade Costeira.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CIPP	Complexo Industrial e Portuário do Pecém
CIRM	Comissão Interministerial para Recursos do Mar
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEM	Digital Elevation Model
DSAS	Digital Shoreline Analysis System
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EUA	Estados Unidos da America
GeoCE	Laboratório de Geoprocessamento do Ceará
Hs	Altura Significativa de Onda
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisa Espacial
IPECE	Instituto de Pesquisa Estratégica Econômica do Ceará
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IVC	Índice de Vulnerabilidade Costeira
LRR	Linear Regression Rate
LSN	Litoral Setentrional do Nordeste
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Near Infrared
NMM	Nível Médio do Mar
ONU	Organização das Nações Unidas
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PDI	Processamento Digital de Imagens
PNBOIA	Programa Nacional de Boias
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLR	Sea Level Rise
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TEP	Terminal Portuário Provisório
UFPE	Universidade Federal do Pernambuco
USGS	United State Geological Survey

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES	15
1.1	Introdução	15
1.2	Objetivos	16
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivos gerais</i>	<i>16</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>16</i>
1.3	Estrutura do trabalho	17
1.4	Materiais e Métodos	17
<i>1.4.1</i>	<i>Materiais</i>	<i>18</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Métodos</i>	<i>19</i>
2	CAPÍTULO II - ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL E AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE, LITORAL DO ESTADO DO CEARÁ	22
2.1	Introdução	24
2.2	Área de estudo	25
2.3	Materiais e métodos	27
2.4	Resultados e discussões	29
<i>2.4.1</i>	<i>Vulnerabilidade Natural</i>	<i>29</i>
<i>2.4.2</i>	<i>Vulnerabilidade Ambiental</i>	<i>31</i>
2.5	Conclusões	33
3	CAPÍTULO III - EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA NO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE-CE NO PERÍODO DE 1984 A 2020.	37
3.1	Introdução	39
3.2	Área de estudo	40
3.3	Metodologia	41
3.4	Resultados e discussões	44
3.5	Conclusões	49
4	CAPÍTULO IV - ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA DO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE (CEARÁ) FRENTE A ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR	54
4.1	Introdução	56
4.2	Área de estudo	57

4.3	Metodologia	59
4.3.1	<i>Geomorfologia</i>	61
4.3.2	<i>Declive costeiro</i>	62
4.3.3	<i>Nível Médio do Mar</i>	62
4.3.4	<i>Taxa de variações da linha de costa</i>	63
4.3.5	<i>Amplitude média das marés</i>	64
4.3.6	<i>Altura significativa de onda</i>	65
4.4	Resultados e discussões	65
4.5	Conclusões	69
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	74
	REFERÊNCIAS	76

1 CAPÍTULO I – CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

1.1 Introdução

Em países como o Brasil, onde a faixa litorânea é muito longa, o mapeamento dos recursos naturais costeiros por técnicas convencionais é uma tarefa difícil, principalmente devido à sua grande extensão. O emprego de imagens de satélites de sensoriamento remoto é uma das ferramentas mais eficazes que podem ser utilizados para o mapeamento desses recursos naturais de uma maneira rápida e precisa (BOORI & AMARO, 2010).

A zona litorânea corresponde a uma área cujos potenciais vêm convergindo em um regime de ocupação, em ritmo cada vez mais acelerado, associados ao desenvolvimento, à industrialização, urbanização e a exploração turística.

As mudanças morfológicas costeiras consistem em um conjunto de transformações desencadeadas por processos naturais e antrópicos, que atuam em várias escalas temporais e espaciais, e se apresentam, por exemplo, como crescimento ou diminuição de áreas de manguezais, desenvolvimento de cordões e bancos arenosos, recuos de falésias, migração de desembocaduras de canais de maré, entre outros.

Essas mudanças são controladas pela ação interativa dos processos de maré, ondas e ventos, que causam erosão, transporte e sedimentação, de acordo com a configuração e orientação da costa, com os tipos de materiais que constituem os substratos costeiros, com a vegetação e com a presença de desembocaduras, bem como uso e ocupação dos solos, refletindo uma resposta integrada do comportamento da costa aos processos e agentes dinâmicos (SOUZA-FILHO, 2000a, 2000b; SOUZA-FILHO & PARADELLA, 2002).

Neste sentido, o planejamento territorial é uma ferramenta que possibilita avaliar a situação atual e analisar as formas de um modelo futuro, organizando ações e antecipando os resultados esperados. É um processo dinâmico, havendo uma contínua inserção de situações, propostas e soluções, num sistema contínuo de tomada de decisões.

É nesse contexto ambiental em que está inserido a área de estudo, o município de São Gonçalo do Amarante no litoral do Estado do Ceará, na qual ocorreram os estudos integrados sobre a paisagem, buscando reconhecer a estrutura, a dinâmica e a evolução da paisagem, colaborando no entendimento das relações entre homem e o meio, tendo em vista, principalmente, a ação de planejamento, buscando analisar o meio ambiente na sua forma mais ampla, isto é, focar a análise nos componentes ambientais naturais e nos ambientais humanos (antrópicos) com vista a produzir informações e/ou indicadores que poderão ajudar às autoridades competentes e aos demais interessados a desenvolverem leis, planos, projetos e

programas que buscam a melhoria da qualidade ambiental da localidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos Gerais

Diante do exposto, esse estudo tem por objetivo analisar e produzir informações das potencialidades de uso, limitações, vulnerabilidades naturais e vulnerabilidades ambientais. Bem como, analisar a evolução espaço-temporal (1984-2020) da linha de costa do município. E por fim, determinar partes da região costeira em risco com base no Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) frente a elevação do nível do mar.

1.2.2 Objetivos Específicos

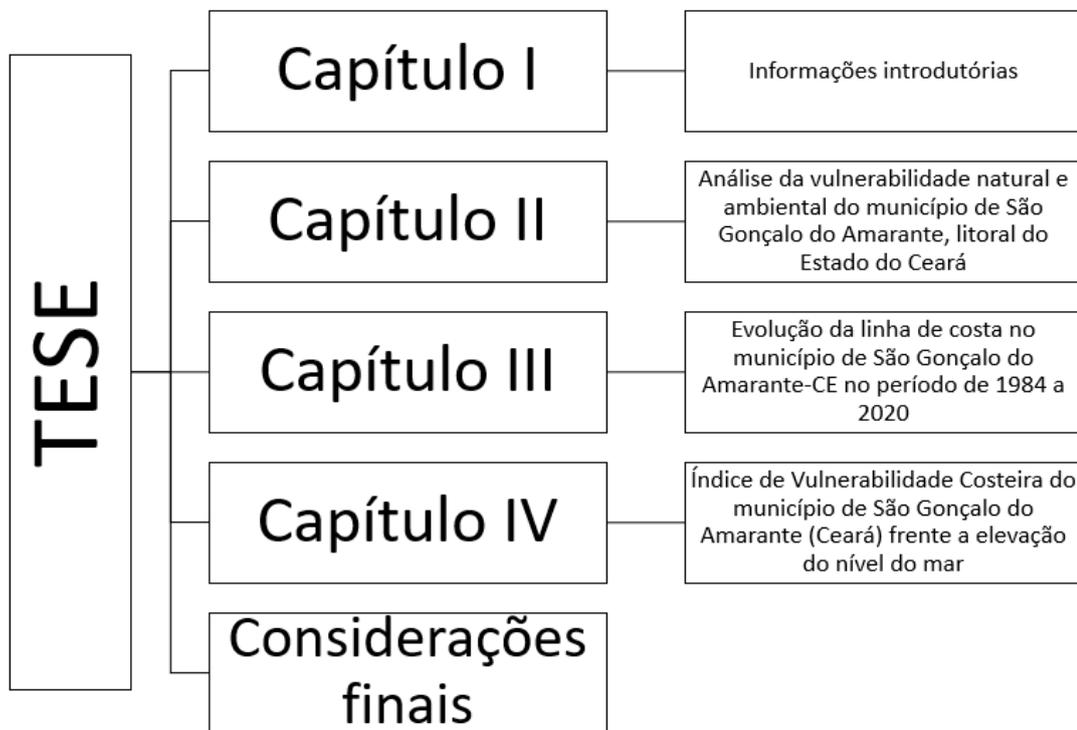
- Realizar uma caracterização da vulnerabilidade natural e ambiental do município de São Gonçalo do Amarante, na escala de 1:100.000 características naturais (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) e antrópicas (uso e cobertura da terra) do município litorâneo de São Gonçalo do Amarante no Estado do Ceará, por meio de técnicas de geoprocessamento em um ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), baseada na abordagem da ecodinâmica dos ambientes.
- Identificar os diversos graus de fragilidade das áreas mapeadas para uso como instrumento de gestão costeira.
- Através da análise multitemporal (intervalo de 36 anos) de imagens de satélite quantificar e qualificar as alterações costeiras do município de São Gonçalo do Amarante, identificando ao longo da costa as regiões que sofrem erosão, acresção e o papel relevante que as ações antrópicas tem nessa dinâmica.
- Evidenciar as áreas que apresentam maior Índice de Vulnerabilidade Costeira frente a elevação do nível do mar, tendo como base características ecológicas e geofísicas, visando um melhoramento no monitoramento costeiro e ambiental, no intuito de suprir lacunas sobretudo com relação ao gerenciamento costeiro.

1.3 Estrutura do trabalho

Esse presente estudo está estruturado por uma introdução, três capítulos em forma de artigos e uma conclusão (Figura 1).

O primeiro capítulo refere-se a informações introdutórias acerca da tese, conforme visto anteriormente. Os capítulos dois, três e quatro foram elaborados na forma de artigos, conforme será visto a seguir; e, por fim, tem-se uma conclusão integrando de forma geral e sucinta, as análises e contribuições dessa tese.

Figura 1 – Estrutura da tese.



O capítulo II refere-se ao artigo intitulado “Análise da vulnerabilidade natural e ambiental do município de São Gonçalo do Amarante, litoral do Estado do Ceará”, publicado na Revista Brasileira de Geografia Física do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), versão online, ISSN: 1984-2295, v. 14, p. 3057-3066, 2021.

O objetivo desse artigo foi o de apresentar estudos integrados sobre a paisagem buscando reconhecer a estrutura e a dinâmica através da análise das características naturais (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) e ambientais (uso e cobertura da terra), colaborando no entendimento das relações entre homem e o meio, tendo em vista produzir

informações e/ou indicadores, potencialidades de uso, além de limitações, vulnerabilidades naturais, vulnerabilidades ambientais e fragilidades naturais por meio de técnicas de geoprocessamento em um ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) do município litorâneo de São Gonçalo do Amarante no Estado do Ceará.

O capítulo III refere-se ao artigo intitulado “Evolução da linha de costa no município de São Gonçalo do Amarante-CE no período de 1984 a 2020” que foi publicado na Revista Brasileira de Geografia Física do Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal do Pernambuco (UFPE), versão online, ISSN: 1984-2295, v. 14, p. 3067-3077, 2021.

O objetivo desse artigo foi análise da variação da linha de costa do município de São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará em um intervalo de 36 anos (1984-2020), através da análise multitemporal em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) de imagens dos satélites da série Landsat, e a partir dos resultados obtidos, entender a dinâmica natural e antrópica dessa localidade a fim de gerar informações essenciais que possam ser utilizadas posteriormente para o planejamento e gestão costeira da região.

E o capítulo IV refere-se ao artigo intitulado “Índice de Vulnerabilidade Costeira do município de São Gonçalo do Amarante (Ceará) frente a elevação do nível do mar” que tem como objetivo determinar o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) frente a elevação do nível do mar para o município costeiro de São Gonçalo do Amarante.

Esse índice possibilitou avaliar o potencial de risco as mudanças físicas ao longo da costa, e identificar e medir os elementos que ampliam ou atenuam os efeitos de um evento natural, como uma futura elevação do Nível Médio do Mar, sendo possível identificar as áreas mais susceptíveis a desastres naturais e antecipar impactos na porção litorânea local.

1.4 Materiais e Métodos

Nessa seção são apresentados os recursos e os procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento da pesquisa.

1.4.1 Materiais

Os recursos que subsidiaram os procedimentos metodológicos aplicados ao longo da pesquisa estão listados abaixo:

- Imagens do satélite Landsat 5/TM datadas de 19/09/1984, 19/08/1990, 02/11/2009 e a imagem Landsat 8/OLI datada de 02/11/2020, com resolução espacial de 30 metros, obtida no *site* do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2018) para observação da variação da linha de costa.

- *Softwares*: ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019) e Spring® 5.5.6 (INPE, 2020).

- Arquivos Vetoriais: rodovias, drenagem, limites municipais, sedes municipais, geologia, geomorfologia, solos, vegetação etc., obtidos em sites oficiais da CPRM, IBGE, EMBRAPA e IPECE.

- Câmera fotográfica;

- Imagens utilizadas para delimitação da linha de costa para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira:

Quadro 1 – Imagens utilizadas para delimitação da linha de costa

Data	Satélite/Sensor	Resolução espacial
15/06/1984	Landsat 5/TM	30 m
15/06/1985	Landsat 5/TM	30 m
19/06/1991	Landsat 5/TM	30 m
30/10/1993	Landsat 5/TM	30 m
14/08/2000	Landsat 5/OLI	30 m
01/08/2001	Landsat 5/OLI	30 m
27/07/2005	Landsat 5/OLI	30 m
05/10/2007	Landsat 5/OLI	30 m
18/06/2014	Landsat 8/OLI	30 m
26/08/2016	Landsat 8/OLI	30 m
13/08/2017	Landsat 8/OLI	30 m
13/06/2018	Landsat 8/OLI	30 m
22/10/2019	Landsat 8/OLI	30 m
06/09/2020	Landsat 8/OLI	30 m

- Dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e DEM (*Digital Elevation Model*)

- Relatório IPCC (*Intergovernmental Painel on Climate Change*) AR6 WGI “Mudanças Climáticas 2021: a Base das Ciências Físicas” (IPCC, 2021),

- Dados disponíveis do marégrafo da área de estudo que está localizado na estação 30337 (Marinha Brasileira) no Porto do Pecém de 1988 a 1998 (DHN, 2021).

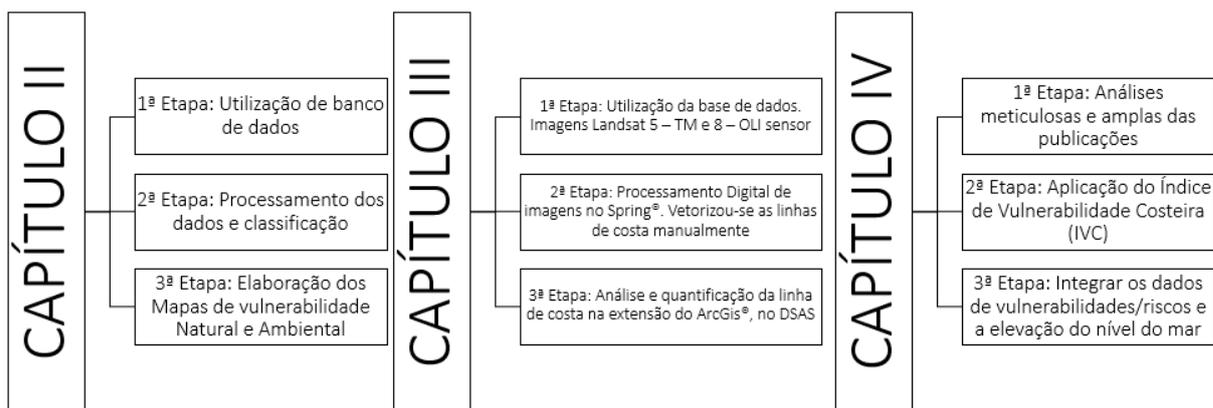
- Os dados de altura significativa de onda do período de dezembro de 2016 a novembro de 2017 através do levantamento de dados observados da boia do PNBOIA (Programa Nacional de Boias), da boia localizada em Fortaleza (Ceará).

1.4.2 Métodos

A metodologia da pesquisa está sintetizada no fluxograma da Figura 2.

Como pode ser observado, de acordo com a estrutura do trabalho, no segundo capítulo dessa pesquisa os métodos estão compartimentados em três etapas, na primeira etapa houve a obtenção de dados que subsidiaram a elaboração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental. Inicialmente, foram confeccionados mapas temáticos com base na interpretação de banco de dados de instituições nacionais (IBGE, EMBRAPA e CPRM), visitas a campo e consultas a bibliografias disponíveis. Inicialmente foram caracterizados os atributos físicos (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) e antrópicos (uso e cobertura da terra) da paisagem em escala de 1:100.000 para o ano de 2019.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia.



Na segunda etapa os dados mencionados foram submetidos a processamentos no ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019) e análises visando espacializar variáveis de interesse e classifica-los com base no grau de vulnerabilidade, com base em valores de estabilidade quanto à morfogênese e à pedogênese (TRICART, 1977) e no grau de diversidade (GRIGIO, 2003; 2004 e 2009). Posteriormente na terceira etapa, essas informações foram cruzadas com o auxílio do *software*, gerando o mapa de vulnerabilidade natural e vulnerabilidade Ambiental.

Após observar que as áreas de maior vulnerabilidade Natural e Ambiental estavam localizadas na porção litorânea do município de São Gonçalo do Amarante definiu-se analisar a evolução e o comportamento da linha de costa do município, no Capítulo III.

A metodologia desse capítulo também foi dividida em três etapas, onde a primeira etapa corresponde a análise multitemporal da linha de costa selecionou-se cinco imagens de

satélite da série Landsat disponibilizadas pelo *United State Geological Survey* (USGS, 1984; USGS, 1990; USGS, 2000; USGS, 2009 e USGS, 2020). Na segunda etapa, com o intuito de realçar as feições superficiais foi feito o Processamento Digital das Imagens (PDI) no *software* Spring® 5.5.6 (INPE, 2020). Após o PDI vetorizou-se as linhas de costa manualmente baseadas na demarcação entre as áreas úmidas e secas (DOLAN *et al.*, 1980) dos anos mencionados. E ainda, gerou-se a linha de base tendo como referência a linha de costa atual (linha de base *offshore*). Posteriormente, utilizou-se para análise e quantificação da linha de costa a extensão do ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019), o *Digital Shoreline Analysis System* 5.0 (DSAS) (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018) para vetorizar as linhas de costa que gerou transectos perpendiculares as linhas de costas com espaçamento de 10 metros entre si. O método estatístico puramente computacional selecionado no DSAS para calcular variação da linha de costa foi o *Linear Regression Rate* (LRR) para que fosse possível quantificar o balanço sedimentar em área (m²) para cada ano.

E por fim, para identificar nessa linha de costa o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) frente a elevação do nível do mar, elaborou-se o Capítulo IV, na qual a metodologia está fracionada em três etapas. Na primeira etapa, foram realizadas análises meticulosas e amplas das publicações, a fim de desenvolver um banco de dados para uma avaliação em escala regional da vulnerabilidade costeira. Na segunda etapa ocorreu a aplicação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) que analisa seis variáveis que foram relacionadas de forma quantificável à vulnerabilidade relativa da costa às mudanças físicas devido à elevação do nível do mar (Gornitz, 1990; Gornitz *et al.*, 1994; Thieler e Hammer-Klose, 2000). E por fim, a terceira etapa ocorreu com o intuito de integrar os dados de vulnerabilidades/riscos e a elevação do nível do mar, a fim de compreender evolução da paisagem, tendo em vista, principalmente, a ação de planejamento e zoneamento buscando analisar o meio ambiente em sua forma mais ampla.

