



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR – LABOMAR**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**BRUNNO JANSEN FRANCO**

**Análise do Índice de Vulnerabilidade Costeira no setor Oeste da Região  
Metropolitana de Fortaleza**

**FORTALEZA**

**2021**

**BRUNNO JANSEN FRANCO**

**Análise do Índice de Vulnerabilidade Costeira no setor Oeste da Região  
Metropolitana de Fortaleza**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do grau de mestre.

Orientadora: Profa.Dra. Lidriana de Souza Pinheiro

Coorientador: Prof.Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa

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)

---

- F894a Franco, Bruno Jansen.  
Análise do Índice de Vulnerabilidade Costeira no setor Oeste da Região Metropolitana de Fortaleza /  
Brunno Jansen Franco. – 2021.  
41 f.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-  
Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Profª. Dra. Lidriana de Souza Pinheiro.  
Coorientação: Prof. Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa .
1. Zona Costeira. 2. Indicadores de vulnerabilidade. 3. Sistema de Informação Geográfica (SIG). 4.  
IVC. 5. Erosão costeira. I. Título.

CDD 551.46

---

**BRUNNO JANSEN FRANCO**

**Análise do Índice de Vulnerabilidade Costeira no setor Oeste da Região  
Metropolitana de Fortaleza**

Dissertação apresentada ao Curso  
de Pós-Graduação em Ciências  
Marinhas Tropicais da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito  
para obtenção do grau de mestre.

Aprovada em 12 de março de 2021

**BANCA EXAMINADORA**

---

Dr<sup>a</sup>. Lidriana de Souza Pinheiro (Orientadora)  
Instituto de Ciências do Mar - Labomar/UFC

---

Dr. Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa (Coorientador)  
Instituto de Ciências do Mar - Labomar/UFC

---

Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves (Membro Externo)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. Dra. Janaina Melo Oliveira (Membro Interno)  
Instituto de Ciências do Mar - Labomar/UFC

FORTALEZA

2021

## DEDICATÓRIA

*À minha família*

## AGRADECIMENTOS

Início agradecendo aos meus pais Raimunda Jansen e Altemir Franco e meu irmão Brenno Franco por sempre estarem do meu lado me incentivando e acreditando em mim. A minha Prima Nana pelos cuidados, apoio, compreensão, paciência, amor e carinho durante os anos mais importantes da minha formação. Além dos demais membros da minha família.

A professora Dr<sup>a</sup> Lidriana Pinheiro e o professor Dr. Paulo Henrique Sousa, pela oportunidade de pesquisa, disposição, confiança e experiências que proporcionaram a mim ao longo desses dois anos de convivência, a vocês muito obrigado.

A minha namorada Poena Silva, pelo companheirismo, amizade e por toda a paciências e ajuda me que deu em tantos momentos. Obrigado por dividir todas essas experiências ao meu lado.

Aos meus amigos, Lorena Sampaio, Ana Rodrigues, Thomas Ravelly, Karina Gurgel, Regimário Filho, Victor Nascimento e Ana Lessa pelas conversas, brincadeiras e pelo apoio mesmo que indiretamente, obrigado. A minha amiga Thays Luz que me ajudou e me deu suporte nessa mudança cultural, social, institucional e pessoal, muito obrigado.

Aos meus amigos que mesmo distante sempre se mantiveram presente me apoiando Kassandra Borges, Matheus Seguins, Daniel Pereira, Juliana Aguiar, Thalita Borba, Ana Paula Chaves, Edgar Melo, Carlos Neves, Mara Oliveira e Marina Jansen.

Aos meus Companheiros de apartamento Giulian Monteiro, Alana Magda e Maria Clara por todas as conversas e momentos vividos, obrigado.

As pesquisadoras Mônica Pimenta e “Cida” por todo o carinho e incentivo que me deram nas tardes do laboratório. Ao pesquisador Gleidson Gastão por todos os ensinamentos fornecidos. E demais membros do Laboratório de Oceanografia Geológica-LOG /UFC, obrigado!

A professora Rosalva Reis e professor Angelo Mendonça por acreditarem em mim no início dessa minha carreira como cientista.

A todos que de certa forma tiveram parcela na minha formação nesses anos.

Por fim agradeço a agencia de comento CAPES pela minha bolsa de mestrado, a Universidade Federal do Ceará, ao Instituto de Ciências do Mar –LABOMAR, ao Programa de Pós-graduação em Ciências Marinhas Tropicais- PPGCMT, ao Laboratório Oceanografia Geológica- LOG/UFC e ao Laboratório de Dinâmica Costeira – LABDIC, por toda a estrutura e suporte fornecidos para a execução da minha pesquisa.

## RESUMO

A zona costeira é um ambiente extremamente energético e de rápida mutação, gerando riscos e desastres tanto de origem antropogênicos quanto naturais. A erosão é uma das primeiras e principais respostas ao desequilíbrio do ambiente costeiro. Com isso, entender a vulnerabilidade costeira frente a erosão possibilita lidar melhor com as consequências geradas pelos processos erosivos e seus agravantes. O presente estudo teve por objetivo avaliar o grau de vulnerabilidade à erosão das praias no litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza, considerando a situação atual. A metodologia baseou-se no cálculo de um índice de vulnerabilidade costeira (IVC) para três setores do litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza, através de uma fórmula analítica obtida pela média aritmética de seis indicadores de vulnerabilidade à erosão, sendo eles: variação da linha de costa (m/ano), cálculo de índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) – Obtidos através de ferramentas de automação de processamento de dados da biblioteca virtual disponível pelo *Google Earth Engine*-, largura da praia, presença de dunas, configurações ao largo e obras de engenharia costeira – Obtidos através do mapeamento de uma célula costeira em cada setor que compreendem as praias da Tabuba (setor I), Pecém (setor II) e Taíba (setor III) e apoiados com levantamento de campo pra auxílio de interpretação. Posteriormente estes indicadores foram agrupados em 3 graus de intensidade, sendo: vulnerabilidade alta, moderada ou baixa. Os resultados indicam, considerando o IVC, = que 34% do litoral analisado (~60 km) encontra-se com um grau de vulnerabilidade alto à eventos de erosão, 49,26 % do litoral encontra-se com um grau de vulnerabilidade moderado e somente 16,02 % encontra-se com um grau de vulnerabilidade baixo. Destacam-se os indicadores de erosão analisados de variação de linha de costa com prontos de variação com valores de aproximadamente de -5 m/ano (setor I) e regiões com valores de aproximadamente 8 m/ano (setor II). Por fim, o método empregado fornece subsídio para a tomada de decisão de medidas mitigatórias dentro da ótica de indicadores analisados para as praias estudadas.

**Palavras-chave:** Zona Costeira, Indicadores de vulnerabilidade, Sistema de Informação Geográfica (SIG), IVC, Erosão costeira.

## ABSTRACT

The coastal zone is an extremely energetic and rapidly changing environment, generating risks and disasters of both anthropogenic and natural origin, and erosion is one of the first and main responses to the unsteadiness of this environment. Thereby, the understanding of coastal vulnerability to erosion enables to better deal with the consequences generated by erosive processes and their aggravations. The present study aimed to assess the degree of vulnerability to erosion on beaches of the metropolitan region of Fortaleza's west coast, considering the current situation. The methodology was based on the calculation of a coastal vulnerability index (CVI) for three sectors in the study area, through an analytical formula obtained by the arithmetic mean of six indicators of vulnerability to erosion, namely: shoreline position (m/year), calculation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) - obtained through data processing automation tools from the virtual library available through *Google Earth Engine* - beach morphology, dune field configuration, wave exposure, and coastal engineering structures - obtained by mapping a coastal cell in each sector comprising the beaches of Tabuba (sector I), Pecém (sector II), and Taíba (sector III), supported with field survey to improve interpretation. Subsequently, these indicators were grouped into 3 degrees of intensity: high, moderate, or low vulnerability. The results indicate, considering the CVI, that 34% of the analyzed coastline (~60 km) is highly vulnerable to erosion events, 49.26% of the coast is moderately vulnerable, and only 16.02% have a low degree of vulnerability. As a standout, we can point out the analyzed coastline variation, which presented variation values of approximately -5 m/year (sector I), as well as regions with 8 m/year (sector II). Finally, the method employed provides support for decision-making on mitigating measures in relation to the indicators analyzed for the beaches studied.

**Keywords:** Coastal Zone, Vulnerability Indicators, Geographic Information System (GIS), CVI, Coastal Erosion.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Setorização da área de estudo (a) e células costeiras mapeadas e levantamento de campo (b). .....	5
Figura 2. Estrutura para obtenção do IVC do litoral oeste litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza. A etapa 1 mostra levantamento de campo para identificação de indicadores de erosão, etapa 2 mostra a entrada de dados de imagens de satélite, etapa 3 mostra a integração dos resultados e cálculo do IVC e 4 a classificação me acordo com o grau de vulnerabilidade a erosão da região. ....	8
Figura 3 Fluxograma resumido das etapas de processamento da ferramenta e-C.A.S.S.I.E .....	12
Figura 4 Exemplos de indicadores visuais utilizados para definir o grau dos impactos de erosão costeira. (a) Presença de dunas (praia da Taíba), (b) presença de obras de contenção (praia da Tabuba), (c) configuração ao largo (praia da Tabuba), (d) largura da praia (praia da Taíba).....	13
Figura 5 Índice de vulnerabilidade Costeira do litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza e indicadores avaliados e classificados de acordo com três graus de vulnerabilidade para cada indicador .....	15
Figura 6. Valores absolutos de tendência de variação da linha de costa .....	16
Figura 7 Valores brutos de NDVI para os pontos analisados ao longo da linha de costa. ....	17
Figura 8 Síntese dos resultados do mapeamento dos indicadores de erosão em células costeiras dos setores estudados.....	19
Figura 9. Valores percentuais do resultado do índice de vulnerabilidade costeira por setor e valor percentual da área total analisada. ....	21

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos indicadores de vulnerabilidade utilizados e adaptados de Sousa et al. (2013). E critérios de classificação linguística dos indicadores de erosão. ....	13
Tabela 2 Percentual da classificação do indicador de largura da praia resultante do comprimento dos transectos estabelecidos nas células costeiras estudadas nos diferentes setores. ....	18

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVO GERAL .....	3
<b>2.1. Objetivo específico</b> .....	3
3. ÁREA DE ESTUDO.....	4
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
4.1. Materiais.....	5
4.2. Métodos.....	7
4.3. Largura da Praia .....	8
4.4. NDVI ( <i>Normalize Difference Vegetation Index</i> ).....	9
4.5. Variação da Linha de Costa .....	10
4.6. Indicadores Mapeados.....	12
4.7. Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC).....	14
5. RESULTADOS .....	14
5.1. Variação da Linha de Costa .....	14
5.2. NDVI distribuição espacial .....	16
5.3. Indicadores de Erosão .....	17
5.4. Índice de Vulnerabilidade Costeira .....	20
6. DISCUSSÕES .....	21
7. CONCLUSÃO .....	23
REFERÊNCIAS .....	24
APÊNDICES.....	28

## 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira pode ser caracterizada como o local de interface entre atmosfera, da terra e do mar (Viles & Spencer, 1995). Esta região é caracterizada por variações espaço-temporais, em diferentes escalas, com modificações morfológicas em função do tipo de costa (Wright & Short, 1984; 1993).

