



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROCESSOS EROSIVOS NA REGIÃO COSTEIRA
DO MUNICÍPIO DE FORTIM, CEARÁ - BRASIL**

LUÍSA LINS

BRASÍLIA, DF
2022

LUÍSA LINS

**PROCESSOS EROSIVOS NA REGIÃO COSTEIRA
DO MUNICÍPIO DE FORTIM, CEARÁ - BRASIL**

Monografia apresentada ao Instituto de Geociências
como preenchimento parcial dos requisitos para obter o grau de Bacharel em Geofísica pela Universidade de Brasília.

Orientadora: Profa. Dra. Tati de Almeida

Co-orientador: Profa. Dra. Rejane Ennes Cicerelli

BRASÍLIA, DF
2022

Agradecimentos

Ao encerrar essa etapa da minha história, sinto-me agradecida e nostálgica ao lembrar de todos que contribuíram com essa conquista. Início agradecendo a Deus e a toda espiritualidade, onde esteio a minha fé e devoção.

Aos meus pais agradeço por todo o esforço para garantir que eu estudasse em uma universidade pública com o máximo conforto possível. Aprendi com vocês tudo o que eu sei sobre o amor. A minha mãe, Elizabeth Lins, agradeço por espelhar a sua profissão em mim e ser a minha professora da vida ao ensinar o que é ser forte, determinada e leal. Obrigada pelo exemplo sobre o que é ser mulher! Agradeço ao meu pai, Edson Lins, por toda a doçura e humor por trás desse corpo forte e alto que sempre me protegeu. És responsável por tudo que eu sei sobre altruísmo e compaixão.

Aos meus irmãos mais velhos, Lara e Gabriel Lins, agradeço por deixarem as suas pegadas nos caminhos que eu devo seguir e por sempre acreditarem em meu potencial. Sou grata pelo companheirismo e por todas as histórias que compartilhamos. Obrigada por me ajudarem a crescer. Também sou grata pela minha cunhada Caroline de Melo. Obrigada pela amizade.

No âmbito da Universidade de Brasília, agradeço por ter sido meu lar durante todos esses anos. Espero honrar o nome do ensino público ao colocar em prática os aprendizados adquiridos em toda a minha trajetória estudantil. Agradeço aos professores que me inspiram profissionalmente: à Susanne Maciel, à Mônica Von Huelsen e ao Marco Ianniruberto e ao coordenador do curso de Geofísica, Elder Yokoyama. Um agradecimento especial à professora e orientadora Tati de Almeida, à coorientadora Rejane Cicerelli por todos os ensinamentos durante esse período final de graduação.

Agradeço ao meu companheiro de curso e de vida, Guilherme Zakarewicz de Aguiar, por toda a leveza e por dividir planos e sonhos comigo. É uma honra ter você como namorado. Obrigada aos meus sogros, Elisabeth Zakarewicz e Farid de Aguiar por me aceitarem de braços abertos na família. Obrigada, Mateus, por ser esse cunhado maravilhoso.

Obrigada aos meus amigos de curso que dividiram e superaram cada desafio: Amanda Wolker, Arthur Chornobay, Bruno Ibias, Gustavo Lopes, Lyara Villanova e Pedro Simon. Dou um foco distinto para a Moara Maria que além do curso, temos muitas coisas em comum. Obrigada por sempre me apoiar e acreditar que sou capaz de alcançar meus objetivos.

Às amigas que cultivo desde a infância: Hillary Almeida, Júlia Lopes e Thatiana Matkiewicz. Agradeço por me acompanharem em cada passo e vibrarem as minhas conquistas.