2 CAPÍTULO II - ANÁLISE DA VULNERABILIDADE NATURAL E AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE, LITORAL DO ESTADO DO CEARÁ

Resumo

O equilíbrio dos ecossistemas costeiros tem sido constantemente discutido por pesquisadores devido à pressão de atividades antrópicas e processos naturais sobre essas localidades. Nesse contexto, o município de São Gonçalo do Amarante, acompanhando a tendência dos últimos anos do estado do Ceará, tem passado por mudanças econômicas baseadas na valorização das porções litorâneas, ocasionando grandes consequências para região. Portanto, esse trabalho tem por objetivo analisar as características naturais e antrópicas do município, por meio de técnicas de geoprocessamento em um Sistema de Informação Geográfica que traduzem expressões da paisagem, por meio de sua vulnerabilidade natural e ambiental. Foram elaborados mapa de vulnerabilidade natural, visando mostrar a predisposição do ambiente frente a fatores ambientais naturais, e mapa de vulnerabilidade ambiental, que retrata a susceptibilidade do ambiente a pressões antrópicas. A elaboração de uma avaliação de vulnerabilidade natural e ambiental a partir de índices que correspondem à integração de características naturais e físicas, retrata que o município de apresenta muitas das suas características naturais conservadas, o que está diretamente relacionada a uma predominância de vulnerabilidade natural baixa (61,9%) e vulnerabilidade ambiental muito baixa (45,2%) que abrange uma grande porção do município, mas a porção litorânea apresenta dados alarmantes de vulnerabilidade natural e ambiental muito alta e alta. Assim, tem-se a necessidade do acompanhamento apropriado e de um planejamento territorial racional, afim de prever e mitigar os impactos sociais e ambientais, que a cada ano podem-se agrava ainda mais.

Palavras-chave: Litoral, antropização, vulnerabilidade, susceptibilidade.

Analysis of the natural and environmental vulnerability of the Municipality of São Gonçalo do Amarante, coast of the State of Ceará

Abstract

The balance of coastal ecosystems has been constantly discussed by researchers due to the pressure of anthropogenic activities and natural processes on these locations. In this context, the municipality of São Gonçalo do Amarante, following the trend of the last years of the state of Ceará, has undergone economic changes based on the valuation of coastal portions, causing great consequences for the region. Therefore, this work aims to analyze the natural and anthropic characteristics of the municipality, through geoprocessing techniques in a Geographic Information System that translate expressions of the landscape, through its natural and environmental vulnerability. A natural vulnerability map was created, aiming to show the predisposition of the environment to natural environmental factors, and an environmental vulnerability map, which depicts the susceptibility of the environment to anthropic pressures. The elaboration of a natural and environmental vulnerability assessment based on indexes that correspond to the integration of natural and physical characteristics, shows that the municipality has many of its conserved natural characteristics, which is directly related to a predominance of low natural vulnerability (61.9%) and very low environmental vulnerability (45.2%) that covers a large portion of the municipality, but the coastal portion presents alarming data on very high and high natural and environmental vulnerability. Thus, there is a need for appropriate monitoring and rational territorial planning, in order to predict and mitigate social and environmental impacts, which each year can be further aggravated.

Keyword: Coastline, anthropization, vulnerability, susceptibility.

2.1 Introdução

Fatores históricos associados à ocupação do território brasileiro e acompanhando a tendência mundial da população em ocupar predominantemente áreas próximas ao litoral, o Brasil apresenta 26,6% da população em municípios da zona costeira, o que corresponde a 50,7 milhões de habitantes. Na qual, uma parcela dessa população está ocupada em atividades, direta ou indiretamente, ligadas ao turismo, exploração de recursos e circulação de bens e pessoas o que torna um ambiente de riqueza tanto ecológica quanto econômica (IBGE, 2011). Especificamente no Estado do Ceará, a faixa costeira compreende 573 km de extensão abrangendo 38 municípios com uma área total de 20.120 km² (CEARÁ, 2019).

O equilíbrio dos ecossistemas costeiros tem sido constantemente discutido por pesquisadores devido à pressão de atividades antrópicas e processos naturais sobre essas localidades (TAGLIANI, 2003), em razão de serem ambientes costeiros extremamente dinâmicos, onde, neles confluem processos terrestres, oceânicos e atmosféricos, que modificam frequentemente suas características (ÂNGULO, 2004).

Assim, a sustentabilidade nas zonas costeiras depende de um equilíbrio entre os processos naturais e antrópicos, para tanto, estudos diagnósticos da vulnerabilidade se fazem necessários para entender todo o contexto dinâmico dessas áreas.

Baseado no conceito de vulnerabilidade da ONU (2004) que o considera-o como o conjunto de processos e situações decorrentes de fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, os quais determinam quanto uma população ou elemento em risco estão suscetíveis ao impacto. Sendo assim, mapas de vulnerabilidade são ferramentas através das quais se estuda o nível de danos a que um certo elemento sendo natural ou não (população, indivíduos, atividades de uso e cobertura da terra, além do próprio ambiente) está suscetível.

Nesse contexto, o município de São Gonçalo do Amarante, acompanhando a tendência dos últimos anos do estado do Ceará tem passado por mudanças econômicas baseadas na valorização das porções litorâneas. No início da década de 70 com a construção das residências secundárias, que alimentaram a especulação imobiliária ocasionando o processo inicial de urbanização, e já no final do século XX com a construção do Porto do Pecém e, a entrada de capital estrangeiro para grandes empreendimentos, direcionou a expansão urbana da Região Metropolitana de Fortaleza para Oeste, gerando a supervalorização dos espaços litorâneos ocasionando grandes consequências para a região. Onde, sem o devido acompanhamento de um planejamento ambiental pode acarretar consequências negativas para a região (CAMPOS *et al.*, 2003).

Portanto, esse trabalho tem por objetivo analisar as características naturais (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) e antrópicas (uso e cobertura da terra) do município litorâneo de São Gonçalo do Amarante no Estado do Ceará, por meio de técnicas de geoprocessamento em um ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica) que traduzem expressões da paisagem, por meio de sua vulnerabilidade natural e ambiental. Bem como, produzir informações e conhecimentos sobre a área em questão e disponibilizar uma ferramenta de apoio para subsidiar o planejamento ambiental, os zoneamentos e a gestão de uso e cobertura da terra em regiões costeiras.

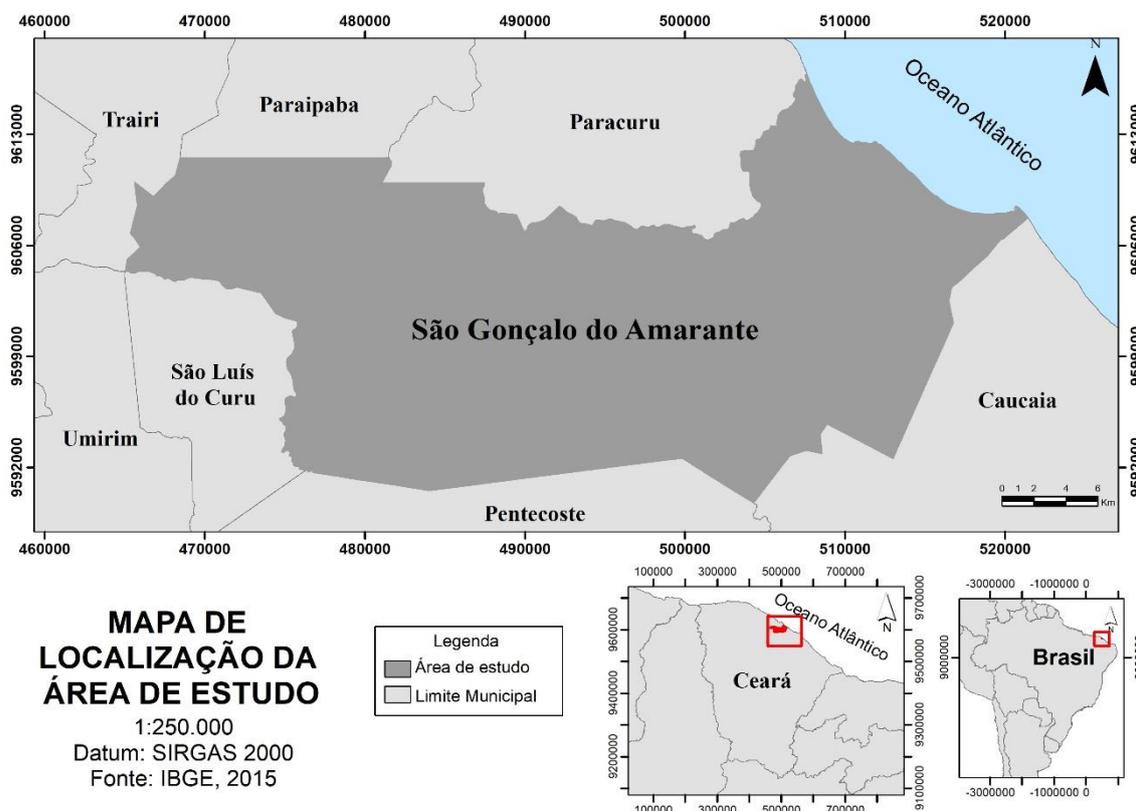
2.2 Área de estudo

O município de São Gonçalo do Amarante é constituído de 7 distritos: Pecém, Taíba, Siupé, Umarituba, Croatá, Serrote e Cágado e a sede do município que está localizado nas coordenadas geográficas: Latitude 3°36'21'' Sul e Longitude 38°58'08'' Oeste. Está inserida na mesorregião Metropolitana de Fortaleza e na microrregião de Fortaleza, situando-se na porção norte do estado do Ceará, limitando-se com os municípios (Figura 3) de Trairi, Paraipaba, Caucaia, Paracuru, São Luís do Curu e Pentecoste e banhado pelo oceano Atlântico (IPECE, 2014).

A área de estudo compreende uma região irregular de 823,3 km² com relevos representados por formas suaves e pouco dissecadas da Depressão Sertaneja, resultado da superfície de aplainamento em atuação no Cenozóico e a planície fluvial do Rio Curu com altitudes inferiores a 200 m. Já na faixa costeiras, há pequenas formações de areias – Dunas (IBGE, 2019).

Estão presentes na localidade os solos desenvolvidos do Formação Barreiras de rochas cristalinas ou sob influência destas, como os argissolos vermelho-amarelos e em maior predominância na região tem-se os argissolos amarelos com muito baixa a baixa fertilidade natural. Verifica-se também a presença dos planossolo nátrico com pouca expressão espacial na área, além dos neossolo quartzarênico, neossolos flúvicos e neossolos litólicos em menor área (SANTOS *et al.*, 2018). Recobrimo esses solos na porção sul do município tem-se a vegetação de caatinga arbustiva densa (Savanas Estépicas Parque com palmeiras) e a caatinga arbustiva aberta (Savanas Estépicas Arborizada sem palmeiras e sem floresta). Já na região norte do município predomina uma vegetação de faixa litorânea e vegetação de mangue (Formação pioneira com influência marinha arbustiva) também é encontrado (IBGE, 2012).

Figura 3. Localização da área de estudo.



O substrato geológico é composto por rochas do embasamento cristalino do Grupo Ceará com predominância das unidades Independência e Canindé onde há primazia de rochas metamórficas datadas do Pré-Cambriano. A Formação Barreiras repousa sobre o embasamento cristalino que ocorre como tabuleiros pré-litorâneos ou formando frentes de falésias nas zonas mais costeiras, como na praia de Taíba. E os sedimentos arenosos inconsolidados do Quaternário estão relacionados aos ambientes sedimentares de planícies lacustres, dunas, mangues, lagoas, lagunas, praias, arenitos de praias, borda de terraços holocênicos, cordões litorâneos e aluviões (continentais e fluviais) (MAGINI; MARTINS; PITOMBEIRA, 2013).

De acordo com o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2012), o município de São Gonçalo do Amarante apresentava uma população de 43.890 habitantes, tendo um acréscimo populacional de 32,8% desde o censo do ano de 1991, onde a população era de 29.457 habitantes.

Segundo Viana *et al.* (2015), o complexo industrial do Município é basicamente voltado para a extração mineral (2,44%), construção civil (11,38%), utilidade pública (8,13%) e pela indústria de transformação (78,05%), que inclui a transformação de minerais não

metálicos; metalurgia; mecânica; material elétrico e eletrônicos de comunicação; madeira; mobiliário; couros, peles e produtos similares, química; material plástico; têxtil; produtos alimentares e bebidas, entre outros (IPECE, 2014). O município apresenta hoje a sua economia baseada nas exportações feitas pelo Terminal Portuário do Pecém, à Companhia Siderúrgica do Pecém e uma pequena parte pelo turismo. O Terminal Portuário do Pecém e a Cidade de São Gonçalo do Amarante (CE) e seus distritos são servidos pelo parque Eólico da Taíba e a usina de energia do Pecém.

2.3 Materiais e métodos

Foram elaborados mapa de vulnerabilidade natural, visando mostrar a predisposição do ambiente frente a fatores ambientais naturais, e mapa de vulnerabilidade ambiental, que retrata a susceptibilidade do ambiente a pressões antrópicas (GRIGIO, 2003 e GRIGIO *et al.*, 2004). Esses foram confeccionados com base na interpretação de produtos de sensoriamento remoto, de banco de dados de instituições nacionais (IBGE, EMBRAPA e CPRM), visitas a campo e consultas a bibliografias disponíveis. Inicialmente foram caracterizados os atributos físicos (geologia, geomorfologia, solos e vegetação) e antrópicos (uso e cobertura da terra) da paisagem em escala de 1:100.000 para o ano de 2019.

Os atributos de geologia, geomorfologia e associações de solos mapeados na área de estudo foram atribuídos valores com base na estabilidade quanto à morfogênese e à pedogênese (TRICART, 1977), variando em uma escala de 1,0 a 3,0, com intervalo de 0,5, na qual, no valor 1,0 prevalece a pedogênese, no 3,0 prevalece à morfogênese e no 2,0 o equilíbrio entre pedogênese e morfogênese (Quadro 2). E para os atributos de vegetação mapeados, baseou-se na estrutura das redes e teias alimentares, o estágio de fitossucessão e a biodiversidade, atribuindo valor 1,0 para ambientes com baixa diversidade de espécies/formações, 2,0 para ambientes com média diversidade de espécies e 3,0 para áreas com alta diversidade de espécies (GRIGIO, 2003; 2004 e 2009) (Quadro 2). Posteriormente essas informações foram cruzadas com o auxílio do software ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019), gerando o mapa de vulnerabilidade natural.

Já, para gerar o mapa de vulnerabilidade ambiental, baseou-se no Mapa de uso e cobertura da terra do Relatório Final de Mapeamento de Uso e Cobertura do Solo elaborado pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente (CEARÁ, 2016) que retrata a situação da cobertura vegetal natural, dos padrões ocupação antrópica e das atividades econômicas desenvolvidas nos Municípios do litoral do Ceará (Quadro 3).

Aplicou-se então, o método de ponderação de fatores, na qual, ocorre uma multiplicação entre os pesos de compensação e, a seguir, uma soma de todos os fatores (GRIGIO, 2003, 2004, 2009).

Quadro 2. Valor de vulnerabilidade dos atributos físicos e antrópicos

Classe	Definição
Área edificada/em edificação	Área com ocupação existente ou com infraestrutura implantada para ocupação.
Sedimento Arenoso	Sedimento existente no trecho com depósito eólico (praia, dunas, planície de deflação e lagoas interdunares) podendo ocorrer também no Tabuleiro Pré-litorâneo e em barras de canais fluviais
Solo Exposto	Áreas degradadas que apresentam solo exposto
Vegetação natural	Compreendendo a vegetação com porte arbóreo e/ou arbustivo, rasteira, ou Vegetação existente nas planícies Fluviomarinhas
Vegetação Antropizada	Todos os portes – herbácea, arbustivo/arbóreo – que sofreram alguma ação antrópica.
Corpo d'água	Rios e lagos naturais

Quadro 3. Classes identificadas de uso e cobertura da terra no município de São Gonçalo do Amarante, CE

Atributos	Valor de Vulnerabilidade
Geologia	
Depósitos Litorâneos Holocênicos	3,0
Depósitos Eólicos Costeiros Holocênicos	3,0
Depósitos de Pântanos e Mangue Holocênicos	2,0
Depósitos Aluvionares Holocênicos	2,5
Unidade Independência	1,5
Unidade Canindé	1,5
Formação Barreiras	2,0
Coberturas Eólicas Pleistocênicas	2,5
Geomorfologia	
Depressão Sertaneja Setentrional	1,0
Planícies e Terraços Fluviais	3,0
Tabuleiros Litorâneos Cearenses	1,5
Litoral Setentrional Nordeste	3,0
Solos	
Argissolo Amarelo Distrófico	1,5
Planossolo Nátrico Sáfico	2,5
Argissolo Amarelo Eutrófico	1,5
Argissolo Vermelho – Amarelo Eutrófico	1,5
Neossolo Quartzarênico Órtico	3,0
Neossolo Flúvico Eutrófico	2,5
Neossolo Litólico Eutrófico	2,0
Planossolo Háptico Eutrófico	2,5

Vegetação	
Formação Pioneira com Influência Marinha Arbustiva	3,0
Savana-Estépica Arborizada com Palmeiras	1,5
Savana-Estépica Arborizada sem Palmeiras e sem Floresta-de-galeria	1,0
Savana-Estépica Parque com Palmeiras	1,5
Agricultura com Culturas Cíclicas	1,5
Agricultura com Culturas Permanentes	1,0
Sem Vegetação	1,0
Uso e cobertura da terra	
Área edificada/em edificação	3,0
Sedimento Arenoso	1,0
Sedimento Fixo	1,0
Solo Exposto	2,5
Vegetação natural	1,0
Vegetação Antropizada	2,0
Corpo d'água	1,0

Assim, as classes de vulnerabilidade nesses mapas variaram de 1 a 3, onde 1 representa áreas de menor vulnerabilidade, ou seja, locais com maior estabilidade; 3 são as localidades mais vulneráveis e valores próximos a 2 representam o equilíbrio entre as interferências morfogênicas e pedogenéticas.

2.4 Resultados e discussões

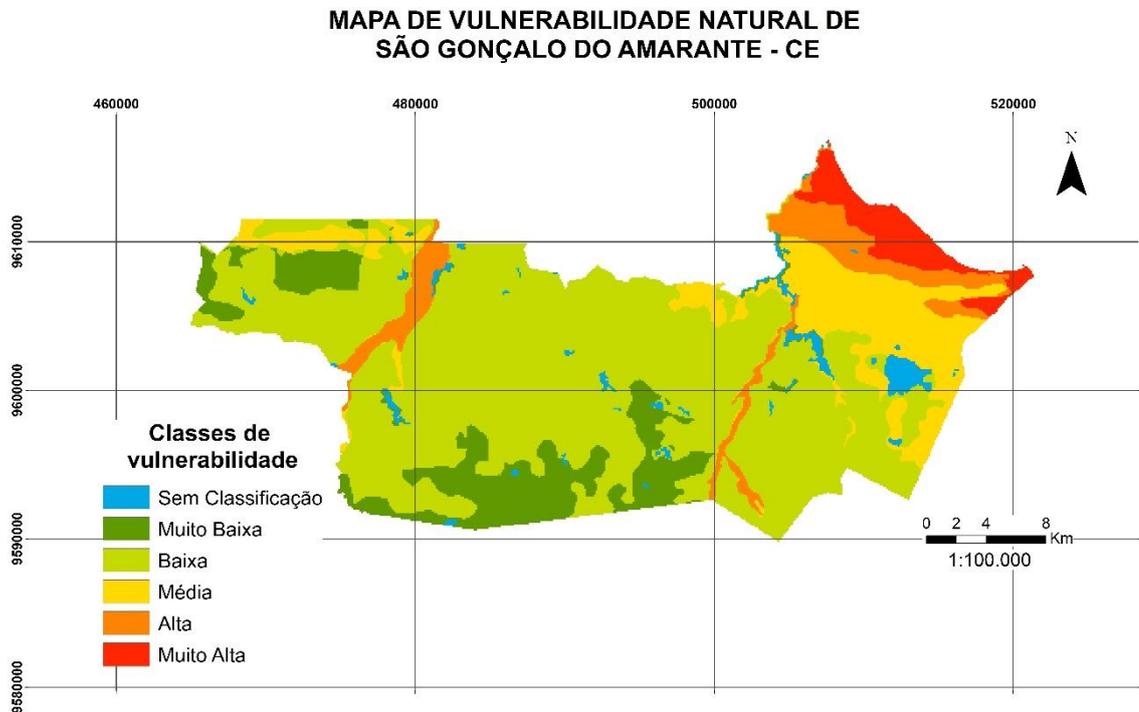
2.4.1 Vulnerabilidade Natural

A avaliação dos diferentes atributos da área de estudo proporcionou um conhecimento da situação atual e a tendência do ambiente frente a fatores ambientais sendo possível identificar os pontos de vulnerabilidade natural da área de estudo (Quadro 4 e Figura 4).

Quadro 4. Classes de vulnerabilidade natural e suas respectivas áreas.