Segundo Cowell e Thom (1994) as modificações da topografia alteram as condições de contorno para atuação hidrodinâmica, produzindo mudança no comportamento de transporte sedimentar e seus produtos deposicionais e erosivos. Com isso, pode-se afirmar que a morfologia e hidrodinâmica evoluem conjuntamente (Calliari et. al., 2003).

Alterações em processos relacionados à morfodinâmica do ambiente costeiro podem influenciar no equilíbrio das forças controladoras e modeladoras deste ambiente. Com isso, geralmente as respostas morfológicas são traduzidas em processos erosivos modificando em função do tempo a posição da linha de costa.

Os processos de ocupação do litoral promovem o desequilíbrio das condições naturais do ambiente costeiro, resultando de forma direta na capacidade de resiliência do litoral. Por sua vez, a elevação do nível médio dos oceanos se torna uma ameaça para as populações que ocupam a zona costeira, resultando no aumento de prejuízos e riscos (Sousa et al., 2013; Alexandrakis & Poulos, 2014 e De Andrade, et al., 2019).

Os processos erosivos intensos constituem um dos principais problemas das zonas costeiras na atualidade. Mentaschi et al. (2018) observaram que aproximadamente 28.000 km<sup>2</sup> de áreas costeiras do mundo foram erodidas, entre 1985 e 2015. Luijendijk et al. (2018) estudando ambientes de praias arenosas no mundo, entre 1985 e 2016, destacam que 24% das praias encontravam-se sob erosão, 28% sob acreção e 48% foram consideradas estáveis, sendo cerca de 7% das praias arenosas encontravam-se sob severa erosão. No que se refere ao Brasil, nas regiões Norte e parte do Nordeste, cerca de 60 a 65% da linha de costa está sob processo erosivo, ao passo que nas regiões Sudeste e Sul esse percentual é de aproximadamente 15% (Muehe, 2018). No Estado do Ceará, aproximadamente 30% da extensão da linha de costa apresentam erosão (áreas ocupadas, naturais e estabilizadas por obras) e 17% da linha de costa apresenta tendência erosiva (Morais et la., 2018). Ou seja, existe aproximadamente 53% da linda de costa que requer

acompanhamento sistemático e o desenvolvimento de indicadores que permitam acompanhar a evolução desses processos.

Segundo Alexandrakis & Poulos (2014), a dinâmica do ambiente costeiro dificulta a quantificação dos processos devido a sua variabilidade. Neste contexto, o entendimento da vulnerabilidade a impactos auxilia na prevenção de proteção as causas de processos erosivos. Tendo o conceito de vulnerabilidade costeira uma abordagem geral, onde estão inclusos a susceptibilidade do ambiente, exposição, capacidade de adaptação e aos sistemas físicos e sociais (Birkmann, 2007).

Estudos sobre a vulnerabilidade costeira à erosão apresentam métodos baseados em diferentes abordagens podendo ser: índices de estimativa de vulnerabilidade costeira, baseada em análise de indicadores físicos de erosão, sistemas de suporte à decisão baseados em Sistemas de Informações Geográficas e métodos baseados em modelos dinâmicos (Gornitz, 1991; Birkmann, 2007; Cai, 2009; Kumar et al. 2010, Sousa, et. al.; Alexandrakis & Poulos, 2014; Martins et al. 2016; Menezes et al. 2018, Kantamaneni et al. 2018; Pantusa 2018; Araújo et al. 2019; De Andrade et al 2019; Gonçalves et. al. 2019).

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) é um método bastante utilizado em estudos de vulnerabilidade costeira tendo um percentual de 30% de aplicação desse método segundo Cogswell et al., (2018). Os resultados do IVC contribuem para destacar quais fatores contribuem para as mudanças da linha de costa e qual tem maior potencial para influências no recuo da linha de costa. A abordagem IVC proposta por Gornitz (1991) vem sendo aplicada e / ou adaptado por vários pesquisadores, para avaliar a vulnerabilidade costeira ao redor do litoral mundial (Koroglu et al 2019).

Para as aplicações do IVC, os dados de sensoriamento remoto, publicamente disponíveis, fornecem uma solução de baixo custo para obtenção de informações espaciais e temporais (últimos 30 anos aproximadamente) para as regiões costeiras. Crucialmente, o advento do Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) facilitou o acesso de informações geográficas publicamente disponíveis, proporcionando a oportunidade para análises em escala global que remontam a décadas (Vos, 2020).

Muehe. (2018) apresenta o panorama da erosão costeira no Brasil, onde aponta-se que há processos erosivos em praticamente toda a extensão da linha de costa brasileira. Nesta obra destaca-se ainda a problemática socioeconômica gerada em torno da

retificação da linha de costa, levando a destruição do ambiente praial a médio e longo prazo. A costa oeste da Região Metropolitana de Fortaleza destaca-se por ser um dos principais polos turístico do Brasil (Sousa et. al., 2008). No entanto, Pinheiro et. al. 2016 e Morais et. al. 2018 retratam os riscos enfrentados por turistas mediante a problemáticas causadas por eventos erosivos, como muros de contenção, pedregulhos decorrentes de erosão de obras, entre outros.

O presente trabalho usa como variáveis para a determinação do índice de vulnerabilidade à erosão costeira, indicadores costeiros propostos por Sousa et. al., (2013) como a presença de dunas, a configuração ao largo, a presença de obras de contenção, e a largura da praia e as devidas adaptações para ambientes de mesomará. Assim como a aplicação do cálculo do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e as características específicas como a variações temporais da linha de costa obtidas através a automação de processamento de imagens de satélite disponíveis no catálogo de coleções do Google Earth Engine.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é obter o grau de vulnerabilidade à erosão costeira, para o ano de 2020, através de indicadores de erosão na faixa litorânea compilados em um índice de vulnerabilidade costeira (IVC), para região metropolitana oeste de Fortaleza, CE.

## **2. OBJETIVO GERAL**

Avaliar o grau de vulnerabilidade à erosão das praias no litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza.

### **2.1. Objetivo específico**

- Determinar a variação da linha de costa (m/ano) e execução de cálculo temporal de NDVI entre 1988 e 2020;
- Mapear os indicadores de erosão atuantes nas praias estudadas adaptando os indicadores de Sousa et. al. (2013), à ambientes de mesomará.
- Determinar o grau de vulnerabilidade costeira conforme a divisão setorial proposta para a região metropolitana de Fortaleza.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no litoral oeste do estado do Ceará, compreendidas nos limites territoriais dos municípios de Caucaia, São Gonçalo do Amarante e Paracuru localizados a oeste de Fortaleza.

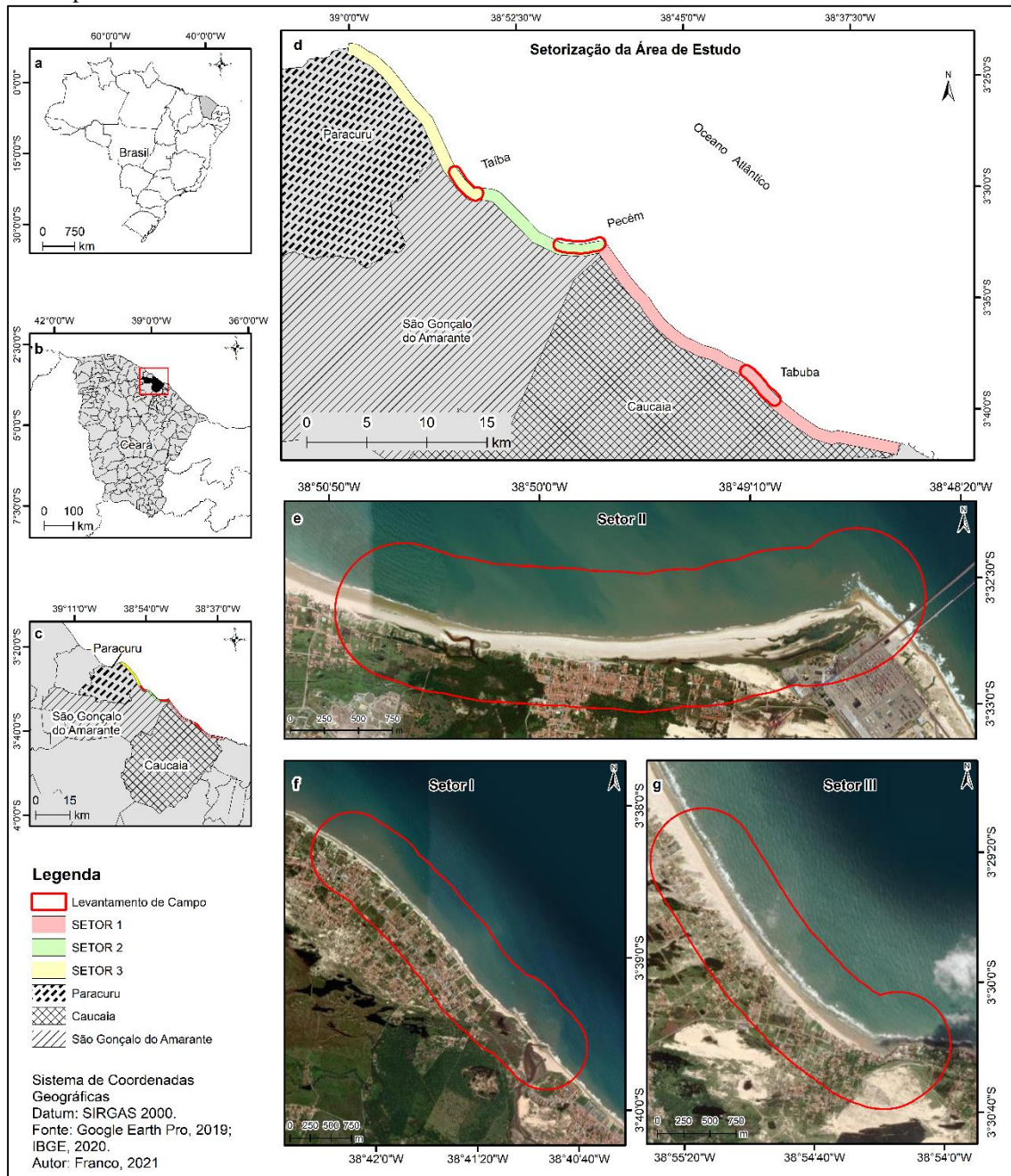
A área de estudo foi subdividida em 3 setores: O setor I que abrange o litoral do município de Caucaia, limitado pelo Rio Ceará e o porto do Pecém, o setor II envolve a Praia do Pecém sendo limitada pelo porto do Pecém e o mirante da Praia da Taíba e o setor III que abrange o trecho praiial situado entre a praia da Taíba até a proximidades do *pier* da Petrobras. Totalizando aproximadamente 60 km de linha de costa analisada da região metropolitana de Fortaleza. O critério utilizado para agrupar cada setor levou em conta a similaridade das características geomorfológicas (Figura 1 d).