Luísa Lins

*“A felicidade não é a ausência de conflitos,
mas sim a habilidade de lidar com eles.”*

Autor desconhecido

Resumo

A erosão é um dos problemas mais frequentes em ambientes costeiros e considerada como um fenômeno global. Além dos fatores físicos naturais, algumas atividades antrópicas contribuem com este processo. O estado do Ceará possui uma urbanização acelerada e não planejada nas áreas fontes de sedimento e em margens fluviais, o que gera uma degradação dos recursos naturais. As técnicas de geoprocessamento são comumente utilizadas para o gerenciamento de ambientes costeiros, pois permitem uma análise temporal e espacial por meio de imagens de satélite. Diante desta problemática, este trabalho objetiva utilizar o sensoriamento remoto para diagnosticar os processos erosivos na região de Fortim (CE), observar tendências temporais desde 1985 a 2021 e apontar possíveis fontes causadoras deste fenômeno. Utilizou-se o programa *Google Earth Engine* para obter imagens de satélite armazenadas em nuvem de diferentes anos. Por meio da plataforma CASSIE e da extensão DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*), foi realizada uma análise quantitativa das linhas de costa de maneira automática. Os resultados são apresentados por mapas gerados por meio do programa ArcGIS e por 143 transectos indicativos de erosão que se encontram perpendiculares à linha de costa. Cada classificação de erosão é diferenciada por meio de cores de acordo com valores de taxas de variação da encosta (m/ano). Na região de interesse, 39,16% dos transectos foram classificados como estáveis; 32,17% como criticamente erodidos; 14,69% como erodidos e 13,99% como acrescidos. Até o transecto de número 60, as taxas se mantêm abaixo de $\pm 2,0$ m/ano, com média de -0,08 m/ano. Os transectos 60 e 130 se localizam entre a foz do Rio Piranji e do Rio Jaguaribe, em que há uma forte tendência de recuo da linha de costa. Grande parte destes transectos são classificados como criticamente erodidos, com valor médio de variações igual a -2,2 m/ano. O valor de recuo mais elevado é de -11,78 m/ano, correspondente ao transecto de número 117. Um mapa de uso e cobertura do estado do Ceará foi gerado com o intuito de investigar as possíveis causas da erosão. Notou-se que a prática de aquicultura ao longo do Rio Piranji aumentou cerca de 114,09% em relação ao ano de 1985 e possivelmente está ligada às causas de erosão da região. Outra causa provável da erosão costeira observada na área de estudo é a diminuição das vazões das bacias hidrográficas do Rio Piranji em decorrência do aumento de barramentos artificiais. Sugere-se a aplicação de estratégias de gestão costeira para ordenar a ocupação e investigar a prática desordenada de aquicultura ao longo do rio.

Palavras-chave:

Erosão costeira; geoprocessamento; sensoriamento remoto; linha de costa.

Abstract

The erosion is one of the most frequent problems in coastal environments. Human activities and natural physical factors contribute to this process. The state of Ceará, Brazil, has an accelerated and unplanned urbanization in the areas of sediment sources and river banks, which generates a degradation of natural resources. Geoprocessing techniques are commonly used for the management of coastal environments, as they allow temporal and spatial analysis through satellite images. The objective of this work is using remote sensing to diagnose erosive processes in the region of Fortim (Ceará, Brazil), observe temporal tendencies from 1985 to 2021 and identify possible sources of the phenomenon. The Google Earth Engine program was used to obtain satellite images stored in cloud. An automatic quantitative analysis of the coastlines was performed using the CASSIE platform and the DSAS (Digital Shoreline Analysis System) extension. The results are presented by maps generated using ArcGIS. The 143 transects resulting from the CASSIE analysis indicate different erosion rates (m/year). In the study area, 39.16% of the transects were classified as stable; 32.17% as critically eroded; 14.69% as eroded and 13.99% as accreted. For transects 1 to 60, the rates vary below ± 2.0 m/year, with an average of -0.08 m/year. Transects 60 and 130 are located between the mouth of the Piranji and Jaguaribe rivers, where the coastline presents a strong tendency of sediment dispersing. Most of these transects are classified as critically eroded, with an average value of variations equal to -2.2 m/year. The highest erosion rate is -11.78 m/year, corresponding to transect number 117. A Ceará's land-use/land-cover map was generated in order to assess the possible erosion causes. It was noted that aquaculture practice along the Piranji River increased 114.09% compared to 1985. Thus, it is possibly associated with the region's erosion causes. Another probable cause of the coastal erosion observed in the study area is the decrease in the flows of the Piranji River basins as a result of the increase in artificial damming. Suggestions to mitigate the problem is the application of coastal management strategies for arranging the occupation and investigating the disorderly practice of aquaculture along the river.