Classes de Vulnerabilidade	Área (km²)	%
Sem classificação	16,4	2,0
Muita baixa	97,7	11,9
Baixa	509,8	61,9
Média	108,9	13,2
Alta	57,9	7,1
Muito Alta	32,6	3,9

Figura 4. Mapa de vulnerabilidade natural.



Dessa maneira identificou-se a classe de vulnerabilidade natural Muito Alta na porção mais litorânea do município, que corresponde 25 km de litoral, no qual abrange as praias do Pecém, praia da Colônia e a praia da Taíba. Nessa classe tem-se uma combinação de particularidades do litoral setentrional nordestino, com depósitos eólicos costeiros Holocênicos, Neossolos Quartzarênicos, vegetação do tipo formação pioneira com influência marinha e a presença de dunas.

Locais esses reconhecidos como áreas de expressiva vulnerabilidade, cujos componentes integradores obedecem a uma dinâmica complexa, resultado da interação entre esses agentes naturais e agentes físicos (ondas, marés, ventos e correntes).

As porções que apresentam uma vulnerabilidade natural alta corresponde aos locais com cobertura eólica Pleistocênica presentes no litoral Setentrional Nordeste com Neossolos Quartzarênicos e presença de agriculturas de cultura permanente (mamão, manga, castanha de caju, coco-da-baía e banana), além de fragmentos de depósitos aluvionares Holocênicos e depósitos de pântanos e mangues Holocênicos, com presença de Neossolo flúvico e Planossolos nátricos e recobertos com agriculturas de culturas cíclicas (cana-de-açúcar, batata-doce, mandioca, feijão e milho).

Desse modo, o crescimento das áreas de produção agrícola aumenta o risco da perda de espécies e o desequilíbrio do meio ambiente, onde a adoção de práticas incorretas de

manejo podem intensificar os processos de erosão e empobrecimento do solo, bem como o comprometimento da quantidade e a qualidade dos recursos hídricos.

A classe de vulnerabilidade média abrange uma área de 108,9 km² em sua maior parte caracterizado como tabuleiros litorâneos Cearenses com formações geológicas da Formação Barreiras, solos classificados como Neossolos Quartzarênicos e pequenas porções do Argissolos Amarelo e a presença de agriculturas com culturas cíclicas e permanentes, bem como áreas que ainda conservam uma vegetação natural dominante.

A classe de maior extensão, a de vulnerabilidade baixa equivale a uma área de 509,8km² representada pela Depressão Sertaneja Setentrional, com rochas da Unidade Canindé, Unidade Independência e Formações Barreiras, recobertos por solos Argissolos Amarelos, Planossolos Nátricos, Argissolo Vermelho – Amarelo, além de englobar as diversas vegetações presentes na área de estudo.

Já a classe de vulnerabilidade muito baixa equivale a Depressão Sertaneja Setentrional, com feições geológicas da Unidade Canindé, solos caracterizados como Argissolos Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelo recobertos por vegetação natural dominante.

E a classe de vulnerabilidade natural Sem classificação (16,4km²) refere-se aos corpos d'água.

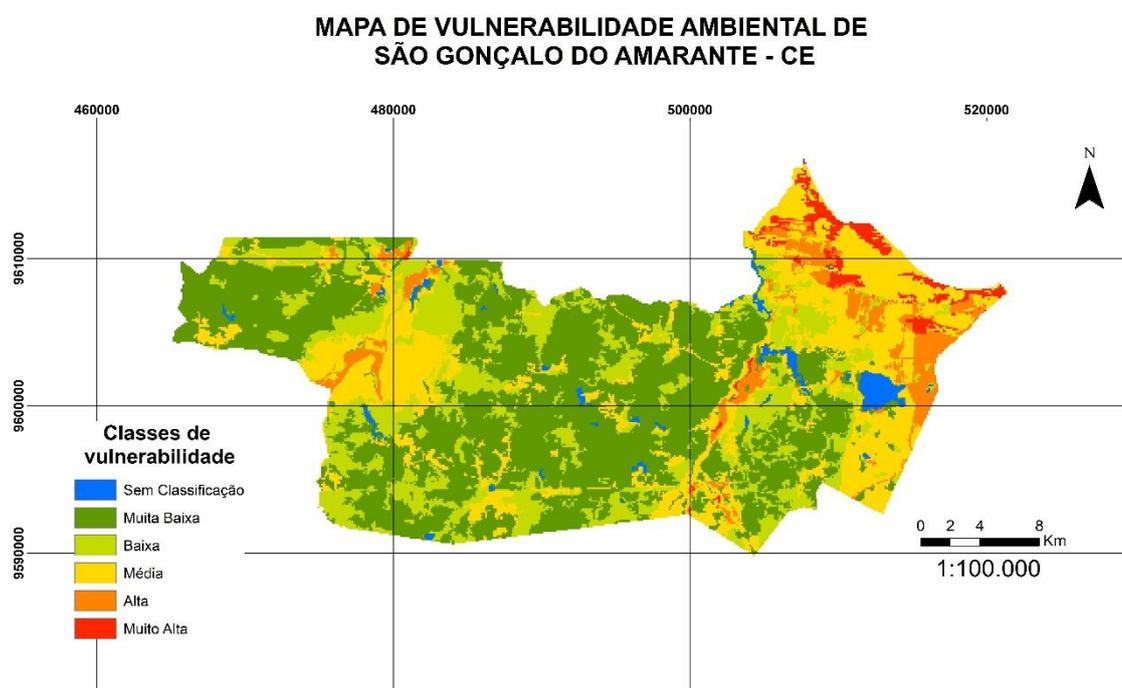
2.4.2 Vulnerabilidade Ambiental

Com base nos atributos naturais e nos efeitos das atividades antrópicas na área de estudo é possível determinar se ocorre uma perturbação no equilíbrio desse sistema e identificar a suscetibilidade dessa localidade frente a essas alterações conforme exposto no Quadro 5 e Figura 5.

Quadro 5 Classes de vulnerabilidade ambiental e suas respectivas áreas.

Classes de Vulnerabilidade	Área (km²)	%
Sem classificação	13,7	1,7
Muita baixa	372,3	45,2
Baixa	220,8	26,8
Média	158,9	19,3
Alta	38,3	4,7
Muito Alta	19,3	2,3

Figura 5. Mapa de vulnerabilidade ambiental



As porções que apresentam vulnerabilidade ambiental muito alta combinam feições do Litoral Setentrional Nordestino e de Planícies e terraços fluviais, com ocorrências de Coberturas eólicas Pleistocênicas, Depósitos eólicos Holocênicos e pequenos fragmentos de Depósitos Aluvionares Holocênicos que são recobertos por Neossolos Quartzarênicos e Planossolo nátrico, sob vegetações naturais dominantes e agriculturas com culturas cíclicas e permanente, ou seja, áreas antropizadas.

A classe de vulnerabilidade ambiental Alta, além de combinar os atributos ambientais dos Tabuleiros Litorâneos Cearenses e pequenas porções da Depressão Sertaneja Setentrional e Planícies e terraços fluviais, com ocorrência de rochas da Formação Barreiras, Unidade Canindé e Depósito de pântanos e mangues Holocênicos cobertos por Neossolos Quartzarênicos, Neossolo Flúvico e Argissolos Vermelho Amarelo sob vegetações naturais dominantes e agriculturas com culturas cíclicas e permanente, com áreas antropizadas e solos expostos.

As áreas classificadas de Média são bem distribuídas ao longo do município, englobando todas as feições geomorfológicas, as ocorrências geológicas, solos, vegetação observadas na área de estudo e porções de sedimento arenoso (Sedimento existente no trecho com depósito eólico), vegetação antropizadas e solo exposto.

Assim como a classe anterior a classe de vulnerabilidade ambiental baixa

apresenta-se bastante espaçada ao longo do município, recobrando todas as classes identificadas de geomorfologia, geologia, e vegetações naturais e porções de vegetação antropizada.

A classe de maior área corresponde a de vulnerabilidade muito baixa que apesar de ser bastante extensa não abrange a porção mais litorânea do município, apenas a Depressão Sertaneja Setentrional e os Tabuleiros Litorâneos Cearenses com ocorrências geológicas da Unidade Canindé, Unidade Independência e Formações Barreiras recobertos pelos diversos solos encontrados na área de estudo e com vegetações naturais predominantes e apenas com interferências antrópicas no plantio de agriculturas de culturas cíclicas.

E a classe de vulnerabilidade natural Sem classificação refere-se aos corpos d'água.

Essas áreas com elevado grau de vulnerabilidade ambiental são consequências do processo de antropização que ocorre desde o final do século XX e os primeiros anos do século XXI que testemunham importantes fatos com consequência notáveis para a ocupação da Zona Costeira, desde grande investimentos governamentais em infraestrutura, bem como o incentivo de capital estrangeiro para construção de grandes empreendimentos, como a construção do Porto do Pecém que conduziu a expansão da Região Metropolitana de Fortaleza para Oeste, propiciando um deslocamento do eixo de desenvolvimento metropolitano com grandes consequências para a região, como a criação de uma área industrial para sediar empresas de transformação de grande porte, além da implantação de usina termoeletrica e a criação de Unidades de Conservação do entorno (CAMPOS *et al.*, 2003).

Todo esse processo de ocupação de área de dunas, praias, encostas e bordas de tabuleiros acarreta em impactos ao longo do litoral (Figura 6a e 6b), comprometendo a dinâmica local, vindo a acelerar os processos erosivos ao longo da costa causando prejuízos materiais e despesas governamentais.

Assim, a combinação de áreas de extrema susceptibilidade natural, como as porções litorâneas, combinadas com ações antrópicas podem ocasionar uma perturbação no equilíbrio desses sistemas, necessitando de ferramentas para acompanhar a evolução da vulnerabilidade natural e ambiental desse município, como auxílio na gestão dos recursos naturais.

Figura 6. Impactos ocasionado na praia da Taíba pela ação das ondas (a). um conjunto de blocos de pedra, lançados uns sobre os outros, para servir como quebra-mar ou proteção contra a erosão das ondas (b).
Fonte: Autora (2020)



2.5 Conclusões

A elaboração de uma avaliação de vulnerabilidade natural e ambiental a partir de índices que correspondem a integração de características geomorfológicas, geológicas, de solos, vegetação e de uso e cobertura da terra, corroboram a elevada vulnerabilidade dos manguezais, das várzeas flúvio-lagunares e da linha de costa e consolidam a importância da elaboração de mapas de vulnerabilidade, de modo a auxiliar a compreensão dos diversos graus de fragilidade de áreas mapeadas para uso como instrumento de gestão costeira.

O município de São Gonçalo do Amarante apresenta muitas das suas características naturais conservadas o que está diretamente relacionada a uma predominância de vulnerabilidade natural baixa e vulnerabilidade ambiental muito baixa que abrange uma grande porção do município, mas a porção litorânea, ambiente naturalmente dinâmico por suas características físicas apresenta dados alarmante de vulnerabilidade natural e ambiental muito alta e alta.

Portanto, tem-se a necessidade do acompanhamento apropriado e de um planejamento territorial racional, afim de prever e mitigar os impactos sociais e ambientais, que a cada ano podem-se agrava ainda mais. Dessa maneira, há a necessidade de medidas de gestão integrada com políticas de exploração dos espaços conforme os princípios do desenvolvimento sustentável.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro a pesquisa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GeoCE) do Departamento de Geologia na Universidade Federal do Ceará.

Referências

ÂNGULO, R. J. Aspectos físicos das dinâmicas de ambientes costeiros, seus usos e conflitos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 10, p. 175-185, jul./dez. 2004. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/3107>. Acesso em: 11 ago. 2019.

CAMPOS, A. A.; MONTEIRO, A. Q.; MONTEIRO-NETO, C.; POLETTE, M. **Zona Costeira do Ceará: Diagnóstico para a gestão integrada**. Fortaleza, Aquasis, 2003

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **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** / Superintendência Estadual do Meio Ambiente; GEOAMBIENTE – Fortaleza: SEMACE, 2016

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **Gerenciamento Costeiro**. 2019. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/gerenciamento-costeiro/>. Acesso em: 10 jun. 2020.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **Software ArcGis Desktop**, License Type Arcinfo, version 10.8.1. 2019.

GRIGIO, A.M. **Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do Município de Guimarães (RN)**. p. 181, n° 34, 2003

GRIGIO, A. M.; SOUTO, M. V. S.; CASTRO, A. F., AMARO, V. E.; VITAL, H. & DIODATO, M. A. Use of remote sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of Guimarães - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research**, 39: 1427-1431, 2004.

GRIGIO, A. L. M.; AMARO, V. E.; DIODATO, M. A. Dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação do solo, no período de 1988 a 2004, do baixo curso do rio Piranhas-Assu (RN): sugestões de acompanhamento integrado das atividades socioeconômicas impactantes na área costeira. **Geografia**, v. 34, p. 141-161, 2009.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil**. IBGE, Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro, 176p, 2011. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv55263.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/sao-goncalo-do-amarante/panorama>. Acesso em: 08 ago. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 1991**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/82/cd_1991_n11_caracteristicas_populacao_domicilios_ce.pdf. Acesso em: 08 ago. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA)**. 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. Rio de Janeiro: IBGE- Diretoria de Geociências. 271p. (Manuais Técnicos de Geociências, 1). 2012. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2019.

IPECE. **Perfil Básico Municipal**. 2014. Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/perfil-basico-municipal-2015.html. Acesso em: 08 ago. 2019.

MAGINI, C.; MARTINS, A. H. O.; PITOMBEIRA, E. S. A Infraestrutura Portuária e suas Influências na Sedimentação Costeira na Vila do Pecém, Ceará, Brasil. **Geociências: UNESP**, São Paulo, v. 32, n. 3, p.532-546, 2013. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7297>. Acesso em: 08 ago. 2019.

ONU. Organização Das Nações Unidas. Living with risk. **A global review of disaster**

reduction initiatives. Inter-agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genebra – Suíça. 398p. e anexos, 2004. Disponível em: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>. Acesso em: 11 ago. 2019.

SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. A. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAUJO FILHO, J. C. DE; OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro De Classificação De Solos.** 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

TAGLIANI, C.R.A. Técnica para avaliação da vulnerabilidade de ambientes costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informações. **Galeria de artigos acadêmicos**, 2003.
TRICART, J. 1977. **Ecodinâmica.** Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN, 91p.

VIANA, C. M. P; SOUSA, J.; LIMA, K. A.; NASCIMENTO, M. M. S. **Perfil Básico Municipal 2015: Fortaleza/CE.** Fortaleza: Instituto de Pesquisa Estratégica Econômica do Ceará (IPECE), 19p. 2015.

3 CAPÍTULO III - EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA NO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE-CE NO PERÍODO DE 1984 A 2020

Resumo

As variações da linha de costa podem ocasionar prejuízos para o desenvolvimento do Estado e para projetos de engenharia. Dessa maneira os planos de gerenciamento costeiro devem levar em consideração as informações referentes ao posicionamento da linha de costa no passado para entender o comportamento atual e futuro. Neste contexto, esse presente estudo teve por finalidade analisar o comportamento da linha de costa em resposta a dinâmica natural e as ações antrópicas no município de São Gonçalo do Amarante, no estado do Ceará, através de análise multitemporal de imagens de satélite da série Landsat em um intervalo de 36 anos (1984-2020) com auxílio da extensão DSAS do *software* ArcGis por meio do método Linear Regression Rate. Na qual, foi possível interpretar duas fases bem marcantes: durante a construção do porto, marcado pela ação intensa da erosão que ocasionou diversos prejuízos ambientais e, após a construção do porto, manifestou-se os processos deposicionais. Dessa forma, esse estudo enfatiza que o município de São Gonçalo do Amarante, tem sofrido alterações na dinâmica local costeira e afetado a capacidade natural dos sistemas em responder efetivamente a eventos climáticos extremos, tornando assim essas regiões mais vulneráveis.

Palavras-chaves: Linha de costa; Porto do Pecém; DSAS; dinâmica costeira.

Analysis of the evolution of the coast line in the municipality of São Gonçalo do Amarante/CE in the period from 1984 to 2020

Abstract

Variations of the coastline can cause losses for the development of the State and for engineering projects. Thus, coastal management plans should take into account information regarding the positioning of the coastline in the past for current and future behavior. In this context, this study has to analyze the behavior of the coastline in response to natural dynamics and anthropic actions in the municipality of São Gonçalo do Amarante, in the state of Ceará, through multitemporal analysis of Landsat series satellite images in a 36-year interval (1984-2020) with the aid of the DSAS extension of the ArcGis software. In which, it was possible to interpret two very striking phases: during the construction of the port, marked by the intense action of erosion that caused several environmental damages and after the construction of the port, the depositional processes that have led the local sedimentary balance to balance. Therefore, it is essential to monitor the evolution of the coastline, as it will generate essential information to understand the local coastal dynamics and how it influences the natural environment.

Keywords: Coast line; Port of Pecém; DSAS; coastal dynamics.

3.1 Introdução

As alterações na linha de costa em geral são resultantes de processos erosivos, transporte e sedimentação, combinados com a configuração e orientação da costa, com os tipos de materiais que constituem os substratos costeiros, com a vegetação e com a presença de desembocaduras, refletem uma resposta integrada do comportamento da costa aos processos e agentes dinâmicos (SOUZA-FILHO, 2000; SOUZA-FILHO E PARADELLA, 2002), agora em grande parte intensificada devido às atividades humanas.

Essas variações da linha de costa podem ocasionar prejuízos para o desenvolvimento do Estado e para projetos de engenharia. Mas, apesar de alguns projetos de engenharia visarem solucionar a problemática da erosão, muito se sabe que a construção de empreendimentos também pode favorecer para a criação de problemas em outras localidades próximas, conforme retrato em estudo ao redor do terminal portuário de Freeport, Texas, EUA (LUIJENDIJK *et al.*, 2018); no porto de Mucuripe em Fortaleza que desencadeou processos erosivos que praticamente destruíram as praias da cidade (BEZERRA, PINHEIRO, MORAIS, 2007) e estudos no entorno do terminal portuário do Pecém (DUARTE *et al.*, 2018)

Dessa maneira, a variação da linha de costa deve ser analisada com um espaçamento temporal que seja possível observar os fenômenos atuantes naquela localidade, assim como determinar os padrões de modificação na largura, volume de praias, e quantificar taxas históricas de migração (ARAUJO *et al.*, 2009).

Em países como o Brasil, onde a faixa litorânea é muito longa, o mapeamento dos recursos naturais costeiros por técnicas convencionais é uma tarefa difícil, principalmente devido à sua grande extensão. O emprego de imagens de satélites de sensoriamento remoto é uma das ferramentas mais eficazes que podem ser utilizados para o mapeamento desses recursos naturais de uma maneira rápida e precisa (BOORI & AMARO, 2010).

Portando, baseado na definição de linha de costa proposta por Dolan *et al.* (1980), que consiste na demarcação do limite das áreas entre a interface física da terra e da água, além das informações que se pretende extrair, a escala de trabalho, disponibilidade e qualidade de dados definiu-se a utilização de imagens oriundas de satélites imageadores (BOAK e TURNER, 2005) para observar a variação da linha de costa no município de São Gonçalo do Amarante, localizado no estado do Ceará.