Foi realizado um recorte espacial para o levantamento de campo onde estão situadas as praias estudadas. Tabuba (município de Caucaia), Pecém e Taíba (município São Gonçalo do Amarante) posicionadas nos centroides 3,64°S 38,69°W, 3,54°S 38,82°W; 3,49°S 38,91°W, respectivamente (Figura 1 e, f, g).

O litoral oeste do estado do Ceará é rico em diferentes feições geomorfológicas variando entre sistemas dunares bem estabelecidos, paleodunas, esporões arenosos, entre outros (Morais, 2018).

As características climáticas da região estão diretamente ligadas as variações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que proporcionam dois períodos do ano bem distintos: chuvoso e estiagem (Pinheiro et. al., 2016; Moraes, 2018).

Figura 1. Localização da área de estudo. (a) localização do estado do Ceará, (b) localização dos municípios estudados, (c) localização dos setores e células de seleção estudados, (d) setorização realizada para os procedimentos metodológicos, (e) localização da área do levantamento de campo na Praia do Pécem, (f) localização da área do levantamento de campo na Praia da Tabuba, (g) localização da área do levantamento de campo na Praia da Taíba.



## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Materiais

Os materiais utilizados na presente pesquisa são divididos em duas etapas onde a primeira corresponderam basicamente a imagens digitais da coleção de satélite Landsat



5-sensor TM e Landsat 8-sensor OLI com o conjunto de dados da reflectância de superfície e correção atmosférica. Foram utilizadas ainda imagens de alta resolução adquiridas no *Google Earth Pro* (Tabela 1). As imagens de satélite foram disponibilizadas a partir da biblioteca online do *Gogle Earth Engine* - GEE (Gorelick et al., 2017).

Tabela 1. Informações sobre conjunto de imagens utilizadas.

	Cobertura de nuvem	Fonte	Satélite	Resolução espacial	Método Analisado
ago/88	0,1%	GEE	Landsat 5	30 m/pxl	NDVI/ LC
ago/1990	4,2%	GEE	Landsat 5	30 m/pxl	NDVI/ LC
out/1993	0,8%	GEE	Landsat 5	30 m/pxl	NDVI/ LC
set/2005	2,7%	GEE	Landsat 5	30 m/pxl	NDVI/ LC
jul/2008	1,4%	GEE	Landsat 5	30 m/pxl	NDVI/ LC
ago/2016	1,1%	GEE	Landsat 8	30 m/pxl	NDVI/ LC
jun/2018	0,8%	GEE	Landsat 8	30 m/pxl	NDVI/ LC
jun/2020.	0,1%	GEE	Landsat 8	30 m/pxl	NDVI/ LC
jun/18	-	Imagens Google Eath Pro	-	0,5 m/pxl	Mapeamento de uso e cobertura de solo
jun/19	-	Imagens Google Eath Pro	-	0,5 m/pxl	Mapeamento de uso e cobertura de solo

Fonte: Autor,2021

Os processamentos dos dados de imagens de satélite foram realizados em três etapas, descritas abaixo:

(1) Na Plataforma *Coastal Analysis via Satellite Imagery Engine* (e-C.A.S.S.I.E.), disponível *online* em: <http://cassiengine.com/>, onde foram extraídas as variações da Linha de Costa da região metropolitana de Fortaleza. Nessa etapa foram selecionadas imagens correspondentes as datas listadas na Tabela 1.

(2) No ambiente de programação do GEE foi conduzida a elaboração do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para as mesmas imagens selecionadas na etapa anterior (Tabela 1), da região metropolitana de Fortaleza.

(3) Nesta etapa foram usadas imagens de alta resolução extraídas do *Google Earth Pro* (0,5 m/pxl de resolução espacial) referente ao ano de jun/2019 para as Praias da Taíba e do Pecém e de jun/2018 para a Praia da Tabuba para realização do mapeamento do uso e cobertura do solo. O mapeamento foi realizado para uma célula costeira de

aproximadamente 3 km, definidos em um levantamento de campo, com uma escala de mapeamento de 1:10.000.

Foi realizado ainda uma etapa de levantamento de campo, no mês Maio/2019, para identificação e mapeamento alguns indicadores de erosão. Para tal mapeamento fez-se o uso de um GNSS RTK da marca SOUTH com método de posicionamento da base estático e o levantamento planialtimétrico geodésico da superfície da praia, foi realizado pelo posicionamento cinemático.

O processamento do levantamento topográfico da base foi realizado a partir do posicionamento por ponto preciso (IBGE, 2017). Sendo a partir disso corrigidos os pontos adquiridos em modo cinemático. Em campo foram estabelecidos *transectos* com espaçamento de 100m, em uma área de ~3 km em cada setor, com altura de maré correspondente a 1 m previamente aferida na DHN (2019), com marégrafo localizado no porto do Pécem.

#### **4.2. Métodos**

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) é uma das abordagens mais utilizadas na atualidade, pois reúne a capacidade de agrupar dados de cunho qualitativos e quantitativos. Com isso, neste trabalho foram adaptados indicadores erosão com base no estudo de Sousa et.al. (2013), que descreveu indicadores de erosão para a praia de Massaguaçu-SP, englobando variáveis costeiras e continentais. Para tanto, foram utilizados 6 indicadores: (1) Largura da praia, (2) Posição da linha de costa, (3) Presença de dunas (4) Configuração ao largo, (5) Obras de engenharia Costeira e (6) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

O procedimento metodológico foi dividido em 3 etapas (Figura 2) podendo ser resumido da seguinte forma:

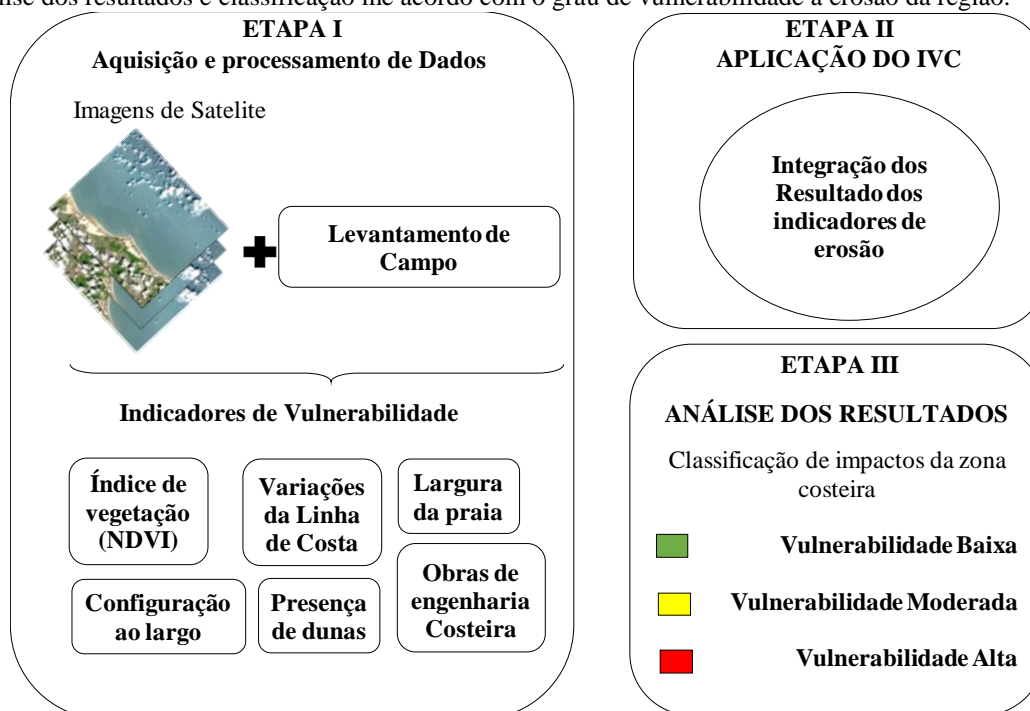
(I) Aquisição e processamento de Dados a partir das imagens de satélite e o levantamento de campo;

(II) aplicação do IVC a partir dos resultados obtidos para cada indicador de erosão analisado na etapa anterior e;

(III) Análise dos resultados do IVC para a determinação do grau de vulnerabilidade a erosão do setor analisado.

Um fluxograma das diferentes etapas envolvidas para obter o grau de vulnerabilidade a erosão para o litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza é resumido na Figura 2.

Figura 2. Estrutura para obtenção do IVC do litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza. A etapa 1 mostra aquisição de dados por meio de imagens de satélite e o levantamento de campo para identificação de indicadores de erosão, etapa 2 mostra a integração dos resultados e cálculo do IVC e 3 a análise dos resultados e classificação de acordo com o grau de vulnerabilidade a erosão da região.



Fonte: Autor, 2021.

#### 4.3. Largura da Praia

Sousa et al. (2013) sugerem que esse indicador, principalmente, para ambiente de micro maré, onde as variações da linha de costa e da água não apresentam alterações significativas em condições normais. Por sua vez Ribeiro et. al. (20013) avaliando a estimativa temporal de vulnerabilidade deste ambiente estabelecem como critérios mais objetivos de classificação, a divisão em 3 partes iguais das variantes máximas e mínimas de largura da praia obtida das imagens analisadas, através de *transectos* perpendiculares a linha de costa.

Neste estudo, por se tratar de um ambiente de meso-maré onde as variações da linha d'água oscilam em dezenas de metros, foram realizados trabalhos de campos visando a determinação da largura da praia em condições de maré conhecidas. O levantamento foi realizado no período de maré baixa com altura correspondente de 1 m

para os dias realização do campo. Por tanto, o comprimento dos transectos aforam analisados em mesmas condições de maré.

Com isso, a partir de trabalho de campo foram realizados 77 *transectos*, ao longo das 3 praias estudadas, com distância aproximada de 100 metros. A largura da praia corresponde ao comprimento dos *transectos* a partir da linha d'água até o limite de vegetação.

Para classificação linguística o comprimento dos *transectos* foram usados para a classificação do grau de vulnerabilidade das praias. Os perfis de praia apresentaram comprimentos variando entre 38,5 e 184,2 m e a partir disso esse intervalo foi dividido em partes iguais.

Assim as praias que apresentaram o maior número de transectos estreitos (38,5-87,0 m) foram classificados como vulnerabilidade alta, já as praias que apresentaram extensões intermediárias (87,1-135,5 m) foram classificadas com vulnerabilidade moderada e as praias que continham, em sua maioria extensões, faixas praias largas (135,6- 184,2 m) foram classificadas como vulnerabilidade baixa.