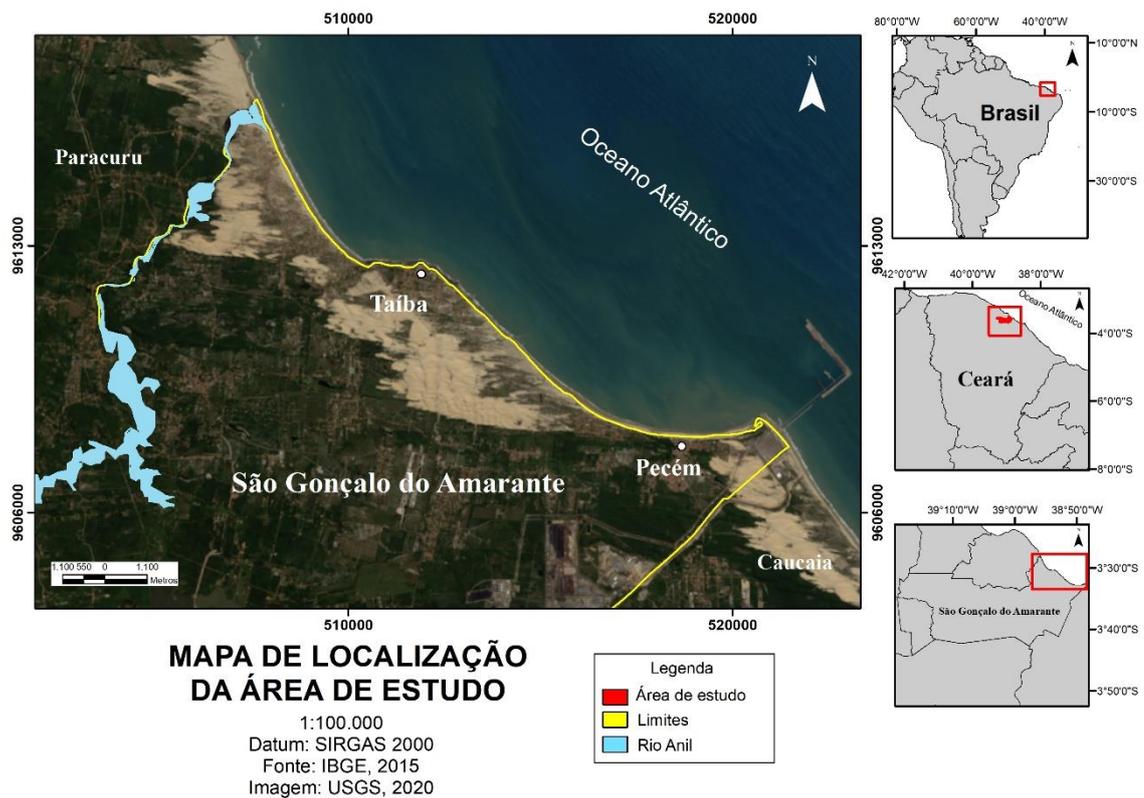
Neste contexto, o presente estudo tem por finalidade analisar o comportamento da linha de costa em resposta a dinâmica natural e as ações antrópicas, através de análise multitemporal de imagens do satélite da série Landsat em um intervalo de 36 anos (1984-

2020), e a partir dos resultados obtidos, gerar informações essenciais para o planejamento e gestão costeira da região.

3.2 Área de estudo

O município de São Gonçalo do Amarante, distante 60 km da capital Fortaleza, está localizado na porção Norte do Estado do Ceará (Figura 7), inserida na mesorregião Metropolitana de Fortaleza e na microrregião de Fortaleza (IPECE, 2014). Constituído por 7 distritos: Pecém, Taíba, Siupé, Umarituba, Croatá, Serrote, Cágado e a sede do município. Sendo a área de estudo apenas os distritos situados no litoral (que possuem praia): Pecém (praia da Colônia) e Taíba que apresentam uma extensão de 18,5 km de faixa praial com larguras variadas e com declives muito suave para o mar.

Figura 7. Mapa de localização do município de São Gonçalo do Amarante, CE.



As médias de temperaturas registradas na região são de aproximadamente 27 °C, com regimes climáticos secos com variações de subúmidos e semiáridos, caracterizando-se como Litoral Setentrional do Nordeste (LSN) (AB'SABER, 2001 e 2006). Mas, apesar de estar inserido nesse regime, a influência da porção oceânica eleva em até duas vezes as precipitações médias anuais dessa região, atingindo precipitações superiores a 750 mm anuais.

A área é caracterizada como clima tropical, tipo Aw (KOPPEN, 1928) com estações chuvosas no verão (de novembro a abril) e inverno seco (de maio a outubro), e com ventos alísios de NE, E e SE.

O litoral do município de São Gonçalo do Amarante possui uma zona costeira formada basicamente por depósitos eólicos costeiros Holocênicos (IBGE, 2019), compostos por sedimentos de origem continental e marinha que foram depositados através dos processos deposicionais (SANTOS, 2006) nas proximidades das praias ao longo da costa (dunas, praias e pós- praias), além de unidades do embasamento cristalino (quartzo e gnaisse) e rochas sedimentares.

Esse material rochoso em parte é recoberto por solos Gleissolos que são formados em sua maioria a partir de sedimentos nas proximidades dos cursos d'água ou em área de relevo plano de terraços marinhos, fluviais ou lacustres, e por solos classificados de Neossolos Quartzarênicos que são constituídos por material mineral, ou por material orgânico pouco espesso, equivalente as areias de origem marinha depositadas pela ação dos ventos, denominada de dunas móveis (IBGE, 2015).

Em parte, esses solos são encobertos por vegetação do tipo Pmb (Formação Pioneira com influência marinha arbustiva) como, restingas, arbustiva das dunas e herbácea das praias. (IBGE, 2013).

Na Ponta do Pecém, local caracterizado pelo acidente geográfico (promontório) que configura uma topografia mais elevada é constituída por rochas cristalinas do Grupo Ceará, recobertos por sedimentos do Grupo Barreiras e dunas móveis. Local esse, onde está localizado o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP) em operação desde 2002, que segundo Magini, Martins e Pitombeira (2013) tem papel fundamental nos processos erosivos e deposicionais da área de estudo.

3.3 Metodologia

O estudo da variação da linha de costa do município de São Gonçalo do Amarante foi baseado em Souza *et al.* (2005) que afirmam que os estudos da erosão costeira podem ser executados em intervalos de curto e longo prazo por métodos diretos e indiretos. Os métodos indiretos são empregados para análise de fenômenos estacionais que acarretam eventos erosivos de baixa periodicidade, observados por meio da integralização das características oceânicas, meteorológicas, da caracterização morfológica de praia e estudos sedimentológicos. Já o método direto, que é utilizado nesse estudo, consiste na análise da variação da linha de

costa por imagens de satélites para um intervalo de 36 anos através de cálculos de progradação ou retrogradação.

Inicialmente, para a análise multitemporal da linha de costa selecionou-se cinco imagens de satélite da série Landsat disponibilizadas pelo *United State Geological Survey* (USGS, 1984; USGS, 1990; USGS, 2000; USGS, 2009 e USGS, 2020), com espaçamento temporal irregular de 6, 9, 10 e 11 anos, devido a indisponibilidade de imagens sem interferências climáticas (presença de nuvens) na estação seca da região (Quadro 6).

Quadro 6. Lista de imagens utilizadas para delimitação da linha de costa.

Data	Satélite/Sensor	Resolução espacial
19/09/1984	Landsat 5/TM	30 m
19/08/1990	Landsat 5/TM	30 m
02/11/2000	Landsat 5/TM	30 m
11/11/2009	Landsat 5/TM	30 m
02/11/2020	Landsat 8/OLI	30 m

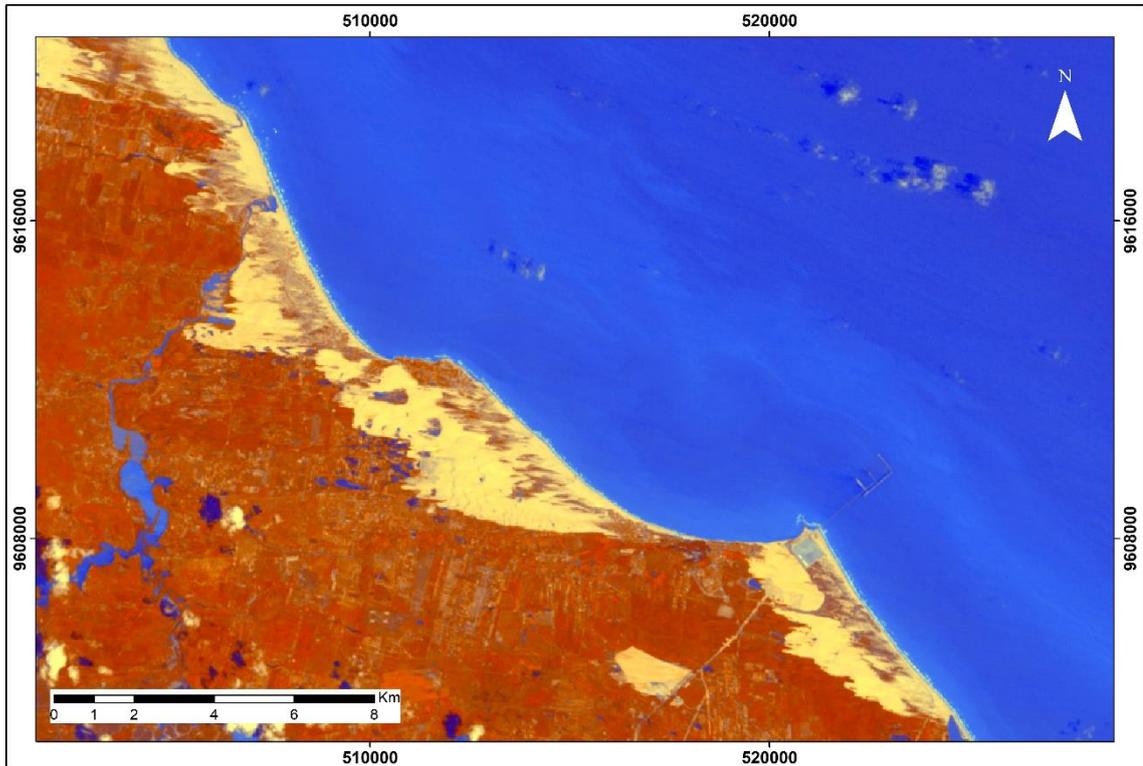
Com o intuito de realçar as feições superficiais foi feito o Processamento Digital das Imagens (PDI) no *software* Spring® 5.5.6 (INPE, 2020), onde as bandas verde (G) e infravermelho próximo (NIR) passaram por um realce de contraste linear. A razão dessas bandas foi realizada através do Índice Normalizado de Água Diferente (NDWI) que se baseia nas suas respostas espectrais para ressaltar as feições da água e minimizar o restante da superfície (MCFEETRS, 1996). E após um novo realce de contraste desse algoritmo foi feita a composição RGB NIR-G-NDWI Infravermelho-Verde-NDWI (Figura 8).

Após o PDI vetorizou-se as linhas de costa manualmente baseadas na demarcação entre as áreas úmidas e secas (DOLAN *et al.*, 1980) dos anos 1984, 1990, 2000, 2009 e 2020. E ainda, gerou-se a linha de base tendo como referência a linha de costa atual (linha de base *offshore*).

Ulteriormente, utilizou-se para análise e quantificação da linha de costa a extensão do ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019), o *Digital Shoreline Analysis System* 5.0 (DSAS) (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018) para vetorizar as linhas de costa que gerou transectos perpendiculares as linhas de costas com espaçamento de 10 metros entre si.

Portanto, com os cinco vetores da linha de costa, a linha de base e os vários transectos gerados automaticamente pelo DSAS foi possível cruzar os vetores das linhas de costas e efetuar cálculo das variações ao longo desse intervalo de 36 anos (1984-2020) através de uma matriz numérica que determina o comportamento morfológico das linhas de costa em relação a linha de base, considerando as situações de erosão, acreção e equilíbrio (Quadro 7).

Figura 8. Composição NIR-G-NDWI em RGB.



Quadro 7. Comportamento morfológicos das linhas de costa.

Classificação	Variação
Erosão	< -1 m/ano
Acreção	> +1 m/ano
Equilíbrio	entre -1 e +1 m/ano

O método estatístico puramente computacional selecionado no DSAS para calcular variação da linha de costa foi o *Linear Regression Rate* (LRR) que mede a distância entre a linha de base e cada intersecção da linha de costa ao longo de um transecto através de um cálculo de regressão linear simples que combina informações de data e a incerteza posicional para cada linha de costa gerando uma variação em metros anuais (HIMMELSTOSS *et al.*, 2018).

Posteriormente para que fosse possível quantificar o balanço sedimentar em área (m²) e analisar a formação de estruturas do tipo *spit* no extremo leste do CIPP, a linha de costa dessa porção foi vetorizado em forma de polígono em camadas separadas para cada ano.

Determinou-se a união de dois anos consecutivos: 1984-1990, 1990-2000, 2000-2009 e 2009-2020 que tem como produto a tabela constituída de duas colunas FID e FID 1 que correspondem por exemplo, aos polígonos vetorizados dos anos de 1984 (FID) e 1990

(FID 1) com valores de 0 ou -1 (Quadro 8), dessa maneira quando na primeira coluna possuir o número zero e na segunda coluna o valor um negativo, tem-se a predominância da erosão. Quando inverso, o valor -1 estiver na primeira coluna e o valor zero na segunda coluna a acreção é que atuou nesse intervalo. E quando as duas colunas apresentarem algarismos zero, significa que não houve modificação (GRIGIO *et al.*, 2005).

Quadro 8. União de anos consecutivos (exemplo para os anos de 1984-1990).

FID	FID 1	Classificação
0	-1	Erosão
-1	0	Acreção
0	0	Sem modificação

3.4 Resultados e discussões

A delimitação da linha de costa do município de São Gonçalo do Amarante e a integração dos dados através dos 1852 transectos gerados na extensão DSAS permitiu a obtenção uma boa visão da evolução costeira ao longo dos 36 anos (1984-2020) por meio da classificação dos processos erosivos, acrecionais e de equilíbrio (Figura 9).

Figura 9. Processos deposicionais da área de estudo com base na integração dos dados através dos transectos gerados.



Ao longo de toda a linha de costa nesse intervalo é possível determinar que as maiores porções relacionadas a erosão estão associadas ao Rio Anil e ao promontório da Taíba (Figura 10).

Figura 10. Variação da linha de costa do município de São Gonçalo do Amarante (1984-2020).



As praias próximas as desembocaduras fluviais ou canais de maré estão sujeitas a rápida modificação e a eventos erosivos ocasionados pela própria dinâmica fluvial, como é o caso do Rio Anil, que acomoda uma estreita faixa de praia em alguns períodos do ano, em um contexto que não apresenta um comportamento linear tornando-a mais vulnerável a um evento erosivo controlado (ADDAD, 1997) por fatores externos (pluviosidade, transporte de sedimento fluvial, aporte sedimentar, etc.)

No promontório da Taiba é possível observar ao longo dos anos uma área de predominância de deposição após o pontal que apresenta uma forma curvada que propicia a redução de ação das ondas e transporte de sedimentos, e conseqüentemente acúmulo desse material. Já na área à sotamar tem-se a presença de erosão, pois a ação das ondas é mais acentuada e proporciona um transporte mais intenso de leste a oeste, conforme a deriva litorânea.

A fração com predomínio da deposição, localizado no extremo leste do município (Pecém) é interpretado por duas fases bem marcantes ao longo desse intervalo: durante a construção do porto, marcado pela ação intensa da erosão ao longo do intervalo de 1990 a 2000 e após a construção do porto, marcado por um grande potencial nos processos deposicionais de leste a oeste (anos 2000 a 2020).

A posição da linha de costa manifestou variações ao longo dos 36 anos (1984-

2020), como é possível observar através do gráfico apresentado na Figura 11, que explicita o comportamento linear ao longo de toda a costa do município, com maior intensidade erosiva na porção a leste do promontório da Taíba, que correspondeu a aproximadamente 54 m erodido nesse intervalo. E a maior predominância deposicional da área de estudo ocorreu na localidade do Pecém, o que gerou uma progradação da linha de costa de aproximadamente 240 m ao longo desses 36 anos.

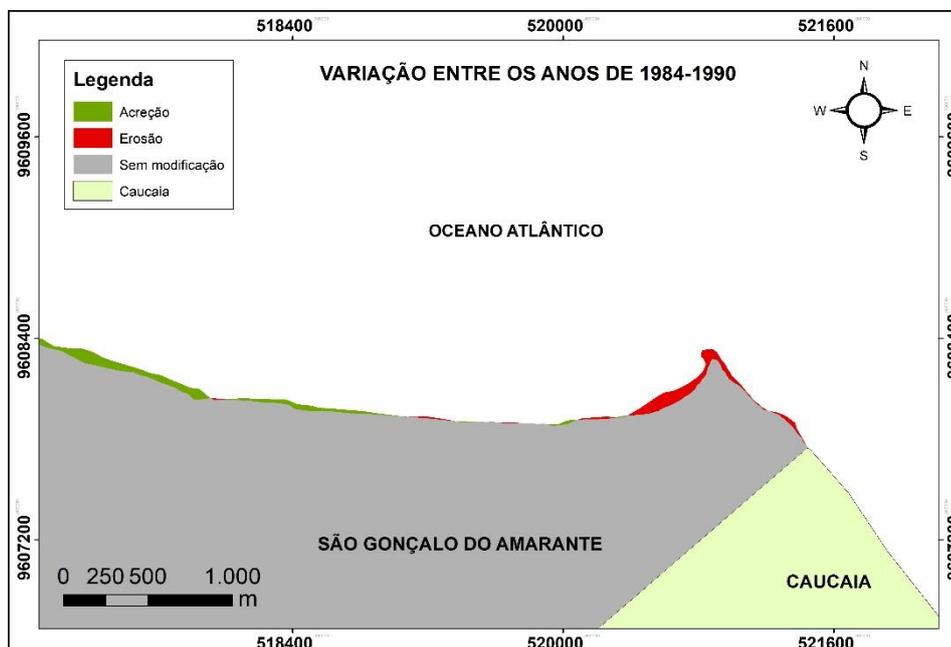
Figura 11. Taxa de variação da linha de costa pelo método da *Linear Regression Rate* (LRR).



Para compreender melhor toda essa dinâmica costeira e a influência da construção do Complexo Industrial e Portuário do Pecém na linha de costa adjacente, utilizou-se metodologia de vetorização dos polígonos para quantificar o balanço sedimentar em área (m^2) apenas do distrito do Pecém, sendo possível então analisar o seu comportamento deposicional e o surgimento de feições nessa linha de costa.

Para isso, observou-se os quatro intervalos ao longo desses 36 anos, no qual, o primeiro período analisado compreende o intervalo de 6 anos entre os anos de 1984 e 1990, onde foi possível observar que houve um predomínio de acreção na porção oeste do Pecém e ação erosiva na fração leste (Figura 12). Esse fluxo natural de sedimentos da porção leste para a porção oeste era controlado pela velocidade dos ventos, da corrente equatorial, das características granulométricas dos sedimentos, somado ao embasamento cristalino que gera estruturas do tipo promontório que possibilitam um intenso transporte de sedimentos de leste a oeste.

Figura 12. Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 1984 a 1990.



O segundo intervalo observado abrange 10 anos, compreendido entre os anos de 1990 e 2000, onde ocorreu a dominância da erosão a oeste e, no extremo leste, atuação da acreção. Esses processos marcados anteriormente por uma dinâmica natural atuante no litoral do Pecém passaram a partir de 1991 a sofrer alterações antrópicas promovido pelo processo de urbanização da região que passou a ocupar mais intensamente as dunas e a berma (MEIRELES, SILVA e THIERS, 2006), provocando modificação do processo natural de transporte de sedimentos que alimentava a praia, o que impulsionou a remoção dos sedimentos mais a jusante pela ação das ondas, provocando um processo erosivo intenso naquela localidade.

E somado a esses processos de urbanização, no ano de 1998 com a implantação do Terminal Portuário Provisório (TEP), obra que acarretou o bloqueio *bypass* de sedimentos (MEIRELES, SILVA e THIERS, 2006), promovendo o acúmulo de sedimentos na porção a leste do TEP e erosão a oeste, observado com o recuo da linha de costa nessa porção (Figura 13).

O terceiro espaçamento engloba o intervalo de 9 anos (2000-2009), onde é possível determinar a presença de erosão nos extremos leste e oeste do CIPP e progradação na porção oeste (Figura 14). Essas mudanças significativas na linha de costa foram causadas após a conclusão da construção do porto com a remoção do TEP no ano 2001 propiciando um maior aporte sedimentar, antes interrompido por essa estrutura.

Figura 13. Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 1990 a 2000.