#### 4.4. NDVI (*Normalize Difference Vegetation Index*)

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi desenvolvido por Rouse et al., (1974) e é obtido através da razão entre a diferença da reflectância do infravermelho (NIR) e do vermelho (R) pela soma das mesmas variáveis. Tendo como o intuito de medir a capacidade fotossintética de uma determinada região. Sendo dessa maneira, possível ser realizado o monitoramento da vegetação. Em geral, os valores variam entre -1,0 e 1,0, em que os valores de  $NDVI < 0$  correspondem a corpos d'água, valores de  $0 > NDVI < 0,1$  indicam áreas inférteis, valores entre  $0,2 < NDVI < 0,3$  representam áreas de pastagem e arbustos, e areias com valores entre  $0,6 < NDVI < 0,8$  expressão vegetações saudáveis. Valores nulos  $NDVI=0$  correspondem a solo exposto (CHOUHAN e RAO, 2011). O NDVI é calculado pela Equação (1).

$$NDVI = \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED)} \quad (1)$$

Onde: NIR = infravermelho próximo (0,75 – 0,90  $\mu\text{m}$ ) e

R = vermelho (0,63 – 0,70  $\mu\text{m}$ ).

O índice de vegetação foi calculado pela plataforma do *Google Earth Engine* (Gorelick et al., 2017), para as 8 imagens listadas na Tabela 2. Foi elaborado um

algoritmo que consiste em 3 etapas: (I) seleção das imagens de multiespectrais da missão Landsat 5 e 8 seguindo os critérios de filtragem: Área de interesse (Região metropolitana oeste e Fortaleza), seguido pelo processo de filtragem por data e cobertura de nuvem (< 5%); (II) Criação de uma função que teve como *input* as imagens selecionadas na etapa anterior e *output* o NDVI calculado e (III) exportação de um arquivo *raster* referente a cada imagem.

O conjunto de imagens selecionadas corresponde ao período de estiagem na região estudada. Os valores para o cálculo do IVC foram selecionados a partir do valor médio das imagens analisadas (Tabela 1) e extraídos com espaçamento de 100 m ao longo da linha de costa, coincidindo com os pontos de variação da LC.

Para classificação linguística os intervalos foram divididos em três classes: Vulnerabilidade alta ( $NDVI < 0,2$ ), Vulnerabilidade moderada ( $0,2 < NDVI < 0,5$ ) e Vulnerabilidade baixa ( $0,5 < NDVI < 1$ ).

#### **4.5. Variação da Linha de Costa**

No presente trabalho as variações da linha de costa são obtidas a partir da ferramenta e-C.A.S.S.I.E. (<http://cassengine.com/>) para o mapeamento e análise de linha de costa. As etapas de utilização descritas por Almeida et. al. (2021) e os critérios utilizados nesse estudo seguem a baixo:

1. Seleção do satélite a ser usado: Foram utilizadas as imagens da missão de satélite Landsat 5 e 8.

2. Seleção da área de interesse: Foi realizado um recorte para a região do litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza

3. Determinação da percentagem de nuvens e filtragem: Nesta etapa o percentual de cobertura de nuvem do recorte selecionado anteriormente é realizado por meio do algoritmo Fmask (ZHU; WANG; WOODCOCK, 2015). Neste trabalho o percentual de nuvens para a execução do mapeamento da linha de costa foi menor que 5%. Foram selecionadas 8 imagens (ago/1988, ago/1990, outubro/1993, set/2005, Jul/2008, ago/2016, jun/2018, jun/2020), que correspondem as condições de maré semelhantes (maré vazante) e compreendem uma cobertura temporal de três décadas.

4. Delimitação da linha de base, extensão e espaçamento: Nesta etapa é realizada a vetorização de uma linha de base, que se encontra no continente paralelo a costa. A

partir da linha de base são selecionados a extensão e espaçamento entre os transectos de extração dos dados para a análise estatística. O espaçamento escolhido nesse estudo foi de 100 m com transecto de 1 km de extensão.

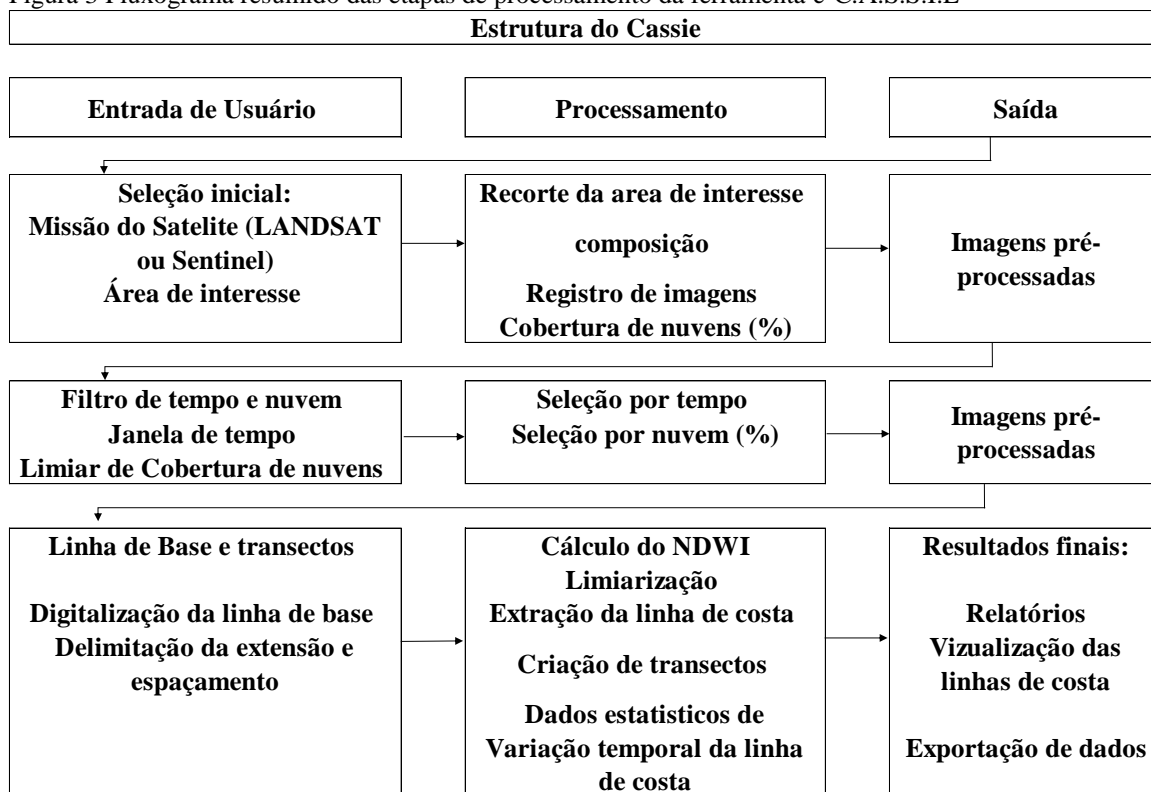
4. Determinação das linhas de costa: Esta etapa foi realizada de forma automática pela ferramenta e-C.A.S.S.I.E. por meio do método similar ao desenvolvido por Hagenaars et al. (2018), onde é aplicado o índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*) com limiarização binária dos valores resultantes. O indicador identificado corresponde a interface continente/oceano, determinado valor zero. Que por sua vez, produz a segmentação por meio do histograma da imagem, de forma com que a variância interclasse seja maximizada (OTSU, 1979); O método foi aplicado as imagens selecionadas e assim foi obtida uma série-temporal de linhas de costa.

5. Visualização dos resultados: Neste tópico são determinadas as variações da linha de costa e a realização de cálculos estatísticos. Seguindo uma abordagem semelhante à utilizada pela ferramenta DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) da USGS (THIELER et al., 2017). Após a extração automática da linha costeira de todas as imagens selecionadas, CASSIE calcula um conjunto de análises estatísticas para cada transecto individual, seguindo a abordagem utilizada no software Digital Shoreline Analysis System - DSAS (Thieler et al., 2017), descritos a seguir:

- *Shoreline Change Envelope* (SCE): a distância (m) entre a linha de costa mais distante e mais próxima da linha de base em cada transecto.
- *Net Shoreline Movement* (NSM): distância (m) entre as linhas de costa mais antigas e mais novas para cada transecto.
- *End Point Rate* (EPR): taxa de variação da linha de costas (m/ano), calculada a partir da divisão entre a distância do movimento da linha de costa pelo tempo decorrido entre a linha de costa mais antiga e a mais recente.
- *Linear Regression Rate* (LRR): taxa de mudança da linha de costa (m/ano), com base na inclinação da linha de regressão linear e calculada ajustando uma linha de regressão de mínimos quadrados a todos os pontos da linha costeira para todos os transectos. Por fim LRR são classificados usando o esquema de classificação de erosão (acrecção, estável, erodida e criticamente erodida) de praia crônica proposto por Esteves e Finkl (1998).

Um fluxograma das diferentes etapas envolvidas para o funcionamento da ferramenta e-C.A.S.S.I.E é resumido na Figura 3.

Figura 3 Fluxograma resumido das etapas de processamento da ferramenta e-C.A.S.S.I.E



Fonte: adaptado de Almeida, et. al. 2021.

Para classificação linguística os intervalos serão divididos em classes considerando: Vulnerabilidade baixa ( $LC < -0,5$  m/ano), Vulnerabilidade Moderada ( $-0,5$  m/ano  $< LC < 0,5$  m/ano) e Vulnerabilidade alta ( $0,5$  m/ano  $< LC$ ).

#### 4.6. Indicadores Mapeados

Os demais indicadores analisados (presença de dunas, configuração ao largo e obras de engenharia costeira), foram mapeados a partir de imagens extraídas do Google Earth Pro, como um arquivo de forma de polígono usando a técnica de digitalização manual na tela em um nível de zoom semelhante (escala uniforme de 1: 10.000). Os Dados mapeados também foram verificados em campo, com o objetivo de auxiliar a classificação do grau de vulnerabilidade a erosão (Figura 4).

Figura 4 Exemplos de indicadores visuais utilizados para definir o grau dos impactos de erosão costeira. (a) Presença de dunas (praia da Taíba), (b) presença de obras de contenção (praia da Tabuba), (c) configuração ao largo (praia da Tabuba), (d) largura da praia (praia da Taíba).



Fonte: Autor, 2021

Os critérios para classificação linguística dos indicadores de erosão foi o mesmo adotado por Sousa, et. al. 2013 (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição dos indicadores de vulnerabilidade utilizados e adaptados de Sousa et al. (2013). E critérios de classificação linguística dos indicadores de erosão.

Indicadores de Vulnerabilidade	Vulnerabilidade Baixa	Vulnerabilidade Moderada	Vulnerabilidade Alta
Configuração ao largo	Presença de barreiras naturais (ilhas, recifes ou rochas de praia)	Barreiras móveis (presença de barreiras arenosas ao largo)	Ausência de barreiras de atenuação de ondas
Presença de dunas	Presença de dunas extensas	Presença de dunas esparsas	Ausência de dunas
Obras de engenharia Costeira	Ausência de estruturas costeiras	Estruturas pequenas, pouco significativas	Presença de quebra-mares, esporões, molhes, etc.

Fonte: Adaptado de Sousa, et. al. 2013.



#### 4.7. Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)

O índice pode ser classificado em três graus de vulnerabilidade à erosão (baixa, moderada ou alta, a partir dos valores obtidos para os indicadores de erosão analisados. Assim, foram adotados valores numéricos para os resultados, sendo correspondente a variável: 0 = baixa, 5 = moderada e 10 para alta vulnerabilidade.

Os resultados obtidos são aplicados na equação 2 (Sousa et. al. 2013), que resulta no índice (I), de acordo com os 10 parâmetros de entrada no modelo. Com isso temos a equação 3:

$$I = \sum_v \left( \frac{1}{n_i} \right) * \sum_i x_i \quad (2)$$

Onde,  $n_v$  é o número de variáveis,  $n_i$  o número de indicadores de determinada variável e  $x_i$  é a soma dos indicadores. O índice é obtido através da média aritmética dos indicadores.

Em resumo, os indicadores classificaram o índice em três intervalos, com valores:  $IVC < 3$  para vulnerabilidade baixa,  $3 < IVC < 7$  para vulnerabilidade moderada e  $IVC > 7$  para vulnerabilidade alta.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Variação da Linha de Costa

A Figura 5 representa a combinação dos resultados dos indicadores de vulnerabilidade estudados para a região metropolitana do litoral oeste de Fortaleza. O indicador de variação da linha de costa apresentou valores menores (erosão) na região correspondente ao setor I, com valores de taxa de variação da linha de costa de -5,03 m/ano. O setor II apresentou os maiores valores de taxa de variação da linha de costa com máxima de 8,00 m/ano (acresção) e o setor III apresentou uma menor amplitude com relação aos valores brutos variando entre -2,76 e 1,88 m/ano. (Figura 6)

Em termos percentuais o Setor I destaca-se por apresentar 66,14% da sua área correspondente a erosão, 31,92% correspondente a estabilidade e 1,94% correspondente a acreção. O setor II apresenta como situação dominantes o percentual de pontos com acreção sendo de 52,07% do total de sua área, 30% do setor II encontra-se em estabilidade e somente 17% é considerado com erosão. O setor III apresenta valores 59,36%, 34,81% e 5,83%, da sua área, de erosão, estabilidade e acreção, respectivamente.

Figura 5 Síntese do resultado dos indicadores avaliados e classificados de acordo com três graus de vulnerabilidade à erosão

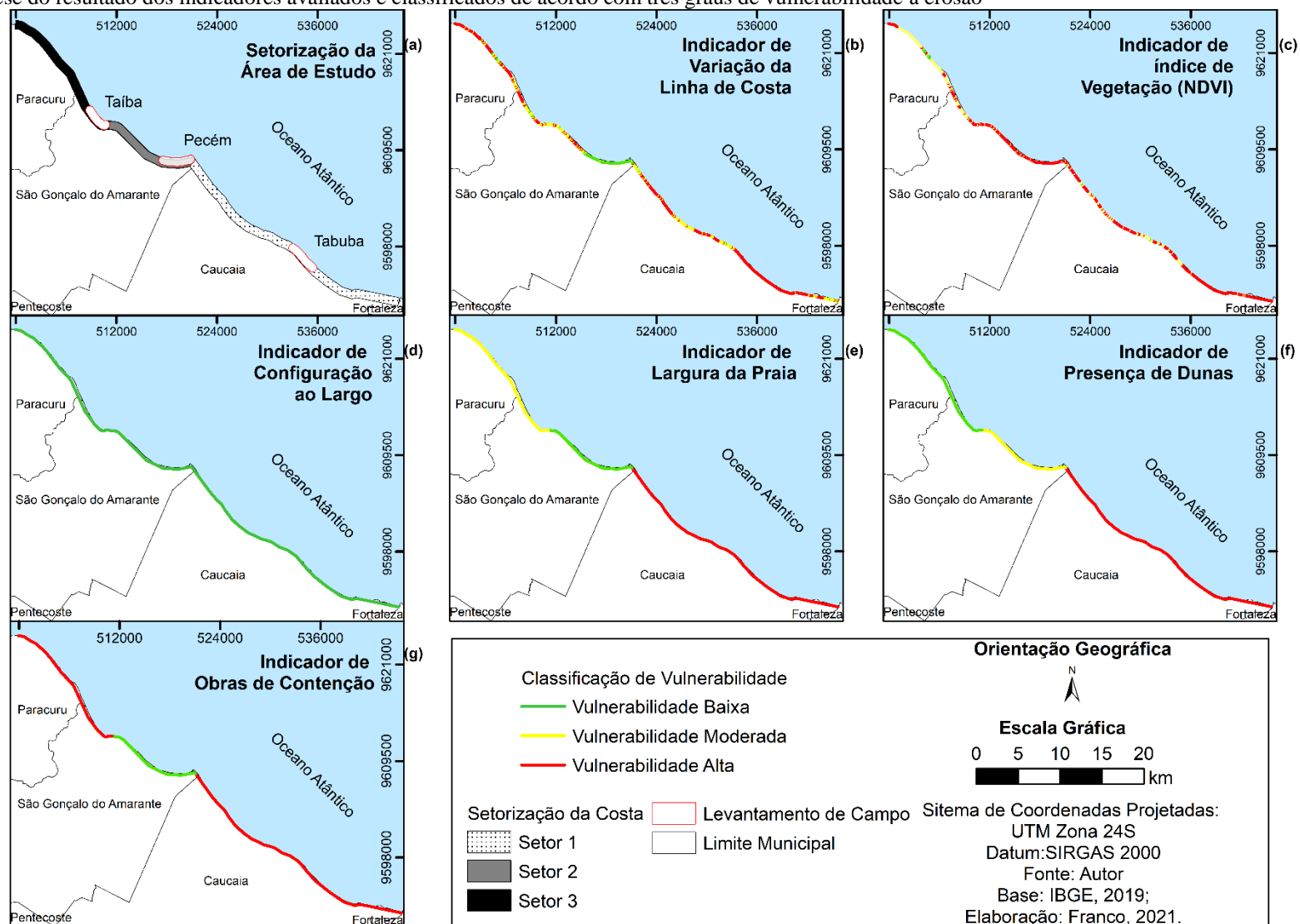
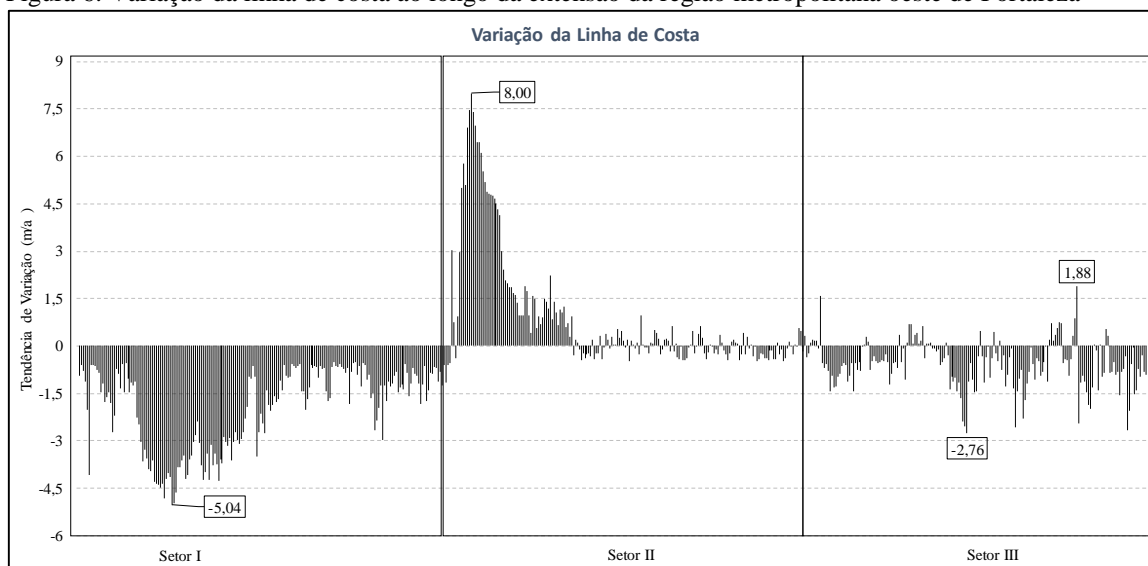


Figura 6. Variação da linha de costa ao longo da extensão da região metropolitana oeste de Fortaleza



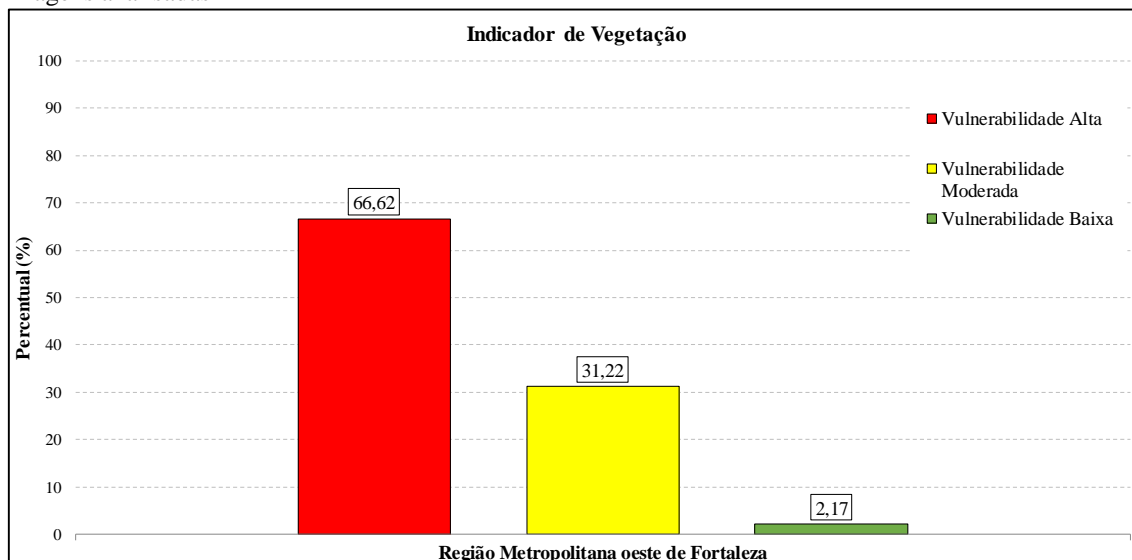
Fonte: Autor,2021

## 5.2. NDVI distribuição espacial

Neste estudo o índice de vegetação por diferença normalizada, neste estudo, visa fornecer informações sobre as da vegetação (Figura 5 c) em uma média de tempo de três décadas (Tabela 1). Os valores analisados foram extraídos em intervalos de 100 metros ao longo da linha de costa.