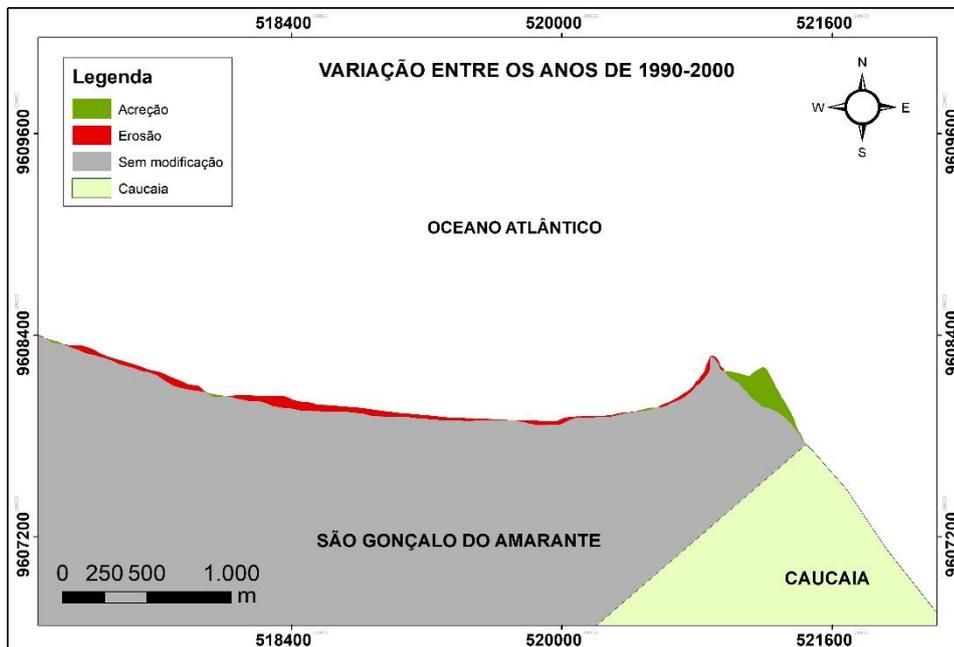
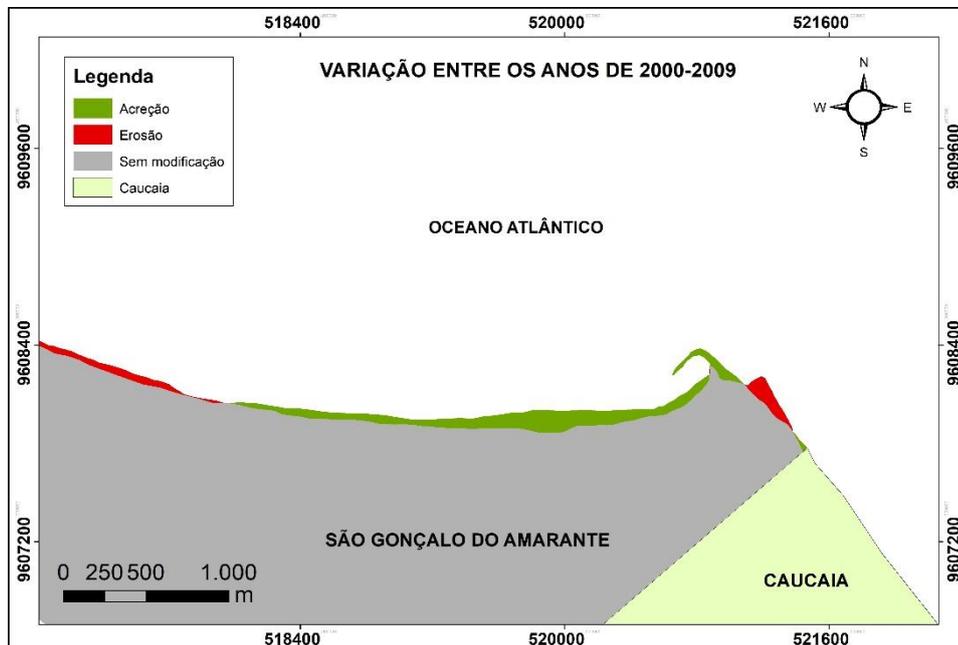


Figura 14. Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 2000 a 2009.

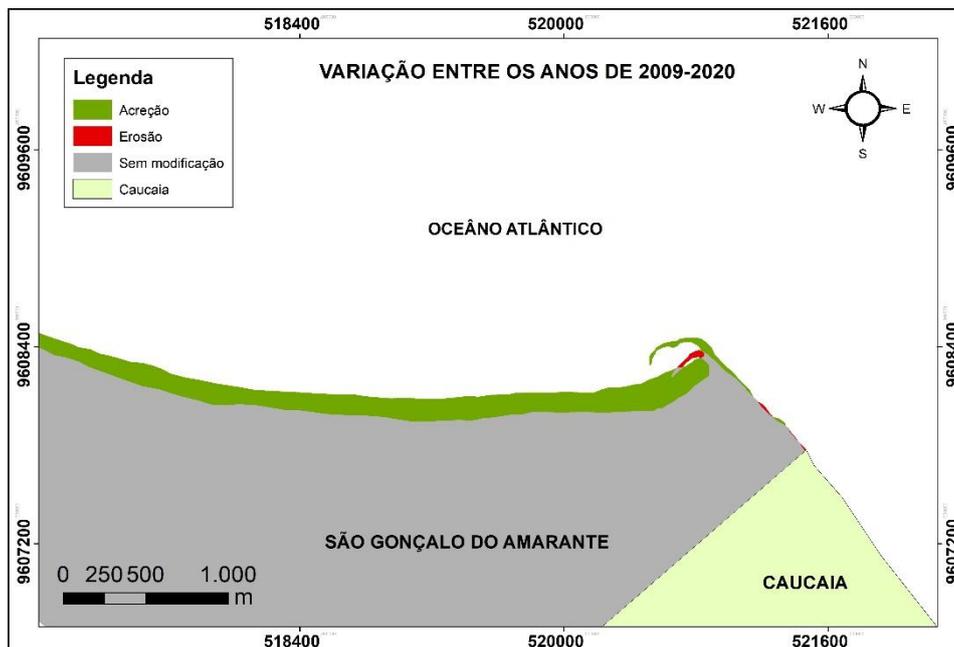


Após essa remoção também se iniciou o processo de desenvolvimento da estrutura do tipo barreira *spit* (barreira costeira) conectada a linha de costa, gerada devido ao elevado transporte de sedimentos paralelos a linha de costa pela ação da deriva continental (DAVIS e DUNCAN, 2004).

Já o intervalo compreendido nos últimos 11 anos (2009-2020) desta análise, teve

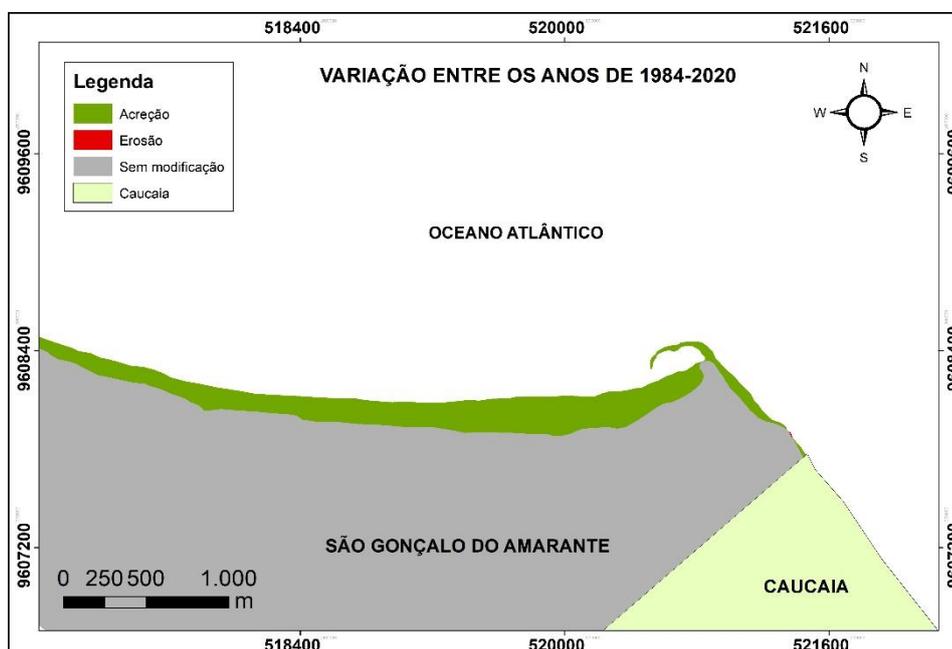
influência da acreção (Figura 15), que ocasionou um maior aporte sedimentar na região a sotamar da região do promotório são intensos acarretou-se um transporte de sedimentos de leste a oeste formando promontório provocando a engorda da faixa de praia e consequentemente como os ventos nas regiões de dunas. Em estudo, de intervalos menores (anos de 2011 a 2014) para a mesma região, Duarte *et al.* (2018) confirmam essa mesma tendência geral de acúmulos de sedimentos nessa localidade.

Figura 15. Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 2009 a 2020.



Assim, a posição da linha de costa do Pecém demonstra variações ao longo dos 36 anos (1984-2020), com maior intensidade erosiva entre os anos de 1984 e 1990 que correspondeu a aproximadamente 303.120 m². E no intervalo de 2009-2020 teve-se uma deposição aproximada de 558.159 m² caracterizando a maior progradação da área de estudo, o que leva a caracterizar o processo sedimentar dessa localidade ao longo desses 36 anos com acentuados processos deposicionais atuantes (Figura 16).

Figura 16. Evolução da linha de costa do Pecém no intervalo de 1984 a 2020.



3.5 Conclusão

Ao longo dos 36 anos analisados, com base na metodologia de processamento digital de imagens de satélite para realçar as feições úmidas da área estudada e da vetorização da linha de costa e do emprego do DSAS, foi possível quantificar e qualificar as alterações costeiras do município de São Gonçalo do Amarante, identificando ao longo da costa as regiões que sofrem erosão, acreção e o papel relevante que as ações antrópicas tem nessa dinâmica.

A dinâmica da linha de costa do município pode ser explicada mediante aos processos dinâmicos costeiros da região do Pecém e da Taíba. Para a região do Pecém tem-se duas fases bem marcantes: durante a implantação do Terminal Portuário Provisório (TEP), marcado pela ação intensa da erosão que provocou um recuo da linha de costa, que ocasionou diversos prejuízos ambientais e, após conclusão do porto com a remoção do TEP, manifestou-se os processos deposicionais. Já para a Taíba, marcada pela estrutura do promontório que controla a ação das ondas, tem-se uma redução do transporte de sedimentos após a estrutura e consequentemente há um maior aporte sedimentar, e na porção a sotamar da estrutura, o transporte de sedimentos é mais intenso de leste a oeste devido ação intensa das ondas.

O fato é que a realidade presente no município de São Gonçalo do Amarante, bem como em vários outros municípios portuários do Brasil, tem-se observado alterações na

dinâmica local costeira que vêm afetando a capacidade natural dos sistemas em responder efetivamente a eventos climáticos extremos, tornando assim essas regiões mais vulneráveis.

Para uma melhor compreensão é necessário o acompanhamento da evolução da linha de costa, que irá gerar informações imprescindíveis para a definição de políticas públicas de planejamento e ordenamento territorial, permitindo compreender a dinâmica costeira local e como esta influencia no meio natural.

Agradecimentos

Ao apoio financeiro a pesquisa pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GeoCE) do Departamento de Geologia na Universidade Federal do Ceará.

Referências

AB' SÁBER, Aziz Nacib. **Brasil: Paisagens de Exceção: o litoral e o Pantanal Mato – grossense: patrimônios básicos**. Ateliê Editorial, Cotia, 2006.

AB' SÁBER, Aziz Nacib. **Litoral do Brasil**. Metalivros, São Paulo, 2001.

ADDAD, J. Alterações fluviais e erosão costeira. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 2, p. 21-44, 1997. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/57/e880b8870ab74e58628c8746c6880108_163d73ef3e390f6d81370616a8654993.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020

ARAUJO, R.S., SILVA, G.V., FREITAS, D., KLEIN, A. H. F. **Georreferenciamento de Fotografias Aéreas e Análise da Variação da Linha de Costa**. In: J. Alcántara, C., Arango, I. D. C., Mendy F. I. I., Ortega, M. A., Klein, A. H. F. A. C., Barlow, H. R. S. (Eds.). Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnologia para el Desarrollo-CYTED, Espanha pp. 123-138, 2009.

BEZERRA, M.O., PINHEIRO, L., MORAIS, J.O. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972 - 2003. **Journal of Coastal Research**, 50, 1163-1167, 2007.

BOAK, E.H., TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. **Journal of Coastal Research**, 21, 688-703, 2005

BOORI, M. S., AMARO, V. E. Land use change detection for environmental management: using multi-temporal, satellite data in Apodi Valley of northeastern Brazil. **Applied GIS International Journal**, 6, 1-15, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/31112/1/LandUseChange_AMARO_2010.pdf. Acesso em: 12 dez. 2020

DAVIS, JR R. A., DUNCAN, M. F. **Beaches and coasts**. Blackwell Publishing, Oxford, 2004.
DOLAN, R., HAYDEN, B.P., REA, C., HEYWOOD, J. Shore-line erosion rates along the middle Atlantic coast of the United States. **Geology**, 7, 602–606, 1979.

DUARTE, C. R., DE MIRANDA, F. P., LANDAU, L., SOUTO, M. V. S., SABADIA, J. A. B., NETO, C. A. DA S., RODRIGUES, L. I. DE C., DAMASCENO, A. M., 2018. Short-time analysis of shoreline based on RapidEye satellite images in the terminal area of Pecém Port, Ceará, Brazil. **Int. J. Remote Sens.** 39 (13), 4376–4389, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1457229>. Acesso em: 10 jan. 2020

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **Software ArcGis Desktop**, License Type Arcinfo, version 10.8.1, 2019.

GRIGIO, A. M. AMARO, V. E., VITAL, H., DIODATO, M. A. 2005. A method for Coastline Evolution Analysis Using GIS and Remote Sensing: a case study from the Guamaré City, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, 42, 412-421, 2005.

HIMMELSTOSS, E. A., HENDERSON, R. E., KRATZMANN, M. G., FARRIS, A. S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0** user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA)**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br>>. Acesso em: 02 dez. 2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Rio de Janeiro, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro, 2015.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. **SPRING 5.5.6**. São José dos Campos, 2020. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring>. Acesso em: 12 jan. 2021

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal. Fortaleza**, 2014. Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/perfil-basico-municipal-2015. Acesso em: 08 ago. 2020.

KOPPEN, W., GEIGER, R. **Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes**, 1928. Wall-map 150cmx200cm.

LUIJENDIJK; A., HAGENAARS, G., RANASINGHE, R., BAART, F., DONCHYTS, G., AARNINKHOF, S. The state of the world's beaches. **Nature Scientific Reports**, 8, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>

MAGINI, C., MARTINS, A. H. O., PITOMBEIRA, E. S. A Infraestrutura Portuária e suas Influências na Sedimentação Costeira na Vila do Pecém, Ceará, Brasil. **Geociências: UNESP**, São Paulo 32, 532-546. 2013. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7297>. Acesso em: 01 jan. 2021.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open waterfeatures. **International Journal of Remote Sensing**, 17 (7), 1425-1432, 1996.

MEIRELES A.J.; SILVA, A. E.; THIERS, P.R.L. Os campos de dunas móveis: fundamentos dinâmicos para um modelo integrado de planejamento e gestão da Zona Costeira, **Revista GEOUSP**, 20, 101-119. 2006. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/74010>. Acesso em: 12 dez. 2020.

SANTOS, Jader Oliveira. **Vulnerabilidade Ambiental e Áreas de Risco na Bacia Hidrográfica do Rio Cocó–Região Metropolitana de Fortaleza–Ceará**. Núcleo de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e meio Ambiente-PRODEMA. Universidade Federal do Ceará - UFCE. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente). 2006.

SOUZA, C. R. DE G., SUGUIO, K., OLIVEIRA, A. M. S., OLIVEIRA, P. E. 2005. **Quaternário do Brasil**. Holos Editora, Ribeirão Preto, 2005.

SOUZA-FILHO, Pedro Walfir Martins. **Avaliação e aplicação de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, Bragança, norte do Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica), Belém, UFPA, 2020.

SOUZA-FILHO, P. W. M; PARADELLA W. R. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. **Wetlands Ecology and Management**, 10 (2), 121-130, 2002.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat 8 Product**, 2016. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 dez. 2020.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat 5 Product**, 2006. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 dez. 2020.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat 7 Product**, 1999. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 dez. 2020

4 CAPÍTULO IV - ÍNDICE DE VULNERABILIDADE COSTEIRA DO MUNICÍPIO DE SÃO GONÇALO DO AMARANTE (CEARÁ) FRENTE A ELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR

Resumo

Atualmente, um dos mais importantes problemas aplicados na geologia costeira é determinar a resposta física do litoral a elevação do nível do mar. A previsão de taxas de recuo da linha de costa e de perda de sedimentos é fundamental para o planejamento de futuras estratégias de gerenciamento da zona costeira. Nesse sentido, as imagens de satélite, submetidas às técnicas de PDI (Processamento Digital de Imagens), integradas em ambiente SIG permitem avaliar as alterações ocorridas na paisagem, correlacionando tendências, variabilidades, potencialidades e fragilidades no ambiente, permitindo compreender as mudanças nas condições ambientais, além de demonstrar as dinâmicas de uma região, auxiliando no suporte ao controle de riscos ambientais e desastres naturais. Esta pesquisa determinou o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) do município de São Gonçalo do Amarante (Ceará), com o intuito de evidenciar as áreas que apresentam maior vulnerabilidade, tendo como base a análise de seis variáveis (geomorfologia, taxa de mudança histórica nas margens/linhas de praia, declividade costeira, amplitude média das marés, altura significativa de ondas, o Nível Médio do Mar) que foram relacionadas de forma quantificável à vulnerabilidade relativa da costa às mudanças físicas devido à elevação do nível do mar. Constatou-se que 63,13% da linha costeira mapeada é classificada com IVC moderado, 21,85% Muito Baixa, 8,07% com vulnerabilidade Alta, 5,49% classificado como Baixa e apenas 1,40% da faixa litorânea classificada com vulnerabilidade costeira Muito Alta. A porção mais vulnerável à elevação do nível do mar corresponde a foz do Rio Anil, local que não apresenta um comportamento linear, variando a largura da faixa de praia ao longo do ano, favorecendo a ação de eventos externos. As porções de menor valor de IVC estão relacionados as localidades em que ocorrem maiores valores deposicionais ao longo do intervalo de 36 anos analisado. E as áreas classificadas como moderadas, correspondem as maiores extensões da área de estudo, caracterizada com um estágio de equilíbrio entre a erosão e a deposição.

Palavras-chave: Litoral; IVC; elevação do nível do mar.

Coastal Vulnerability Index of the municipality of São Gonçalo do Amarante (Ceará) against rising sea levels

Abstract

Currently, one of the most important general problems in coastal geology is determining the physical response of the coast to sea level rise. Predicting shoreline return and sediment loss rates is critical to planning future coastal zone management strategies. In this sense, as satellite images, submitted to PDI (Digital Image Processing) techniques, integrated in a GIS environment, it allows the assessment of changes in the landscape, correlating trends, variability, strengths and weaknesses in the environment, allowing for an understanding of changes in environmental conditions, in addition to demonstrating the dynamics of a region, helping to support the control of environmental risks and natural disasters. This research determined the Coastal Vulnerability Index (CVI) of the municipality of São Gonçalo do Amarante (Ceará), in order to highlight the areas that present the greatest vulnerability, based on the analysis of six variables (geomorphology, rate of change) shorelines/beach lines, coastal slope, mean tidal range, significant wave height, Mean Sea Level) which were quantifiable related to coastal vulnerability to physical changes due to sea level rise. It was obtained that 63.13% of the mapped coastline is classified as moderate CVI, 21.85% Very Low, 8.07% as High vulnerability, 5.49% classified as Low and only 1.40% of the coastal strip division with Very High coastal vulnerability. The portion most vulnerable to sea level rise corresponds to the mouth of the Anil River, a place that does not present a linear behavior, varying the width of the beach strip throughout the year, favoring the action of external events. The portions with the lowest CVI value are listed as locations in which the highest depositional values occur over the 36-year interval analyzed. And the areas classified as moderate correspond to the most common in the study area, characterized by a stage of equilibrium between erosion and deposition.

Keyword: Coastline; CVI; sea level rise.

4.1 Introdução

As zonas costeiras estão entre os ambientes naturais mais dinâmicos do planeta, oferecendo uma série de bens e serviços essenciais para o bem-estar social e econômico do ser humano. As zonas costeiras representam o espaço geográfico de interação do ar, do mar e da terra, incluindo seus recursos renováveis ou não, abrangendo uma faixa marítima e outra terrestre, caracterizada por ecossistemas altamente diversos, como recifes de coral, manguezais, praias, dunas e pântanos (KLEIN, 2002).