As respostas espectrais da vegetação obtidas através da média das imagens analisadas apontam que 66,62% da extensão da região estudada apresenta valores baixos de NDVI ( $<0,2$ ) sendo então o mesmo percentual classificado como de vulnerabilidade alta a erosão. Assim, a extensão que apresentou valores intermediários, variando entre 0,2 e 0,5 de NVI, foi de 31,22 % e, portanto, sendo classificado como de vulnerabilidade moderada. Com isso os valores que apresentaram valores altos de NDVI ( $>0,5$ ) foram os menos expressivos com apenas 2,17%

Figura 7 Percentual do grau de vulnerabilidade a erosão para o indicador de NDVI a partir da média das imagens analisadas



Fonte: Autor, 2021

### 5.3. Indicadores de Erosão

Os indicadores de erosão: Configuração ao largo, largura da praia, presença de dunas e obras de engenharia costeira apresentaram diferentes classificações nos setores I, II e III e estão expressos na Figura 5 c,e,f,g.

O setor I destaca-se por se o setor com maior percentual de erosão, com isso, os indicadores mapeados de presença de dunas, largura da praia e obras de engenharia costeira foram identificadas como de alta vulnerabilidade. Neste setor foi identificado ausência de dunas e presença de muros de contenção. Sendo, portanto, portador de maiores valores percentuais de curto comprimento da largura de praia com 95% dos seus *transectos* entre o comprimento considerado de vulnerabilidade alta (Tabela 3). O indicador de Configuração ao largo apresentou vulnerabilidade baixa para o setor I, principalmente, devido presença de rochas na face praial e em região submersas.

O setor II apresenta resultados de vulnerabilidade baixa, para os indicadores de erosão mapeados (configuração ao largo, largura da praia e obras de engenharia costeira). O indicador configuração ao largo apresentou baixa vulnerabilidade devido a presença do *pier* de atração do porto do Pecém, que atenua a ação de ondas registradas nessa praia (Duarte et. al., 2018). A partir do mapeamento realizado pode-se verificar que o indicador de presença de dunas apresentou comportamento de vulnerabilidade moderada, em função da presença de dunas esparsas, e em função de sua localização, a retaguarda do ambiente praial.

Morais et al. (2018) relaciona as dunas dessa praia a formação do grupo barreiras. Para o indicador de largura da praia este setor foi o que apresentou os maiores comprimentos de *transecto* com 87% maiores que 135 m (Tabela 3).

O setor III apresentou vulnerabilidade baixa, para configuração a largo e presença de dunas, devido um sistema de dunas frontais bem definido em grande parte da extensão da linha de costa e por apresentar rochas na face praial, que funcionam como atenuador da ação de ondas (Pinheiro 2016, Morais, 2018). Quanto a largura da praia a maioria dos *transectos* realizados estão dentro do comprimento considerado moderado (66,67%), portanto esse parâmetro foi classificado como de vulnerabilidade moderada. No entanto, 1/3 dos *transectos* apresentam comprimentos considerados de alta vulnerabilidade (Tabela 3).

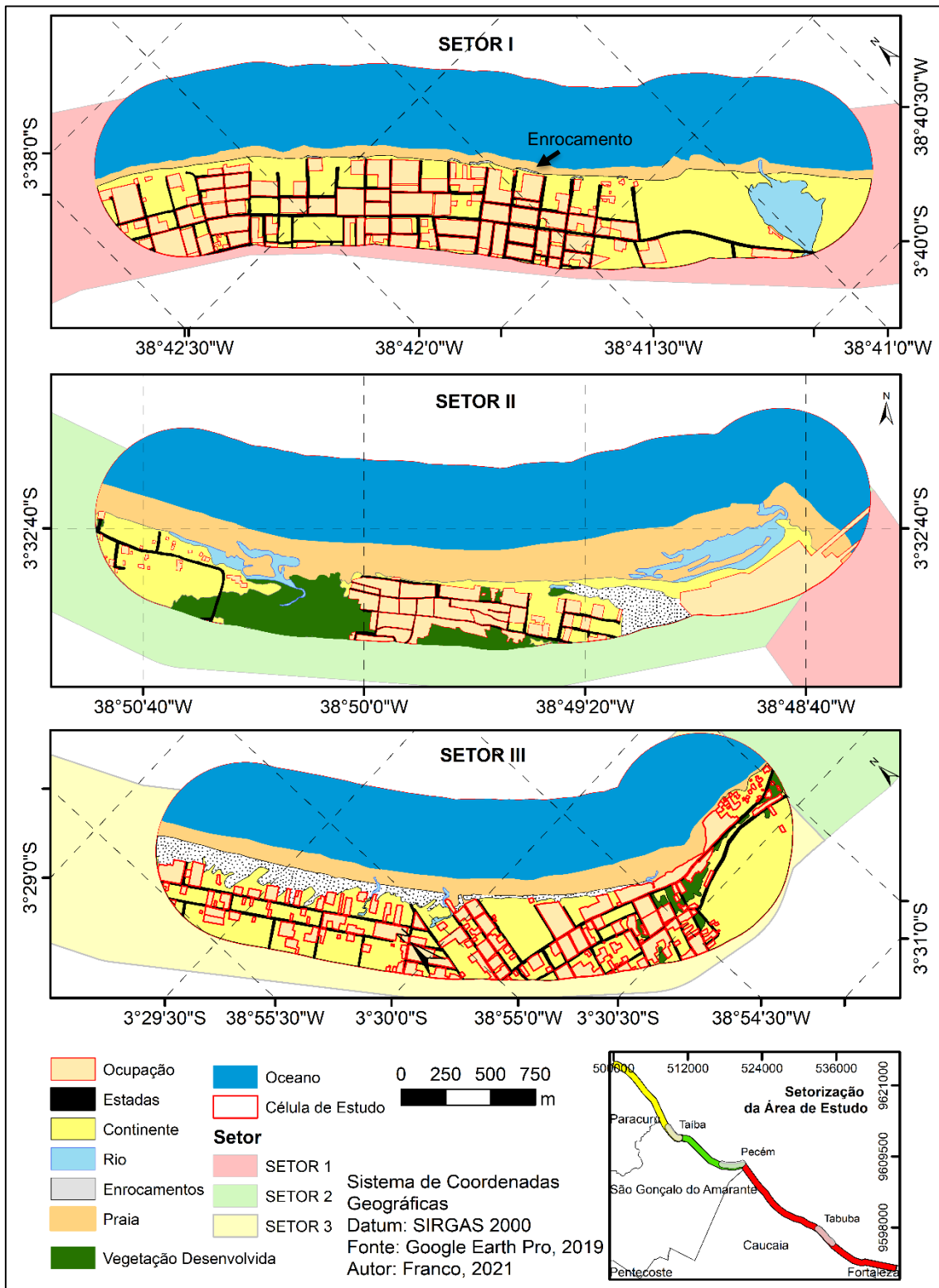
Quanto ao indicador de obras de engenharia costeira não foi possível identificar nenhuma estrutura dentro da célula costeira estudada devido a escala de mapeamento. No entanto, a partir da saída de campo foi possível observar a construção de muros de contenção para a prevenção de processos erosivos em construções da orla e, por tanto, este indicador foi classificado como de vulnerabilidade alta. A Síntese dos resultados da classificação da célula costeira estuada nos três setores encontram-se expressos na Figura 8.

Tabela 3 Percentual da classificação do indicador de largura da praia resultante do comprimento dos transectos estabelecidos nas células costeiras estudadas nos diferentes setores.

Indicador de Largura da Praia (%)			
	Setor I	Setor II	Setor III
Vulnerabilidade Alta	96,55	0	29,17
Vulnerabilidade Moderada	3,45	12,50	66,67
Vulnerabilidade Baixa	0	87,50	4,17

Fonte: Autor,2021

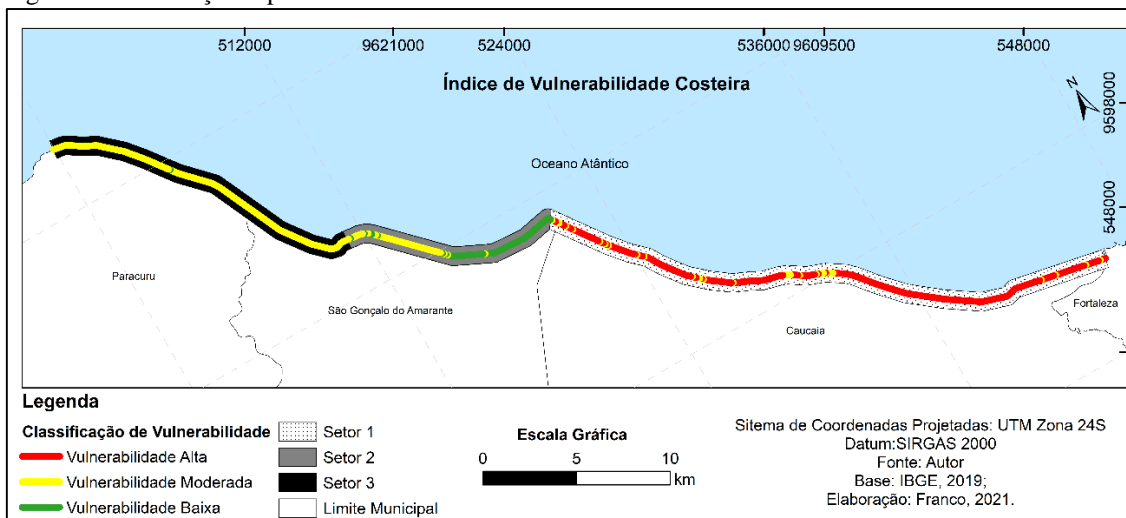
Figura 8 Síntese dos resultados do mapeamento dos indicadores de erosão em células costeiras dos setores estudados



#### 5.4. Índice de Vulnerabilidade Costeira

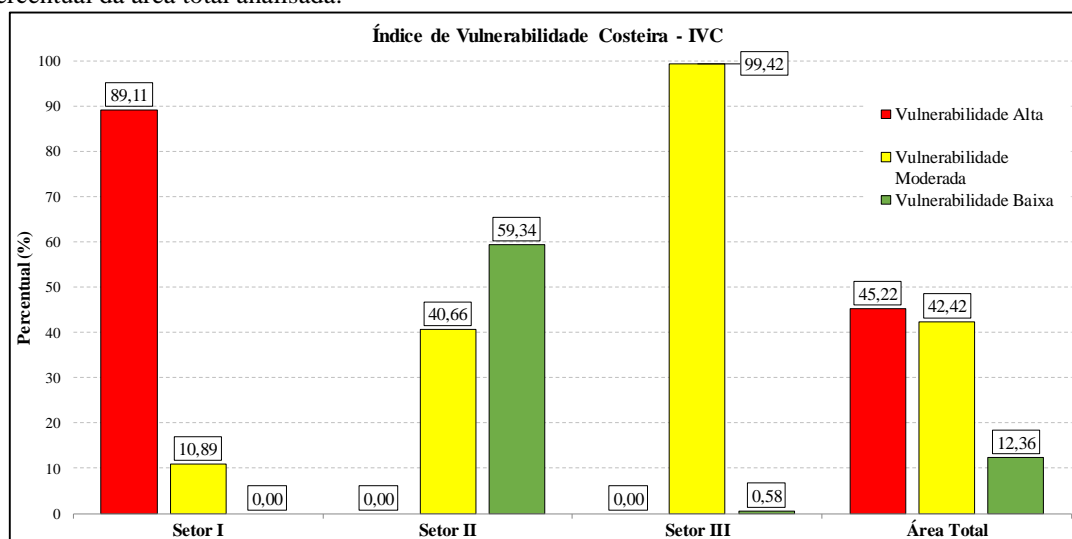
A partir da análise dos indicadores foi possível elaborar o índice de vulnerabilidade costeira para os setores estudados. A resolução espacial dos resultados foi de 100 metros para o IVC e encontra-se apresentados na figura 9.

Figura 9. Distribuição espacial do resultado do cálculo do índice de vulnerabilidade Costeira.



Os setores estudados apresentaram predominâncias distintas no valor percentual para o grau de vulnerabilidade a erosão, sendo de vulnerabilidade alta (89,11%), vulnerabilidade baixa (59,34%) e vulnerabilidade moderada (99,42%) para os setores I, II, III, respectivamente (Figura 10). Quando agrupados os resultados são respectivamente de 45,22% (27,05 km), 42,42% (25,38 km) e 12,36% (7,40 km) para as classificações de vulnerabilidade alta, moderada e baixa.

Figura 10. Valores percentuais do resultado do índice de vulnerabilidade costeira por setor e valor percentual da área total analisada.



## 6. DISCUSSÕES

A partir da análise dos indicadores nas praias estudadas foi possível estimar o comportamento da vulnerabilidade à erosão no litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza. O entendimento do comportamento da vulnerabilidade se torna complexo, devido ao número de forçantes dentro do ambiente costeiro (Kantamaneni, et. al. 2018). Sousa et.al. (2013) apontam que o entendimento dos indicadores ambientais permite uma análise individualizada de quais parâmetros corroboram para o aumento da vulnerabilidade à erosão costeira.

A setor I apresenta o maior grau de vulnerabilidade se comparado aos demais setores. Os processos erosivos para essa região encontram-se em estágio latente com uma maior tendência de vulnerabilidade a futuros processos erosivos. O indicador de linha de costa embasa esta afirmação de acosto com os valores médios de variação da linha de costa que chegam a aproximadamente -5 m/ano.

Em contrapartida, o Setor II embora apresente algumas regiões com processo erosivos e alguns indicadores classificados como de vulnerabilidade moderada. A maior parte da sua extensão apresentou condições que tornam o ambiente praias pouco vulnerável a eventos erosivos futuros com sendo a praia com maiores valores para o indicador de largura de praia e também a maior taxa de variação de linha de costa com aproximadamente 5 m/ano.

O setor III embora apresente indicadores de erosão, apresenta valores de variação em metros da linha de costa menores que no setor I. O indicador de presença de dunas é



importante para essa região devido a sua extensão que fornece mais estabilidade a linha de costa.

A largura da praia e a presença de dunas foram fatores determinantes para o indicativo de vulnerabilidade das praias analisadas. Desta maneira, as praias onde esses parâmetros apresentaram valores mais acentuados assumiram um grau de vulnerabilidade com tendência a ser aumentado.

Kantamaneni, (2018) afirma que em via de regra, locais com ausência de dunas são mais vulneráveis. Outros autores também encontram relação entre a variação desses indicadores e o grau de vulnerabilidade da praia, Sousa et. al. (2013); Ribeiro et. al. (2013).

No setor II a construção do porto do Pecém foi essencial para determinação do grau de vulnerabilidade apresentada para praia, atualmente. Essas alterações antrópicas resultaram em mudanças na dinâmica costeira local alterando os regimes naturais de acreção e erosão dos sedimentos marinhos (Duarte et. al.2018).

A aplicação do NDVI apresenta importância para o entendimento da vulnerabilidade pois fornece informações sobre as condições da vegetação, no qual pode apresentar proteção ao ambiente praias devido a preservação de ambiente móveis (Gonçalves et. al. 2019, Amaral et al., 2016.) No ambiente de estudo foi possível identificar um maior percentual de extensão com baixos valores de NDVI e semelhante aos valores encontrados, entre 2005 e 2015, por Araújo et.al.(2019) para o litoral do Piauí.

O setor III foi o que apresentou menor média para esse indicador, fato esse provavelmente, relacionado ao desenvolvimento do sistema de dunas frontais neste setor e, conseqüentemente, aos baixos valores registrados no resultado do NDVI e suas respectivas associações a corpos d'águas intermitentes.

O indicador de variação da linha de costa se mostra o mais importante para o entendimento da vulnerabilidade na região metropolitana oeste de Fortaleza, devido a diferentes características dos setores analisados. Os resultados se mostram semelhantes aos encontrados por Luijendijk et al., (2018) quando comparados em termos de tendência (m/ano) que registram valores variando entre 2 e 5 m/ano.

Por fim, a avaliação do ambiente estudado pelo método empregado apresenta uma resposta rápida e de baixo custo para as forças controladoras dos processos erosivos. O índice permite a avaliação de risco em escala local individualizada, pois identifica

locais vulneráveis, facilitando o desenvolvimento de estratégias de gestão para melhorar a tomada de decisão mediando eventos erosivos de grande escala.

## **7. CONCLUSÃO**

Este estudo teve por finalidade o mapeamento e a determinação do grau de vulnerabilidade do litoral oeste da região metropolitana de Fortaleza. Portanto, a partir da análise do índice de vulnerabilidade costeira (IVC) para aproximadamente 60 km de extensão o de litoral, foi possível identificar que 27,05 km apresentam um grau de vulnerabilidade a erosão classificado como alto.

De todos os setores analisados a região do setor I, que compreende o município de Caucaia, apresenta maior tendência para um grau de vulnerabilidade alto à erosão, visualizado nos resultados mais negativos para o recuo da linha de costa, com pontos de até -5 m/ano.

O setor II se comporta de maneira distinta dos demais setores apresentando progradação da linha de costa e valores de variação da linha de costa com resultados de até 8 m/ano. Provavelmente relacionado a alteração da dinâmica costeira gerada pela criação do porto do Pecém.

E o setor III apresenta uma tendência moderada para o grau de vulnerabilidade à erosão visto que é um setor dominado por um extenso campo de dunas que assegura maiores estabilidade de variação da linha de costa se comparado aos demais setores.

O resultado obtido através do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) proposto aponta que pelo menos 45% do litoral estudado apresenta um indicativo de vulnerabilidade alta à erosão. E a partir da integração de um conjunto de dados envolvendo a variação da linha de costa, NDVI e aspectos geomorfológicos foi apontando regiões que necessitam de ações de conservação e preservação ambiental. Revelando, portanto, a importância da gestão integrada para a zona costeira.

O presente estudo não fez uso de indicadores que levam em consideração processos costeiros (ondas) o que, provavelmente, resultaria em valores mais elevados de vulnerabilidade para as praias. Contudo, os indicadores analisados apresentam grande importâncias para a gestão costeira e respondem as condições atuais do ambiente de maneira rápida e de baixo custo.

Como recomendações para estudos futuros destacam-se a qualidade de mineração de dados para a entrada para o cálculo do IVC, visto que os resultados obtidos através deste método dependem diretamente disto. As variações de maré se mostram um fator limitante para aquisição de imagens de satélite com as mesmas condições, podendo serem corrigidas a partir da aquisição de dados *in situ*, como declividade da praia.

No entanto, o estudo fornece subsidio para a tomada de decisão de medidas mitigatórias tanto para as praias estudadas quanto para demais praias do litoral oeste do estado do Ceará com condições semelhantes aos indicadores analisados. Além disso, embora algumas praias estudadas apresentem vulnerabilidade baixa e moderadas, eventos de mudanças climáticas, intervenções inadequadas e eventos extremos podem influenciar negativamente a região estudada.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar, P. F.; EL-Robrini, M.; Freire, G. S. S.; Carvalho, R. G. Morfodinâmica de praias dominadas por mesomares na Planície Arenosa de Almofala, NW do Ceará (Brasil). *Pesquisas em Geociências*, v. 40, n. 1, p.61-74, 1 maio 2013.
- Alexandrakis, G., & Poulos, S. E. An holistic approach to beach erosion vulnerability assessment. *Scientific Reports*, 4, 6078. 2014.
- Almeida, L. P.; Oliveira, I. E. de; Lyra, Rodrigo; Dazzi, R. L. S.; Martins, V. G.; Klein, A. H. da F. Coastal Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE): shoreline management module. *Environmental Modelling & Software*, [S.L.], v. 140, p. 105033, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105033>.
- Amaral, A. C. Z., Corte, G. N., Denadai, M. R., Colling, L. A., Borzone, C., Veloso, V., et al. (2016). Brazilian sandy beaches: Characteristics, ecosystem services, impacts, knowledge and priorities. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(SPE2), 5–16
- Araujo, I; Gomes, É; Gonçalves, R; Queiroz, H. Estimativa do Índice de Vulnerabilidade à Erosão Costeira (IVC) para o Litoral do Piauí, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 20, n. 1, p. 105-118, 2 jan. 2019.
- Awange, J.L.; Saleem, a.; Konneh, S.S.; Goncalves, R.M.; Kiema, J.B.K.; Hu, K.X.. Liberia's coastal erosion vulnerability and LULC change analysis: post-civil war and ebola epidemic. *Applied Geography*, [S.L.], v. 101, p. 56-67, dez. 2018. Elsevier BV.
- Birkmann, J. Risk and vulnerability indicators at different scales: applicability, usefulness and policy implications. *Environmental Hazards*, v. 7, p. 20–31, 2007.
- Cai, F.; Su, X.; Liu, J.; Li, B.; Lei, G. Coastal erosion in China under the condition of global climate change and measures for its prevention. *Progress in Natural Science*, 2009.05.034.