De acordo com a Comissão Interministerial para Recursos do Mar – CIRM (BRASIL, 2010), seguindo a tendência mundial em ocupar as áreas litorâneas, 25% da população brasileira vive em municípios costeiros, o que equivale a aproximadamente 50 milhões de habitantes (IBGE, 2010).

Essas regiões são expostas a uma dinâmica de interação terra-mar-ar, e formam um complexo sistema extremamente ameaçado pelas alterações antrópicas e pelos potenciais impactos das mudanças climáticas (PBMC, 2016). Apesar de indicadores sinalizarem que as mudanças climáticas já provocaram alterações na frequência e magnitude das condições climáticas e meteorológicas em algumas localidades, até o momento ainda é complexo atribuir eventos individuais as mudanças climáticas.

Um dos mais importantes problemas aplicados na geologia costeira hoje é determinar a resposta física do litoral a elevação do nível do mar. A previsão de taxas de recuo da linha de costa e de perda de sedimentos é fundamental para o planejamento de futuras estratégias de gerenciamento da zona costeira e para a avaliação dos impactos biológicos devidos às mudanças ou destruição de habitat (THIELER & HAMMAR, 2000).

O nível do mar subiu 0,17 metros durante o Século XX, estimativas recentes da futura elevação do nível médio do mar (em inglês, *Sea Level Rise* ou SLR) com base na produção do modelo climático sugerem que a elevação no Nível Médio do Mar (NMM) chegue a 0,82 metros até o final do século, apesar de existirem algumas incertezas nesta estimativa (IPCC, 2021).

A elevação no nível médio do mar pode ocasionar um aumento da exposição ao risco da população e de construções, a inundações e erosão em zonas costeiras. Infelizmente, a grandeza e periodicidade desse evento ainda não são totalmente precisas em virtude da qualidade dos registros e ausência de padrão nas medições, o que prejudica o diagnóstico da erosão costeira e do aumento do nível do mar no território nacional (PBMC, 2016).

Embora uma abordagem preditiva quantitativa viável não esteja disponível, a

vulnerabilidade relativa de diferentes ambientes costeiros a elevação do nível do mar pode ser quantificada em escala regional a nacional, usando informações sobre geomorfologia costeira, taxa de elevação do nível do mar, evolução da linha costeira passada e outros fatores (THIELER, 2000).

Assim, além de fenômenos extremos e de curta duração, existe nessas localidades litorâneas uma dinâmica natural, frequentemente intensificada através de ações antrópicas. Em decorrência dessa dinâmica há em diversas zonas costeiras, uma situação generalizada de avanço e de recuo da linha de costa, com valores alarmantes a médio e a longo prazo (COELHO *et al.*, 2006).

A subida do nível do mar também ocasiona o aumento da velocidade dos ventos. Com ventos mais fortes, a força das ondas eleva exponencialmente. E, no Brasil, o efeito dessa aceleração dos ventos deverá ser vivenciado sobretudo no Nordeste, onde, com a aceleração dos ventos, as ondas ficam maiores e o aumento de sua energia é exponencial, um efeito muito mais nocivo do que a elevação dos mares, que tem se apresentado mais lenta. Eventos esses que já são possíveis de observar em municípios litorâneos do estado do Ceará, como em Icapuí, Cascavel, Caucaia e Acaraú.

É nesse contexto que as imagens de satélite, submetidas às técnicas de PDI (Processamento Digital de Imagens), integradas em ambiente SIG e validadas por dados de campo, permitem avaliar as alterações ocorridas na paisagem, correlacionando tendências, variabilidades, potencialidades e fragilidades no ambiente, permitindo compreender as mudanças nas condições ambientais, além de demonstrar as dinâmicas de uma região, auxiliando no suporte ao controle de riscos ambientais e desastres naturais (SOARES FILHO, 1998; SNOUSSI *et al.*, 2008).

Neste contexto, a pesquisa buscou determinar o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) do município de São Gonçalo do Amarante, localizado no litoral do estado do Ceará, com o intuito de evidenciar as áreas que apresentam maior vulnerabilidade, tendo como base características ecológicas e geofísicas, visando um melhoramento no monitoramento costeiro e ambiental, no intuito de suprir lacunas sobretudo com relação ao gerenciamento costeiro.

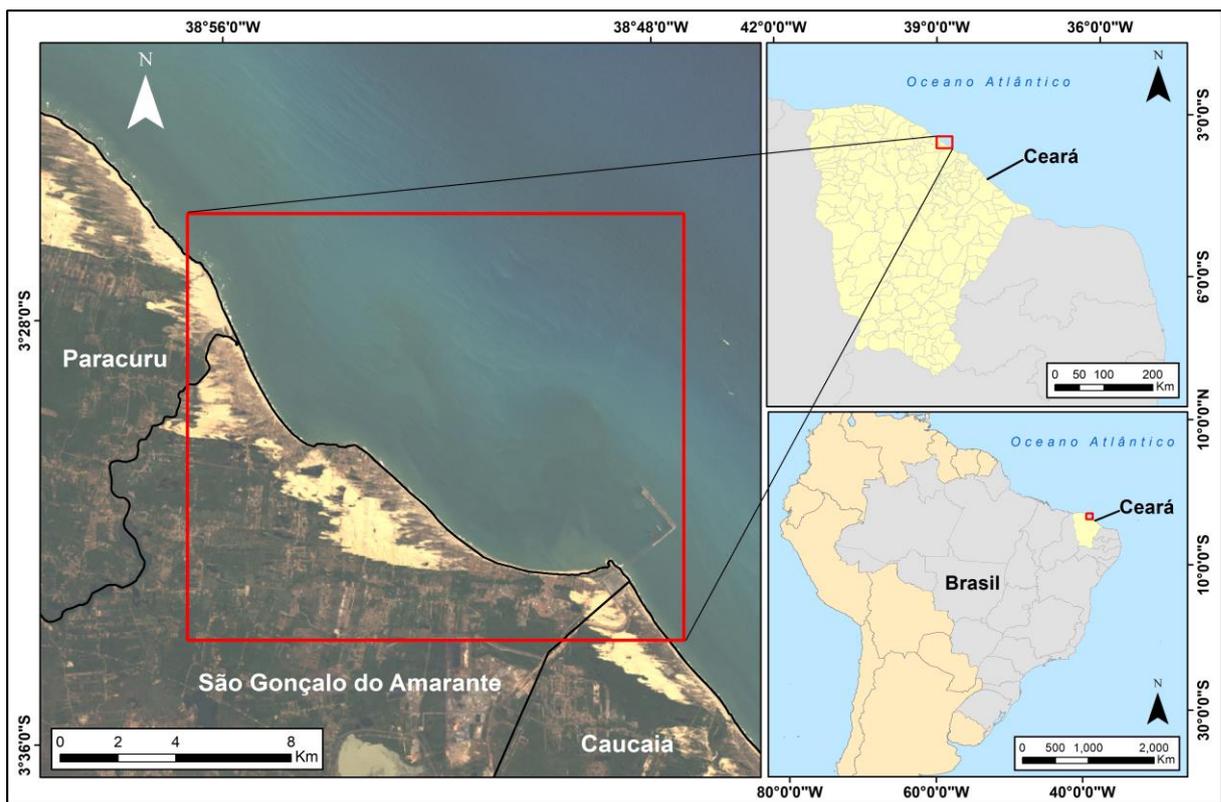
4.2 Área de estudo

A área de estudo está inserida no município de São Gonçalo do Amarante (Figura 17), na porção Norte do estado do Ceará, inserida na mesorregião Metropolitana de Fortaleza

e na microrregião de Fortaleza (IPECE, 2014). O foco dessa pesquisa compreende apenas os distritos situados na porção litorânea do município: Pecém (praia da Colônia) e Taíba que apresenta uma extensão de 18,5 km de faixa praias com larguras variadas e com declives muito suave para o mar.

Com base na geologia, essa porção litorânea do município é constituída por Depósitos Eólicos Costeiros Holocênicos que são os depósitos eólicos nas proximidades ao longo da costa (dunas, praias e pós-praias), constituídos por areia quartzosa fina a média, bem arredondada e selecionada, laminação plano-paralela ou estratificação cruzada (MONTALVÃO, 1975), além de unidades do embasamento cristalino (quartzitos e gnaiss) e da formação Barreiras (sedimentos areno-argilosos) repousando sobre o Embasamento Cristalino.

Figura 17. Mapa de localização do município de São Gonçalo do Amarante, CE



A Ponta do Pecém, que configura uma topografia mais elevada, caracterizado pelo acidente geográfico (promontório), é constituída por rochas cristalinas do Grupo Ceará, recobertos por sedimentos do Grupo Barreiras e dunas móveis. Local esse, onde está localizado o Complexo Industrial e Portuário do Pecém (CIPP). A Ponta da Taíba é constituída de rochas menos resistentes, de idade tércio-quadernária, e já se encontra em

processo de retrogradação (LIMA, 2000).

A geomorfologia dessa porção litorânea está inserida na unidade conhecida como Litoral Setentrional Nordeste, onde a planície litorânea apresenta compartimentação e feições distintas. Sendo o foco desse trabalho apenas o domínio, denominado de praia e localizado entre a linha média de baixamar e a linha média de preamar (MONTEIRO, 2001) e os tabuleiros costeiros que se dispõem de forma paralela à linha de costa e à retaguarda dos sedimentos eólicos, marinhos e fluviomarinhos que constituem a planície litorânea (FUNCEME, 2009).

O clima da região é caracterizado como um macroclima da faixa costeira de clima tropical chuvoso, quente e úmido, com chuvas de verão e outono, sendo com base na classificação de Koppen (1928), do tipo Aw'. Apresenta média pluviométrica anual de 989 mm.

Com relação aos ventos, as direções predominantes são a leste (E) e leste-sudeste (ESSE) responsáveis pela formação das ondas "sea", próximo a costa, que chegam com grande ângulo, possibilita um forte transporte, de leste a oeste, na Ponta do Pecém. E ventos na direção sudeste (SE), sendo responsáveis pelo transporte de sedimentos ao longo das praias, com influência direta na morfologia praial (FUNCEME, 2014). Outro tipo de onda presente nessa área de estudo, é a do tipo *swell*, que se originam no hemisfério Norte e chegam ao local do Porto do Pecém com direção N-NE.

4.3 Metodologia

Os objetivos traçados para a presente pesquisa exigiram o desenvolvimento de etapas no sentido de facilitar a obtenção de informações que subsidiassem a compreensão da área objeto de análise. Para tanto, os procedimentos metodológicos foram baseados nas seguintes etapas:

Na primeira etapa foram realizadas análises meticolosas e amplas das publicações, a fim de desenvolver um banco de dados para uma avaliação em escala regional da vulnerabilidade costeira. Dados relevantes foram coletados de agências locais, estaduais e federais, bem como de instituições acadêmicas.

A segunda etapa consistiu na aplicação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) que analisa seis variáveis que foram relacionadas de forma quantificável à vulnerabilidade relativa da costa às mudanças físicas devido à elevação do nível do mar (GORNITZ, 1990; GORNITZ *et al.*, 1994; THIELER e HAMMER-KLOSE, 2000).

As variáveis empregadas no IVC são classificadas em dois grupos: Variáveis ecológicas e variáveis geofísicas (Quadro 1). As variáveis ecológicas consistem em: geomorfologia; taxa de mudança histórica nas margens/linhas de praia e declividade costeira. Estas variáveis representam a erosão de longo prazo e a tendência de acreção, além de sua susceptibilidade à inundação, respectivamente. As variáveis relativas aos processos geofísicos incluem: a amplitude média das marés, a altura significativa de ondas, o Nível Médio do Mar (NMM), fatores esses que contribuem para os riscos de inundação de uma determinada seção da linha de costa.

O banco de dados inclui informações quantitativas e qualitativas. Assim, as variáveis numéricas recebem uma classificação de risco com base nos intervalos de valores dos dados, enquanto a variável de geomorfologia, não numérica, é classificada numericamente com base na estabilidade quanto à morfogênese e à pedogênese, conforme classificado por Tricart (1977). As variáveis de risco são classificadas em uma escala linear de 1 a 5, onde o valor 1 representa o menor risco, enquanto o valor 5 representa o maior risco. (Quadro 9).

Quadro 9. *Ranking* da Vulnerabilidade Costeira. Fonte: Thieler e Hammer-Klose (2000)

VARIÁVEL	RANKING DA VULNERABILIDADE COSTEIRA				
	MUITO BAIXA	BAIXA	MODERADA	ALTA	MUITO ALTA
	1	2	3	4	5
Geomorfologia	-	-	Tabuleiros Costeiros	-	Praia
Declividade costeira (%)	> 1,9	1,3 – 1,9	0,9 – 1,3	0,6 – 0,9	< 0,6
NMM (mm/ano)	< -1,21	-1,21 – 0,21	0,1 – 1,24	1,24 – 1,36	> 1,36
Taxa de variação da linha de costa (m/ano)	< 2,0 Acreção	1,0 – 2,0	-1,0 – +1,0 Equilíbrio	-1,0 – -2,0	< -2,0 Erosão
Amplitude média das marés (m)	> 6,0	4,1 – 6,0	2,0 – 4,0	1,0 – 1,9	< 1,0
Altura significativa de onda (m)	< 1,1	1,1 – 2,0	2,0 – 2,25	2,25 – 2,60	> 2,60

Uma vez que cada seção da costa recebe um valor de risco com base em cada variável de dados específica, o índice de vulnerabilidade costeira é calculado como a raiz quadrada da média geométrica ou a raiz quadrada do produto das variáveis classificadas

dividido pelo número total de variáveis (GORNITZ *et al.*, 1990):

$$IVC = \frac{\sqrt{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f}}{6}$$

Onde,

a = Geomorfologia;

b = Declividade costeira (%);

c = NMM (mm/ano)

d = Taxa de variação da costa (m/ano);

e = Amplitude média das marés (m);

f = Altura média significativa de onda (m)

Este método produz dados numéricos que não podem ser equiparados diretamente com os efeitos físicos específicos em locais distintos. Contudo, destaca-se na análise de áreas onde os diversos efeitos da elevação do nível do mar são um fator preocupante, por questões socioeconômico-ambientais, como é o caso de áreas estuarinas e costeiras e de ampla ocupação.

E por fim, a terceira etapa ocorreu com o intuito de integrar os dados de vulnerabilidades/riscos e a elevação do nível do mar, a fim de compreender evolução da paisagem, tendo em vista, principalmente, a ação de planejamento e zoneamento, buscando analisar o meio ambiente em sua forma mais ampla.

4.3.1 Geomorfologia

A variável geomorfologia expressa a erodibilidade relativa dos diferentes tipos de relevo. Esses dados foram derivados do Levantamento de Geodiversidade do Estado do Ceará (BRANDÃO e FREITA, 2014), onde foi possível identificar as classes geomorfológicas, Tabuleiros Costeiros e praia, aos quais foram atribuídos valores numéricos fundamentados no conceito de estabilidade, da análise ecodinâmica de Tricart (1977), que estabeleceu um modelo com classes de vulnerabilidade à erosão, distribuídas entre as situações de predomínio dos processos de pedogênese (aos quais se atribuem valores próximos de 1,0), passando por situações intermediárias (às quais se atribuem valores em torno de 3,0) e situações de predomínio erosivos modificadores da forma do relevo e morfogênese (as quais se atribuem valores próximos de 5,0).

4.3.2 Declividade costeira

A declividade costeira (%) foi calculada com base em levantamentos de elevações topográficas e batimétricas. Esses valores também são fixados com base na fisiografia, detalhes de contorno de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e DEM (*Digital Elevation Model*). O declive regional permite uma avaliação não apenas do risco relativo de inundação, mas também do potencial de rapidez de recuo da linha de costa, uma vez que as regiões costeiras de baixa declividade deveriam recuar mais rapidamente do que as regiões mais íngremes (PILKEY e DAVIS, 1987).

Em valores de inclinação menores que 0,6% tem-se vulnerabilidade muito alta e em valores de inclinação maiores que 1,9 é atribuída muito baixa vulnerabilidade. Valores entre 1,3 e 1,9 são classificados como Baixa, valores compreendidos entre 0,9 e 1,3 são tidos como Moderada vulnerabilidade, enquanto que valores entre 0,6 e 0,9 são classificados como Alta vulnerabilidade.

4.3.3 Nível Médio do Mar

A variável NMM (mm/ano) é derivada do aumento (ou diminuição) da elevação média anual da água ao longo do tempo. Com base no Relatório IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) AR6 WGI “Mudanças Climáticas 2021: a Base das Ciências Físicas” (IPCC, 2021), onde foram gerados quatro cenários climáticos para elevação do nível do mar, denominados de *Representative Concentration Pathways* (RCP), baseado nas concentrações de gases do efeito estufa, na emissão de gases, aumento de temperatura e aquecimento global. Os cenários para 2100 são de elevação do nível do mar de 0,26 a 0,55 m para RCP2.6; 0,32 a 0,63 m para RCP4.5; 0,33 a 0,63 m para RCP6.0 e 0,45 a 0,82 m para RCP8.5. Sendo o cenário RCP2.6 o mais otimista, o cenário RCP8.5 o mais pessimista e os cenários RCP4.5 e RCP6.0, intermediários.

Com base na metodologia de Thieler e Hammer-Klose (2000), todos os valores de variação do nível médio do mar maiores que 1,36mm/ano são considerados de alta vulnerabilidade. Desse modo, como todos os cenários propostos pelo relatório do IPCC apresentam variações superiores a 1,36mm/ano, selecionou-se o cenário mais otimista, RCP2.6, para calcular o IVC.

4.3.4 Taxa de variação das linhas de costa

A taxa de mudança nas linhas de costa, ou seja, as taxas de erosão e acreção da linha costeira (m/ano) é baseada no intervalo de mudança nos valores da largura da praia. Esses valores foram determinados através de análise multitemporal a partir de imagens de satélite da série Landsat em um intervalo de 36 anos, entre os anos de 1984 e 2020 (Quadro 10), por meio do método de quantificação da linha de costa DSAS (*Digital Shoreline Analysis System* 5.0), a partir da utilização dessa extensão disponível no ArcGis® 10.8.1 (ESRI, 2019). Empregou-se o método *Linear Regression Rate* (LRR) para analisar o comportamento das linhas de costa (LC), obtendo-se uma matriz numérica que determinou o comportamento morfológico das LCs em relação a linha de base, considerando as situações de erosão, acreção e equilíbrio na área em estudo.

As imagens da série Landsat foram selecionadas devido as suas adequadas configurações espectrais e resolução espacial que possibilitou a distinção das linhas de costa para esse longo intervalo, combinadas com a facilidade de acesso aos dados. O critério de escolha dessas datas deve-se a qualidade referente a ausência de nuvens nas imagens nesses períodos.

Quadro 10. Imagens utilizadas para delimitação da linha de costa

Data	Satélite/Sensor	Resolução espacial
15/06/1984	Landsat 5/TM	30 m
15/06/1985	Landsat 5/TM	30 m
19/06/1991	Landsat 5/TM	30 m
30/10/1993	Landsat 5/TM	30 m
14/08/2000	Landsat 5/OLI	30 m
01/08/2001	Landsat 5/OLI	30 m
27/07/2005	Landsat 5/OLI	30 m
05/10/2007	Landsat 5/OLI	30 m
18/06/2014	Landsat 8/OLI	30 m
26/08/2016	Landsat 8/OLI	30 m
13/08/2017	Landsat 8/OLI	30 m
13/06/2018	Landsat 8/OLI	30 m
22/10/2019	Landsat 8/OLI	30 m
06/09/2020	Landsat 8/OLI	30 m

Linhas de costa com taxas maiores que + 2,0m/ano representam acreção, sendo classificado como uma classe de Muito Baixa Vulnerabilidade, valores entre -1,0 e +1,0m/ano correspondem a estabilidade das taxas de erosão/acreção caracterizadas como Moderada

vulnerabilidade e valores menores do que -2,0m/ano equivalem à erosão, pertencendo a classe de Muito Alta vulnerabilidade. Os valores compreendidos entre 1,0 e 2,0m/ano configuram áreas de Baixa vulnerabilidade costeira e valores entre -1,0 e -2,0m/ano traduzem localidades Alta vulnerabilidade. Ou seja, as taxas de erosão ou acreção cada vez mais altas são classificadas como risco correspondentemente maior ou menor.