- Calliari, L. J.; Muehe, D.; Hoefel, F. G.; Toldo Júnior., Morfodinâmica: uma breve revisão. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 51, n. 1, p. 63-78, 2003.
- Chouhan, R; Rao, N. Vegetation Detection in Multispectral Remote Sensing images: Protective Role-Analysis of Vegetation i. 0042 Indian Ocean Tsunami. PDPM Indian Institute of Information Technology. 2011.Cogswell, A., B.J.W., Greenan, Greyson, P. *Ocean Coast Manag.* 160 (46), 51. 2018.
- Cowell, P.J.; Thom, B.J. Morphodynamics of coastal evolution. In: Carter, R. W. G.; Woodroffe, C. D. *COASTAL EVOLUTION: Late Quaternary shoreline morphodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, Cap. 2. p. 33-59, 1994.
- De Andrade, T. S., Sousa, P. H. G. de O., & Siegle, E. Vulnerability to beach erosion based on a coastal processes approach. *Applied Geography*, 102, 12–19. 2019.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. Tábua das marés para 2019. Porto do Pecém (Estado do Ceará). Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 31 maio 2019
- Dias, I C C M; A Rocha-Barreira, C de. Comportamento Morfodinâmico da Praia da Taíba, Nordeste do Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, [s.l.], v. 11, n. 4, p.421-431, dez. 2011.
- Duarte, C. R. ; Miranda, F. P. de; Landau, L.; Souto, Silva, M. V.; Sabadia, J. A. B.; Silva Neto, C. Â. da; 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. *International Journal Of Remote Sensing*, [S.L.], v. 39, n. 13, p. 4376-4389, 3 abr. 2018.
- Escudero-Castillo, M.; Felix-Delgado, A.; Silva, R.; Mariño-Tapia, I.; Mendoza, E.. Beach erosion and loss of protection environmental services in Cancun, Mexico. *Ocean & Coastal Management*, [S.L.], v. 156, p. 183-197, abr. 2018.
- Esteves, L., & Finkl, C. The Problem of Critically Eroded Areas (CEA): An Evaluation of Florida Beaches. *Journal of Coastal Research*, 11-18, 1998.Gonçalves et. al. 2019
- Gonçalves, Rodrigo Mikosz; Saleem, Ashty; Queiroz, Heithor A.A.; awange, Joseph L. A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. *Applied Geography*, [S.L.], v. 113, p. 102093-102103, dez. 2019.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., and Moore, R. (2017). Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*.
- Gornitz, V., 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 89, 379–398.
- Hagenaars, G.; Vries, S. de; Luijendijk, A. P.; Boer, W. P. de; Reniers, A. J.H.M.. On the accuracy of automated shoreline detection derived from satellite imagery: a case study of the sand motor mega-scale nourishment. *Coastal Engineering*, [S.L.], v. 133, p. 113-125, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.12.011>.

- IBGE. Manual do Usuário: Aplicativo Online IBGE-PPP. Coordenação de Geodésia, 2017. Acesso em 27 de maio de 2019. <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual\\_ppp.pdf](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/ppp/manual_ppp.pdf)>
- Kantamaneni, K.; Phillips, M.; Thomas, T.; Jenkins, R.. Assessing coastal vulnerability: development of a combined physical and economic index. *Ocean & Coastal Management*, [S.L.], v. 158, p. 164-175, maio 2018. Elsevier BV.
- Koroglu, Aysun; Ranasinghe, roshanka; Jiménez, José A.; Dastgheib, Ali. Comparison of Coastal Vulnerability Index applications for Barcelona Province. *Ocean & Coastal Management*, [S.L.], v. 178, p. 104799, ago. 2019.
- Kumar, T. S., Mahendra, R. S., Nayak, S., Radhakrishnan, K., & Sahu, K. C. (2010). Coastal vulnerability assessment for Orissa state, east coast of India. *Journal of Coastal Research*, 26(3), 523–534.
- Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 1-11, 27 abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>.
- Martins, Karoline Angélica; Pereira, Pedro de Souza; Lino, Anderson Pereira; Gonçalves, Rodrigo Mikosz. Determinação da Erosão Costeira no Estado de pernambuco através de geoindicadores. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S.L.], v. 17, n. 3, p. 533-546, 1 set. 2016.
- Medeiros, E. C. de S., Pantalena A.F.; Miola, B.; Lima, R. S.; Soares, M. de O. Percepção ambiental da erosão costeira em uma praia no litoral do Nordeste do Brasil (Praia da Taíba, CE). *Revista de Gestão Costeira Integrada*, [s.l.], v. 14, n. 3, p.471-482, set. 2014.
- Menezes, A. F.; Pereira, P. de S.; Gonçalves, R. M.; Araújo, T. C. M. De; Sousa, P. H. G. de O. Análise Da Vulnerabilidade À Erosão Costeira Através De Geoindicadores Nas Praias De Piedade E Paiva (PE), Brasil. *Geociências*, v. 37, n. 2, p. 455– 465, 2018.
- Mentaschi, L.; Voudoukas, M. I.; Pekel, J. F.; Voukouvalas, E.; Feyen, L. Global long-term observations of coastal erosion and accretion. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2018.
- Morais, J. O. de; Pinheiro, L. de S.; Pessoa, P. R. S.; Sá-Freire, G. S.; Carvalho, A. M. de; Guerra, R. G. P.; Barros, E. L.; Moura, F. J. M. de. Ceará. In: Muehe, D. (org.). *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial, 2018. Cap. 5. p. 261-287.
- Muehe, D. (Org.). *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Ambiental Territorial, 2018. 759 p.
- Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18–43, 2016.
- Otsu, N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, v. 9, n. 1, p. 62–66, 1979. IEEE.

- Pantusa, D.; D'alessandro, F.; Riefolo, L.; Principato, F.; Tomasicchio, G. Application of a Coastal Vulnerability Index. A Case Study along the Apulian Coastline, Italy. *Water*, v. 10, n. 9, p. 1218, 2018.
- Pinheiro, L. de S.; Morais, Jäder Onofre de; MAIA, Luis Parente. The Beaches of Ceará. In: SHORT, Andrew D.; KLEIN, Antonio Henrique da F. (ed.). *Brazilian Beach Systems*. 17. ed. Sydney: Springer, 2016. Cap. 7. p. 175-200.
- Ribeiro, Juliana dos Santos; Sousa, Paulo Henrique Gomes de Oliveira; Vieira, Danilo Rodrigues; Siegle, Eduardo. Evolução da vulnerabilidade à erosão costeira na Praia de Massaguaçu (SP), Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, [S.L.], p. 253-265, 8 out. 2013. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH).
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Shell, J.A., Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS- 1. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Vol. 1. NASA Scientific and Technical Information Office, Washington, D.C., p. 309–317. 1974.
- Sousa, P. H. G. O.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. G. Vulnerability assessment of Massaguaçu Beach (SE Brazil). *Ocean & Coastal Management*, v. 77, p.24-30, 2013.
- Sousa, Paulo & A. P. Carvalho, D & Pinheiro, Lidriana. A Costa de Paracuru: Turismo, Ocupação e Perfil do Usuário. *Revista de Gestão Costeira Integrada*. 8. 247-258, 2008.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change. *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008*, p. 1278, 2009.
- Viles, H. e Spencer, T. *Coastal problems: geomorphology, ecology and society at the coast*. Hodder Arnold publ., 1995. 36p.
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., Turner, I. L. CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling & Software*, 122, 2019. 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>.
- Vousdoukas, Michalis I.; Almeida, Luis Pedro M.; Ferreira, Óscar. Beach erosion and recovery during consecutive storms at a steep-sloping, meso-tidal beach. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011. v. 37, n. 6, 583-593 p.
- Wolters, M.L., Kuenzer, C.. Vulnerability assessments of coastal river deltas e categorization and review. *J. Coast. Conserv.* 19, 345e368, 2015.
- Wright, D. & Short, A.A. Morphodynamics of beaches and surf zones in australia. In: komar, p.d. (ed.). *Handbook of coastal process and erosion*. Crc press, boca raton, 1993. 35-66 p.
- Wright, L. D.; Short, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Mar. Geol.*, 56(1-4):93-118, 1984.
- Zhu, Z.; Wang, S.; Woodcock, C.E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4–7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, v. 159, p. 269–277, 2015.

## APÊNDICES

Anexo código elaborado para a execução do cálculo de NDVI, a partir da biblioteca virtual do Google Earth Engine.

```
//importações iniciais de coleções e geometria
var l5 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C01/T1_SR"),
    l7 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C01/T1_SR"),
    l8 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR"),
    geometry = ee.Geometry.Polygon(
      [[[-39.006595989591794, -3.3563983744741583],
        [-39.006595989591794, -3.7155150691363774],
        [-38.583622356779294, -3.7155150691363774],
        [-38.583622356779294, -3.3563983744741583]]], null, false);

// função para calculo do Normalized Difference Vegetation Indice (NDVI) para
a Coleção
var app= function (image)
{
  // Computar o NDVI.
  var ndvi= image.normalizedDifference(['nir','red']);
  image = image.addBands(ndvi.rename('NDVI'));
  // return da funcion com índices calculados
  return image;
}

//Normaização das bandas das coleções L5,L7 e L8
var bname = ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2']
var bl5 = ['B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B7']
var bl7 = ['B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B7']
var bl8 = ['B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7']
// renomeação das bandas utilizando uma função
var rename_bands = function (img, input) {
  return img.select(input, bname)
};
var l5n = rename_bands (l5, bl5)
var l7n = rename_bands (l7, bl7)
var l8n = rename_bands (l8, bl8)
```

```

//Criando a união das Coleções Landsat e aplicação de filtros
var Landsat = l5n.merge(l7n.merge(l8n))
  .filterDate('1985-01-01','2020-12-31') //adicionar datas de interesse
  .filterBounds (geometry)
  .filterMetadata ('CLOUD_COVER','LESS_THAN',10)
  .map(app);
//mostrar informações das imagens no console
var size = Landsat.size()
  print("Número de imagens: \n",size)
var SelectImage = Landsat.toList(size)
  print("Imagens Seleccionadas: \n",SelectImage)
// palette de cores para NDVI
var palette = ['FFFFFF', 'CE7E45', 'DF923D', 'F1B555', 'FCD163', '99B718',
              '74A901', '66A000', '529400', '3E8601', '207401', '056201',
              '004C00', '023B01', '012E01', '011D01', '011301'];
              //Gráficos interativos no GEE
// Crie painéis para manter os valores lon / lat.
var lon = ui.Label();
var lat = ui.Label();
// Registre um retorno de chamada no mapa padrão para ser invocado quando o
mapa for clicado.
Map.onClick(function(coords) {
  // Atualize o painel lon / lat com valores do evento de clique.
  lon.setValue('lon: ' + coords.lon.toFixed(2)),
  lat.setValue('lat: ' + coords.lat.toFixed(2));
// Adicione um ponto vermelho para o ponto clicado.
var point = ee.Geometry.Point(coords.lon, coords.lat);
var chart = ui.Chart.image.series(Landsat.select('NDVI'), point);
  chart.setOptions({
    title: 'Série Temporal de NDVI',
    vAxis: {title: 'NDVI'},
    hAxis: {title: 'date', format: 'MM-yy', gridlines: {count: 7}},
  });
// Adicionar chart no mapa.
chart.style().set({

```



```

    position: 'bottom-left',
    width: '500px',
    height: '300px'
  });
  //Refresh do gráfico
  var tamanho =Map.widgets().length()
  print(tamanho)
  if(tamanho > 0){
    Map.remove(Map.widgets().get(0));
  }
  Map.add(chart);
})
// Adicionar mapas no layer-(apenas visualização)
Map.addLayer(Landsat.mean(),{ bands:'red,green,blue'}, 'LANDSAT');
Map.addLayer(Landsat.mean(),{ min: 0, max: 1, bands:['NDVI'], palette: palette },
'NDVI');
//Map.addLayer(geometry) //Mostrar polígono envolvente da area de interesse
//Exportação para o drive
Export.image.toDrive({
  image: Landsat.mean().select('NDVI'),
  description: 'NDVI_data',
  region: geometry,
  scale: 30,
  crs: 'EPSG:4326',
  folder: 'NDVI_LANDSAT',
  max

```