4.3.5 Amplitude média das marés

A amplitude média das marés (m) corresponde a diferença vertical entre o nível atingido pela maior das marés cheias e a menor das marés vazias. Esses valores foram baseados em dados disponíveis do marégrafo da área de estudo que está localizado na estação 30337 (Marinha Brasileira) no Porto do Pecém, que tem medidas disponíveis de dados sobre as variações do nível do mar, incluídas as elevações astronômicas e meteorológicas, na qual foram disponibilizados pela Marinha do Brasil os dados do intervalo de 1988 a 1998 (DHN, 2021).

As marés cujas amplitudes correspondem aos valores mais altos e mais baixos em relação ao nível médio do mar local, que se produzem, respectivamente, durante a lua cheia e a lua nova, conhecidas como marés de sizígia (SUGUIO, 1992). No Pecém, a amplitude máxima de maré é de 3 m e mínima de 0,4 m, mas durante a maré alta pode chegar a 3,1 m com mínima de 0,1 m, nas maiores marés de sizígia.

O vento, principalmente, bem como outros fatores meteorológicos, pode ocasionar a elevação ou o abaixamento do nível do mar e o atraso ou o adiantamento dos instantes de ocorrência das preamares ou baixa-mares, interferindo na faixa intertidal da praia do Pecém (DHN, 2021).

Dessa maneira, tem-se que os ambientes de micromarés são aqueles caracterizados por uma amplitude de maré menor que 2m, enquanto os ambientes mesomarés lidam com amplitudes de maré entre 2 m e 4 m. Ambientes de macro-marés são aquelas áreas onde a amplitude da maré é superior a 4 m, sendo raros de ocorrer nessa localidade (SHORT, 1999).

Considera-se que as micromarés têm maior vulnerabilidade quando comparadas às macromarés, principalmente porque, em um ambiente de micro-marés, o nível do mar está sempre próximo à maré alta. Portanto, durante um evento de tempestade, as inundações costeiras acontecem mais facilmente em uma micromaré do que em uma macromaré (THIELER & HAMMAR, 2000; KOROGLU *et al.*, 2019; RANGEL-BUITRAGO *et al.*,

2020). Tal abordagem liga grandes faixas de maré (por exemplo, maiores do que 6 m) a um nível de muito baixa vulnerabilidade.

Assim, a amplitude média de marés foi classificada de vulnerabilidade costeira Muita Baixa para valores inferiores a 6,0 m, para valores compreendidos entre 4,1 e 6,0 m classifica-se como Baixa, valores entre 2,0 e 4,0m corresponde a vulnerabilidade Moderada, já amplitude média entre 1,0 e 1,9 m apresentam classificação Alta e para valores que estão menores que 1,0 m a classe atribuída é a Muito Alta.

4.3.6 Altura significativa das ondas

A altura significativa (H_s) das ondas (m) é usada aqui como um indicador da energia das ondas, que impulsiona os sedimentos costeiros, onde juntamente com o regime de marés e influência dos ventos, atua na formação de um ambiente altamente dinâmico (ALMEIDA *et al*, 2015). A energia das ondas aumenta conforme o quadrado da altura das ondas, assim, a capacidade de mobilizar e transportar materiais de praia é uma função da altura das ondas.

Os dados dessa localidade foram coletados em Costa (2019) do período de dezembro de 2016 a novembro de 2017 através do levantamento de dados observados da boia do PNBOIA (Programa Nacional de Boias), projeto esse mantido pela Marinha do Brasil em conjunto com outras instituições de pesquisa.

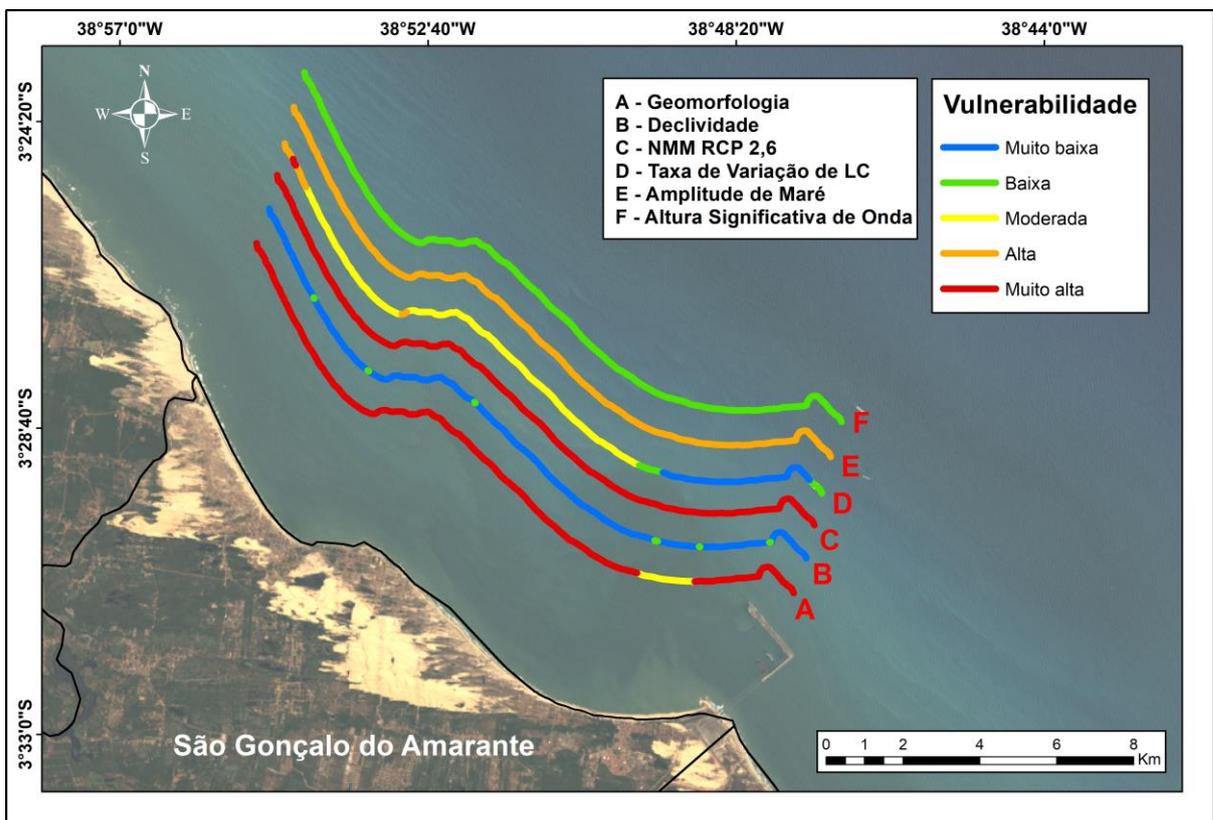
Os dados históricos da boia localizada em Fortaleza (Ceará), boia mais próxima da área de estudo encontra-se em manutenção, havendo a possibilidade apenas de coleta de dados para o período acima mencionado. Desse modo, com base nesses dados foi possível perceber que a média de H_s foi de 1,66 m, sendo que no período de dezembro a maio a média foi de 1,57 m, e no intervalo de junho a novembro a média foi de 1,75 m, com maiores médias mensais nos meses de setembro e outubro, registrando H_s de 2,1 m e 1,9 m, respectivamente (COSTA, 2019).

Assim, alturas significativas das ondas inferiores a 1,1 m são classificadas como vulnerabilidade costeira Muito Baixa, valores entre 1,1 e 2,0 m se classificam como Baixa. A classe Moderada abrange o intervalo de 2,0 a 2,25, enquanto valores entre 2,25 e 2,60 pertencem a classe denominada de Alta e valores superiores a 2,60 m correspondem à classe de vulnerabilidade costeira Muito Alta

4.4 Resultados e Discussões

Após atribuir o valor de risco para cada variável constituinte do litoral do município de São Gonçalo do Amarante (Figura 18) foi calculado o IVC, no qual os valores foram classificados em cinco partes iguais com base no princípio dos percentis de 20, 40, 60 e 80. Onde os valores de IVC variam de 8,12 a 22,36 (Quadro 11) compostas pelas seguintes classes: Muita Baixa, Baixa, Moderada, Alta e Muito Alta.

Figura 18. Classes de Índice de Vulnerabilidade Costeira



Quadro 11. Classes de Índice de Vulnerabilidade Costeira

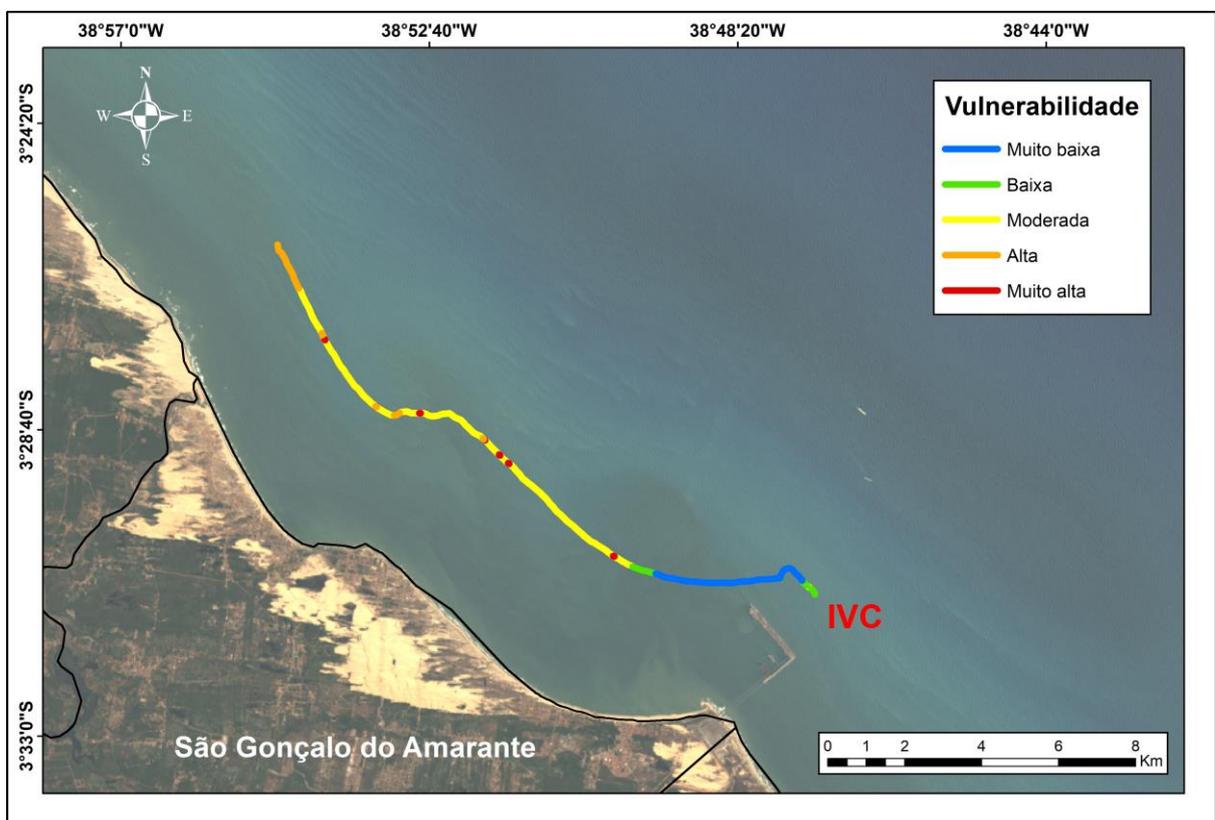
Classes	Intervalos	km
Muita Baixa	< 8,12	4,06
Baixa	8,12 a 9,94	1,02
Moderada	9,94 a 11,49	11,74
Alta	11,48 a 17,31	1,50
Muito Alta	17,31 a 22,36	0,26

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) fornece informações sobre o potencial relativo da mudança costeira frente a elevação do nível do mar. Os mapas e dados apresentados poderão ser visualizados como base para o desenvolvimento de um inventário mais completo de variáveis que influenciam a vulnerabilidade costeira, ao qual outros elementos poderão ser adicionados à medida que se tornam disponíveis.

Esta pesquisa obteve os índices de vulnerabilidades do município de São Gonçalo do Amarante e buscou relacioná-los aos processos de evolução de linha de costa que configuram o espaço geográfico, com o intuito de evidenciar as áreas que apresentarem maiores vulnerabilidades, tendo como base as características e condições morfológicas.

Na Figura 19 é possível observar as classes de vulnerabilidade atribuídas a regiões do município estudado frente a elevação do nível do mar em uma escala de 1:100.000. A área de estudo apresenta uma extensão de 18,58 km de faixa praial, das quais 63,13% da linha costeira mapeada é classificada com IVC moderado, 21,85% Muito Baixa, 8,07% com vulnerabilidade Alta, 5,49% classificada como Baixa e apenas 1,40% da faixa litorânea classificada com vulnerabilidade costeira Muito Alta.

Figura 19. Índice de Vulnerabilidade costeira do município de São Gonçalo do Amarante



O IVC caracterizado como Muito Baixo apresenta uma extensão de 4,02km em que combina as variáveis de praia e região de tabuleiro costeiro da área de estudo, regiões essas de baixa declividade, com variações da linha de costa positiva e com uma altura significativa de onda entre 1,1 e 2,0 m, associadas a uma variação do NMM elevada, classificada com uma vulnerabilidade costeira Muito Alta e com amplitude média de maré de Alta vulnerabilidade.

A classe caracterizada como Baixa (1,02km de extensão) abrange duas porções do município, como é possível observar na Figura 3, onde as taxas de variações da linha de costa variam entre 1,0 e 2,0m/ano, ou seja, há uma acreção da linha de costa, associadas a essa região de praia com muito baixa declividade tem-se uma altura significativa de onda entre 1,1 e 2,0 m. E assim como na classe Muito baixa, essa porção também apresenta uma variação do NMM elevada (superior a 1,36mm/ano) e um amplitude média de maré de alta vulnerabilidade.

A classe de vulnerabilidade costeira frente a elevação do nível do mar de maior extensão corresponde a classe Moderada, que difere da classe IVC Baixa, pois combina a região de praia, regiões essa de baixa declividade, que possuem um alto potencial de rapidez de recuo da linha de costa, com regiões de estabilidade das taxas de erosão/acreção, e com amplitude de maré de alta vulnerabilidade, bem como uma região de alta variação da linha de costa, mas com uma altura significativa inferior a 1,1 m.

A região litorânea do município que apresenta um IVC Alto é consequência de uma baixa declividade relacionada a uma taxa de variação da linha de costa Alta, com predomínio de erosão e uma amplitude de maré alta, além de uma região com uma variação do nível médio do mar Muito Alta, assim como toda a porção litorânea do município.

A classe de vulnerabilidade costeira frente a elevação do nível do mar de menor extensão refere-se a classe Muito Alta, localizada na porção mais a oeste do município, limite com o município de Paracuru, onde está localizada a foz do Rio Anil. A combinação dessa região de praia com valores de declividade moderada, com uma taxa de variação da linha de costa muito alta, que varia de acordo com um grande número de fatores, tanto de origem natural (balanço de sedimentos, variações do nível relativo do mar, dispersão de sedimentos, entre outro.), como de origem antrópica (de engenharia, dragagens, entre outros). Como resultado da interação entre estes vários fatores, essa porção do município recua em direção ao continente, ou seja, à predomínio de erosão.

Associada a essa situação, tem-se uma amplitude de maré alta e uma variação do nível médio do mar maior que 1,36mm/ano, ou seja, regiões de alta vulnerabilidade tendo como resultado um cenário de maior susceptibilidade à futura elevação do nível do mar, que

se apresenta com baixa resiliência e pouca capacidade de recuperação natural dos sedimentos erodidos.

Percebe-se que dentre as variáveis analisadas no Índice de Vulnerabilidade Costeira, a variável NMM, a altura significativa da onda e a amplitude de maré permanecem constantes ao longo de toda área de estudo, pois a tendência dessas variáveis é mudar em uma escala espacial entorno de 100km, enquanto que as variáveis relacionadas à geomorfologia e à declividade costeira variam em uma escala espacial de aproximadamente 10km. Os dados de erosão e acreção costeira também variam em pequenas distâncias.

Essas variáveis de pequena escala são aquelas que geralmente induzem uma maior variação nos índices de vulnerabilidade, tornando-se assim as variáveis mais importantes para estabelecer o Índice de Vulnerabilidade Costeira frente à elevação do nível do mar.

Conforme Lopes *et al.* (2021), com base nos dados de erosão e acreção para o intervalo de 1984 a 2020, o município de São Gonçalo do Amarante apresenta maiores erosões associados ao Rio Anil, região essa que apresentou maior vulnerabilidade costeira, devido a sua própria dinâmica fluvial combinada a fatores externos, como pluviosidade, transporte de sedimentos, entre outros. Fatores esses que, combinados a elevação do NMM, desencadeiam uma região de vulnerabilidade Muito Alta.

Nas regiões mais a leste do município, no distrito do Pecém, há um predomínio nos processos deposicionais de leste a oeste que ocasionam um maior aporte sedimentar na região a sotamar, na região do promontório. Essas regiões combinadas com as demais variáveis correspondem as áreas que foram classificadas com IVC Muito baixo e Baixo.

Contudo, para se determinar a presença de um risco a um determinado evento, é necessário se estimar a perda a algum bem material ou imaterial. Mas, em se tratando da elevação do nível do mar, não se prevê perdas humanas, uma vez que é um evento já previsto, havendo tempo para adaptação da sociedade, bem como obras de contenção e deslocamento para locais menos vulneráveis, a fim de se evitar danos ambientais e socioeconômicos (MMA, 2008).

4.5 Conclusões

Por meio desse estudo foi possível determinar as áreas costeiras vulneráveis ao aumento do nível do mar, onde foi constatado que, apesar da porção costeira do município de São Gonçalo do Amarante ter sofrido influências antrópicas, como a implantação do Terminal Portuário do Pecém, que afetaram diretamente a ação das ondas e correntes e

consequentemente a dinâmica sedimentar, atualmente há um predomínio da deposição na maior parte dessa costa. Fator esse que agregado as variáveis de geomorfologia, declividade costeira, NMM, amplitude média das marés e altura média significativa de onda determinaram que a porção mais vulnerável a elevação do nível do mar corresponde a foz do Rio Anil, onde não apresenta um comportamento linear, variando a largura da faixa de praia ao longo do ano, favorecendo a ação de eventos externos.

As porções de menor valor de IVC estão relacionados as localidades em que ocorrem maiores valores deposicionais ao longo do intervalo de 36 anos analisados. E as áreas classificadas como moderadas, correspondentes as maiores extensões da área de estudo é caracterizada com um estágio de equilíbrio entre a erosão e a deposição.

Esse índice não apenas contribui significativamente para os métodos e métricas usados na ciência da vulnerabilidade, mas também indica possíveis mudanças na linha costeira devido ao aumento do Nível Médio do Mar. Esse índice pode servir como base para um inventário mais completo, incluindo variáveis que possam influenciar a vulnerabilidade dessas localidades, tais como as variáveis socioeconômicas. Também fornece informações importantes para os formuladores de políticas públicas e para o planejamento e ordenamento territorial.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, ao Programa de Pós-graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará e ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GeoCE).

Referências

ALMEIDA, L. R. D.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. **Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira.** Vol.15, n.2, p.135-151, 2015.

BRASIL. Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/secirm>. Acesso em: 12 dez. 2020.

COELHO, C., SILVA, R., VELOSO-GOMES, F., TAVEIRA PINTO, F. A Vulnerability analysis approach for the Portuguese West Coast. **Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation**, 251-262, 2006.

COSTA, C. E. B. **Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados**. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Tábua de maré**. 2021. Disponível em: <http://www.dhn.mar.mil.br>. Acesso em: 12 dez. 2020.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **Software ArcGis Desktop**, License Type Arcinfo, version 10.8.1, 2019.

FUNCEME - Fundação Cearense de Meteorologia E Recursos Hídricos. **A zona costeira do estado do Ceará: compartimentação geoambiental e antropismo**. 2009

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia E Recursos Hídricos. **Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre o Nordeste**. Secretaria de Recursos Hídricos, 2014. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/551-sistemas-atmosfericos-atuantes-sobre-o-nordeste>. Acesso em: 12 dez. 2020.

GORNITZ, V. Vulnerability of the east coast, USA to future sea level rise. **Journal of Coastal Research**, 9, 201–237, 1990.

GORNITZ, V. M.; DANIELS, R. C.; WHITE, T. W.; BIRDWELL, K. R. The development of a coastal vulnerability assessment database, vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. **Journal of Coastal Research**, 12, 327-338, 1994.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA)**. 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, e P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, Estados Unidos da América, 582 págs.

KLEIN, R. J. T. **Coastal Vulnerability, Resilience and Adaptation to climate: na interdisciplinar perspective**. Cumulative Dissertation, 2002. Disponível em: <https://www.pik.potsdam.de/~richardk/part1.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021

KOPPEN, W., GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928, Wall-map 150cmx200cm.

KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J.A.; DASTGHEIB, A. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. **Ocean Coast. Manag**, 178, 104799 2019.

LIMA, L. C. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. FUNECE: Fortaleza, 2000.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Brasília: MMA, 2008.

MONTALVÃO, R. M. G. Geologia. In: Brasil. **Projeto RADAM**. Folha NA.20 Boa Vista e parte das Folhas NA.21 Tumucumaque, NB.20 Roraima e NB.21 - RJ17: Série Levantamento de Recursos Naturais, volume 8. Projeto RADAM, 1975.

MONTEIRO, Norah Maria Veras. **Os efeitos da política de desenvolvimento no litoral cearense e as estratégias para a sustentabilidade: o caso do Pecém – São Gonçalo do Amarante**. 228 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Modernização Pública) – Universidade Internacional de Lisboa/ Universidade Estadual Vale do Acaraú, 2001.

PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6, 2016.

PILKEY, O. H.; DAVIS, T. W. An analysis of coastal recession models: North Carolina coast. In: D. Nummedal, O.H. Pilkey and J.D. Howard (Editors), **Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution**. SEPM (Society for Sedimentary Geology), 41, 59-68, 1987.

RANGEL-BUITRAGO, N.; NEAL, W.J.; DE JONGE, V.N. Risk assessment as tool for coastal erosion management. **Ocean Coast. Manag.**, 186, 105099, 2020.

SNOUSSI, M; OUCHANI T.; NIAZI, S. 2008. Vulnerability assessment of the impact of sea level rise and flooding on the Moroccan coast: the case of the Mediterranean eastern zone. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, 77, 206–13, 2008.

SOARES FILHO, Britaldo Silveira. 1998. **Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 229 p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.

SHORT, A.D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. Number 551.468. John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1991.

SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Marinha: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol**. São Paulo: T A Queiroz, Biblioteca de Ciências Naturais. vol. 15, 1992.

THIELER, E.R.; HAMMAR-KLOSE, E.S. **National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise**; Preliminary Results for the US Pacific Coast; Technical Report; U.S. Geological Survey: Woods Hole, MA, USA, 2000.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN, 91p, 1977.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do estudo das formas de uso e da ocupação dos recursos no município de São Gonçalo do Amarante, foi possível caracterizar e entender a dinâmica geoambiental da localidade, identificando as áreas de riscos e classificando-se assim as vulnerabilidades resultantes de determinadas atividades.

É visível a relação das áreas de maior vulnerabilidade com essas áreas de intensa dinâmicas, que são as áreas costeiras, traduzindo numa constante evolução destes locais, que sofrem com as alterações ambientais devido principalmente a especulação imobiliária, que vem promovendo uma franca expansão sobre os campos dunares, desrespeitando dispositivos legais que regem seu uso.

Dessa maneira, foi possível através da quantificação e qualificação das alterações costeiras (erosão e deposição) observar a evolução que o município de São Gonçalo do Amarante sofreu ao longo dos últimos 36 anos (1984-2020) e entender a dinâmica costeira dessa localidade, bem como a influência direta que as atividades antrópicas relacionadas à construção do Complexo Industrial e Portuário do Pecém tiveram nos processos erosivos e deposicionais na região.

Duas porções do litoral do município merecem destaque nesse estudo de evolução costeira, o distrito do Pecém e o distrito da Taíba que apresentaram comportamentos distintos durante o período que sucede a construção do Complexo Industrial e Portuário do Pecém e após a conclusão do empreendimento. No distrito do Pecém, durante a implantação do Terminal Portuário Provisório (TEP), processos erosivos foram enfáticos e após a conclusão do porto com a remoção do TEP, teve-se a retomada dos processos deposicionais na localidade. Já na Taíba, no intervalo de 36 anos avaliados, teve-se um predomínio da redução do transporte de sedimentos após promontório e conseqüentemente há um maior aporte sedimentar, e na porção a sotamar da estrutura tem-se a presença de erosão.

Diante desse cenário de evolução costeira, foi feita a integração de diferentes variáveis ecológicas e geofísicas, sendo possível efetuar o estudo do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) frente a elevação do nível do mar, o qual expõe diferentes níveis de vulnerabilidade da porção costeira do município de São Gonçalo do Amarante em escala local. Neste contexto, foi possível observar que as variáveis geomorfologia, declividade e variação da linha de costa são as mais importantes no presente estudo.

Duas classes de IVC merecem destaque: a de maior extensão, a classe Moderada (11,74km) pois combina a região de praia, regiões essa de baixa declividade, que possuem um

alto potencial de rapidez de recuo da linha de costa, com regiões de estabilidade das taxas de erosão/acrecção, e com amplitude de maré de alta vulnerabilidade, bem como uma região de alta variação da linha de costa, mas com uma altura significativa inferior a 1,1 m. É a classe de vulnerabilidade costeira Muito Alta que apresenta apenas 0,26km de extensão, sendo a menor classe, localizada na porção mais a oeste do município, limite com o município de Paracuru, onde está localizada a foz do Rio Anil. A combinação dessa região de praia com valores de declividade moderada, com uma taxa de variação da linha de costa muito alta cria esse ambiente de Muito alta vulnerabilidade.

Como recomendações para estudos futuros, sugere-se a inserção de variáveis socioeconômicas, uma vez que é necessário entender as regiões costeiras na sua forma mais ampla, englobando não somente variáveis físicas, mas, também o processo de desenvolvimento urbano e industrial, para determinar indicadores de vulnerabilidade costeira frente a elevação do nível do mar, que representem o mais fiel possível a realidade local, com resultados relevantes que auxiliem a gestão costeira local.

Assim, é possível perceber que o uso do geoprocessamento para o estudo integrado das feições naturais e ambientais é capaz de produzir informações de diferentes níveis de vulnerabilidade, possibilitando a inclusão rápida de dados complementares ou mesmo a reavaliação das informações temáticas e seus critérios a medida em que fenômenos dinâmicos venham a alterar. Além disso, os processos costeiros são muito dinâmicos e complexos, havendo a necessidade de um método de avaliação de vulnerabilidade rápido e eficaz.

As pesquisas que incluem essas abordagens contribuem grandemente para a compreensão dos recursos naturais e sua utilização de um ponto de vista holístico e prático. É de extrema relevância considerar os efeitos das mudanças climáticas globais em áreas costeiras, uma vez que esses efeitos afetam tanto diretamente como indiretamente os serviços fornecidos pelos ecossistemas bem como a biodiversidade ali existente.

O estabelecimento dos índices e classificações de vulnerabilidade para cada uma das dimensões costeira demonstra a necessidade da compreensão das interações dos processos e dinâmicas na formulação de medidas e políticas para a zona costeira, ainda permite apontar diretrizes para a gestão costeira, através do cruzamento dos resultados obtidos.

Todas essas análises do município de São Gonçalo do Amarante demonstram a possibilidade de se definir áreas prioritárias para diferentes tipos de políticas, zoneamentos e mitigações direcionando a gestão de forma adequada.

REFERÊNCIAS

- AB' SÁBER, Aziz Nacib. **Brasil: Paisagens de Exceção: o litoral e o Pantanal Mato – grossense: patrimônios básicos**. Ateliê Editorial, Cotia, 2006.
- AB' SÁBER, Aziz Nacib. **Litoral do Brasil**. Metalivros, São Paulo, 2001.
- ADDAD, J. **Alterações fluviais e erosão costeira**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2, p. 21-44, 1997. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/57/e880b8870ab74e58628c8746c6880108_163d73ef3e390f6d81370616a8654993.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020
- ALMEIDA, L. R. D.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. **Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira**. Vol.15, n.2, p.135-151, 2015.
- ÂNGULO, R. J. Aspectos físicos das dinâmicas de ambientes costeiros, seus usos e conflitos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 10, p. 175-185, jul./dez. 2004. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/3107>. Acesso em: 11 ago. 2019.
- ARAUJO, R.S., SILVA, G.V., FREITAS, D., KLEIN, A. H. F. **Georreferenciamento de Fotografias Aéreas e Análise da Variação da Linha de Costa**. In: J. Alcántara, C., Arango, I. D. C., Mendy F. I. I., Ortega, M. A., Klein, A. H. F. A. C., Barlow, H. R. S. (Eds.). *Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo-CYTED, Espanha pp. 123-138, 2009.
- BEZERRA, M.O., PINHEIRO, L., MORAIS, J.O. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast of Brazil) 1972 - 2003. **Journal of Coastal Research** 50, 1163-1167, 2007.
- BOAK, E.H., TURNER, I.L. Shoreline Definition and Detection: A Review. **Journal of Coastal Research** 21, 688-703, 2005.
- BOORI, M. S., AMARO, V. E. Land use change detection for environmental management: using multi-temporal, satellite data in Apodi Valley of northeastern Brazil. **Applied GIS International Journal** 6, 1-15, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/31112/1/LandUseChange_AMARO_2010.pdf. Acesso em: 12 dez. 2020
- BRASIL. Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/secirm>. Acesso em: 12 dez. 2010.
- CAMPOS, A. A.; MONTEIRO, A. Q.; MONTEIRO-NETO, C.; POLETTE, M. **Zona Costeira do Ceará: Diagnóstico para a gestão integrada**. Fortaleza, Aquasis, 2003.
- CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **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 / Superintendência Estadual do Meio Ambiente; GEOAMBIENTE – Fortaleza: SEMACE, 2016.

CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. **Gerenciamento Costeiro**. 2019. Disponível em: <https://www.sema.ce.gov.br/gerenciamento-costeiro/>. Acesso em: 10 jun. 2020.

COELHO, C., SILVA, R., VELOSO-GOMES, F., TAVEIRA PINTO, F. A Vulnerability analysis approach for the Portuguese West Coast. **Risk Analysis V: Simulation and Hazard Mitigation**, 251-262, 2006.

COSTA, C. E. B. **Análise descritiva do padrão de ondas no litoral do Ceará através de dados observados**. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

DAVIS, JR R. A., DUNCAN, M. F. **Beaches and coasts**. Blackwell Publishing, Oxford., 2004
DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **Tábua de maré**. 2021. Disponível em: <http://www.dhn.mar.mil.br>. Acesso em: 10 jun. 2020.

DOLAN, R., HAYDEN, B.P., REA, C., HEYWOOD, J. Shore-line erosion rates along the middle Atlantic coast of the United States. **Geology**, 7, 602–606, 1979.

DUARTE, C. R., DE MIRANDA, F. P., LANDAU, L., SOUTO, M. V. S., SABADIA, J. A. B., NETO, C. A. DA S., RODRIGUES, L. I. DE C., DAMASCENO, A. M. Short-time analysis of shoreline based on RapidEye satellite images in the terminal area of Pecém Port, Ceará, Brazil. **Int. J. Remote Sens.** 39 (13), 4376–4389, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1457229>. Acesso em: 10 jan. 2020

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **Software ArcGis Desktop**, License Type Arcinfo, version 10.8.1, 2019.

FUNCEME. Fundação Cearense e Meteorologia e Recursos Hídricos. **A zona costeira do estado do Ceará: compartimentação geoambiental e antropismo**. 2009

FUNCEME. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre o Nordeste**. Secretaria de Recursos Hídricos, 2014. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/551-sistemas-atmosfericos-atuantes-sobre-o-nordeste>. Acesso em: 10 jun. 2020.

GORNITZ, V. Vulnerability of the east coast, USA to future sea level rise. **Journal of Coastal Research**, 9, 201–237, 1990.

GORNITZ, V. M.; DANIELS, R. C.; WHITE, T. W.; BIRDWELL, K. R. The development of a coastal vulnerability assessment database, vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. **Journal of Coastal Research**, 12, 327-338, 1994.

GRIGIO, A.M. **Aplicação de sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na determinação da vulnerabilidade natural e ambiental do Município de Guamaré (RN)**. p. 181, n° 34, 2003.

GRIGIO, A. M.; SOUTO, M. V. S.; CASTRO, A. F., AMARO, V. E.; VITAL, H. & DIODATO, M. A. Use of remote sensing and geographical information system in the determination of the natural and environmental vulnerability of the Municipal District of Guamaré - Rio Grande do Norte - Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research**, 39: 1427-1431, 2004.

GRIGIO, A. M. AMARO, V. E., VITAL, H., DIODATO, M. A. **A method for Coastline Evolution Analysis Using GIS and Remote Sensing: a case study from the Guamaré City, Northeast Brazil**. Journal of Coastal Research 42, 412-421, 2005.

GRIGIO, A. L. M.; AMARO, V. E.; DIODATO, M. A. Dinâmica espaço-temporal do uso e ocupação do solo, no período de 1988 a 2004, do baixo curso do rio Piranhas-Assu (RN): Ssgestões de acompanhamento integrado das atividades socioeconômicas impactantes na área costeira. **Geografia**, v. 34, p. 141-161, 2009.

HIMMELSTOSS, E. A., HENDERSON, R. E., KRATZMANN, M. G., FARRIS, A. S. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide**: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2018.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil**. IBGE, Diretoria de Geociências, Rio de Janeiro, 176p, 2011. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv55263.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/sao-goncalo-do-amarante/panorama>. Acesso em: 08 ago. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 1991**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012 Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/82/cd_1991_n11_caracteristicas_populacao_domicilios_ce.pdf. Acesso em: 08 ago. 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos**. Rio de Janeiro: IBGE- Diretoria de Geociências. 271p. (Manuais Técnicos de Geociências, 2012). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2019.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Rio de Janeiro, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro, 2015

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de Dados de Informações Ambientais (BDiA)**, 2019. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br>. Acesso em: 01 mar. 2019.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. **SPRING 5.5.6**. São José dos Campos, 2020. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring>. Acesso em: 12 jan. 2021

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, e P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova York, NY, Estados Unidos da América, 582 págs, 2012.

IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal**. Fortaleza, 2014 Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/perfil-basico-municipal-2015. Acesso em: 08 ago. 2020.

KLEIN, R. J. T. **Coastal Vulnerability, Resilience and Adaptation to climate: a interdisciplinary perspective**. Cumulative Dissertation, 2002. Disponível em: <https://www.pik.potsdam.de/~richardk/part1.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2021

KOPPEN, W., GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928, Wall-map 150cmx200cm.

KOROGLU, A.; RANASINGHE, R.; JIMÉNEZ, J.A.; DASTGHEIB, A. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province. **Ocean Coast. Manag**, 178, 104799, 2019.

LIMA, L. C. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. FUNECE: Fortaleza, 2000.

LUIJENDIJK; A., HAGENAARS, G., RANASINGHE, R., BAART, F., DONCHYTS, G., AARNINKHOF, S. The state of the world's beaches. **Nature Scientific Reports** 8, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>

MAGINI, C.; MARTINS, A. H. O.; PITOMBEIRA, E. S. A Infraestrutura Portuária e suas Influências na Sedimentação Costeira na Vila do Pecém, Ceará, Brasil. **Geociências: UNESP**, São Paulo, v. 32, n. 3, p.532-546, 2013. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7297>. Acesso em: 08 ago. 2019.

MCFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open waterfeatures. **International Journal of Remote Sensing** 17 (7), 1425-1432, 1996.

MEIRELES A.J.; SILVA, A. E.; THIERS, P.R.L. Os campos de dunas móveis: fundamentos dinâmicos para um modelo integrado de planejamento e gestão da Zona Costeira, **Revista GEOUSP** 20, 101-119, 2006. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/74010>. Acesso em: 12 dez. 2020.

ONU. Organização Das Nações Unidas. Living with risk. **A global review of disaster reduction initiatives**. Inter-agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), Genebra – Suíça. 398p. e anexos, 2004. Disponível em: <https://www.unisdr.org/we/inform/publications/657>. Acesso em: 11 ago. 2019.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Brasília: MMA, 2008.

MONTALVÃO, R. M. G. Geologia. In: Brasil. **Projeto RADAM**. Folha NA.20 Boa Vista e parte das Folhas NA.21 Tumucumaque, NB.20 Roraima e NB.21 - RJ17: Série Levantamento de Recursos Naturais, volume 8. Projeto RADAM, 1975

MONTEIRO, N. M. V. **Os efeitos da política de desenvolvimento no litoral cearense e as estratégias para a sustentabilidade: o caso do Pecém – São Gonçalo do Amarante**. 228 f. Dissertação (Mestrado em Gestão e Modernização Pública) – Universidade Internacional de Lisboa/ Universidade Estadual Vale do Acaraú, 2001.

PBMC, Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. **Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas** [Marengo, J.A., Scarano, F.R. (Eds.)]. PBMC, COPPE - UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 184 p. ISBN: 978-85-285-0345-6, 2016.

PILKEY, O. H.; DAVIS, T. W. **An analysis of coastal recession models: North Carolina coast**. In: D. Nummedal, O.H. Pilkey and J.D. Howard (Editors), *Sea-level Fluctuation and Coastal Evolution*. SEPM (Society for Sedimentary Geology), 41, 59-68, 1987.

SANTOS, H. G. DOS; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. DOS; OLIVEIRA, V. A. DE; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. DE; ARAUJO FILHO, J. C. DE;

OLIVEIRA, J. B. DE; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro De Classificação De Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

RANGEL-BUITRAGO, N.; NEAL, W.J.; DE JONGE, V.N. Risk assessment as tool for coastal erosion management. **Ocean Coast. Manag.**, 186, 105099, 2020.

SANTOS, Jader Oliveira. **Vulnerabilidade Ambiental e Áreas de Risco na Bacia Hidrográfica do Rio Cocó–Região Metropolitana de Fortaleza–Ceará**. Núcleo de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e meio Ambiente-PRODEMA. Universidade Federal do Ceará - UFCE. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente), 2006.

SHORT, A.D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. Number 551.468. John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1991.

SNOUSSI, M; OUCHANI T.; NIAZI, S. Vulnerability assessment of the impact of sea level rise and flooding on the Moroccan coast: the case of the Mediterranean eastern zone. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77, 206–13, 2008.

SOARES FILHO, Britaldo Silveira. **Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica**. 229 p, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 1998.

SOUZA, C. R. DE G., SUGUIO, K., OLIVEIRA, A. M. S., OLIVEIRA, P. E. **Quaternário do Brasil**. Holos Editora, Ribeirão Preto, 2005.

SOUZA-FILHO, Pedro Walfir Martins **Avaliação e aplicação de sensores remotos no estudo de ambientes costeiros tropicais úmidos, Bragança, norte do Brasil**. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica), Belém, UFPA, 2000.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; PARADELLA W. R. Recognition of the main geobotanical features along the Bragança mangrove coast (Brazilian Amazon Region) from Landsat TM and RADARSAT-1 data. **Wetlands Ecology and Management** 10 (2), 121-130, 2002.

TAGLIANI, C.R.A. **Técnica para avaliação da vulnerabilidade de ambientes costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informações**. Galeria de artigos acadêmicos, 2003.
SUGUIO, K. **Dicionário de Geologia Marinha: com termos correspondentes em inglês, francês e espanhol**. São Paulo: T A Queiroz, Biblioteca de Ciências Naturais. vol. 15, 1992.

THIELER, E.R.; HAMMAR-KLOSE, E.S. **National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise; Preliminary Results for the US Pacific Coast; Technical Report; U.S. Geological Survey: Woods Hole, MA, USA, 2000.**

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE/SUPREN, 91p, 1977.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat 8 Product**, 2016. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 dez. 2020.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat 5 Product**, 2006. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 dez. 2020.

USGS. United States Geological Survey. **Using the USGS Landsat 7 Product**, 1999. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 01 dez. 2020

VIANA, C. M. P; SOUSA, J.; LIMA, K. A.; NASCIMENTO, M. M. S. **Perfil Básico Municipal 2015: Fortaleza/CE**. Fortaleza: Instituto de Pesquisa Estratégica Econômica do Ceará (IPECE), 19p, 2015.