Keywords:

Coastal erosion; geoprocessing; remote sensing; coast line.

Sumário

Sumário	3
Lista de Figuras	4
Lista de Tabelas	7
1 Introdução	9
2 Objetivos	10
2.1 Objetivo Geral	10
2.2 Objetivos Específicos	10
3 Fundamentação Teórica	11
3.1 Sensoriamento Remoto	11
3.1.1 Radiação Eletromagnética	11
3.1.2 Fontes de Radiação Eletromagnética	14
3.1.3 Atenuação Atmosférica	16
3.1.4 Alvos e o Comportamento Espectral	17
3.1.5 Sistema Sensor	18
3.2 Google Earth Engine	21
3.3 ArcGis	22
3.4 Coastal Analyst System from Space Imagery Engine	24
3.5 Erosão Costeira	24
4 Materiais e Métodos	28
4.1 Área de Estudo	28
4.1.1 Aspectos Dinâmicos	29
4.1.2 Geologia Regional	33
4.2 Aquisição de Dados	34
4.3 Uso e Cobertura do Solo	41
4.3.1 Elaboração do Buffer	42
5 Resultados e Discussões	43
5.1 Linha de Costa e Transectos	43
5.2 Uso e Cobertura do Solo	53
5.3 Análise da Prática de Aquicultura e Região Erodida	58
6 Conclusão	61
Referências Bibliográficas	63

Lista de Figuras

1	Propagação de uma onda eletromagnética. Adaptada de Menezes e Almeida (2012).	12
2	Trajectoria esquemática para o comportamento de REM.	13
3	Espectro de cores resultante de um prisma (efeito da difração).	14
4	Espectro eletromagnético com diferentes energias.	15
5	Assinatura espectral para determinados alvos. Retirado de Curityba et al. (2007).	16
6	Assinatura espectral para determinados alvos. Adaptado de Rosa (1990).	17
7	Exemplo de diferentes resoluções espaciais. Retirado de Jensen (2000).	20
8	Visão geral da plataforma <i>Google Earth Engine</i>	21
9	Mapa de delimitação da zona costeira brasileira em 2018. Retirado de Cavalcante e Aloufa (2018).	25
10	Marcos legais de Gestão Costeira no Brasil. Retirado de Guerra (2018).	26
11	Mapa de localização da área de estudo. A área de interesse é destacada pelo retângulo vermelho.	28
12	Esboço da refração em frente ao vilarejo de Pontal de Maceió - Fortim. As setas vermelhas indicam o direcionamento dos vetores de energia que geram o processo destrutivo da costa. Retirado de Moraes et al. (2002).	29
13	Síntese da movimentação da ZCIT. Retirado de Martin e Dominguez (1994).	30
14	Mapa Geológico Simplificado do estado do Ceará. Retirado de IPECE (https://www.ipece.ce.gov.br/).	33
15	(a) Satélites disponíveis na plataforma CASSIE. (b) Definição da área de interesse a ser estudada.	34
16	(a) Etapa de definição do percentual de nuvens e do período desejado. (b) Seleção das manual imagens disponíveis.	35
17	Imagens do satélite <i>Landsat 5</i> em diferentes anos são apresentadas. (a) Representa a imagem do ano de 1985. (b) Aquisição realizada no ano de 1990. (c) Imagem de 1993. (d) Imagem de 2000.	36
18	(a) Imagem do satélite <i>Landsat 7</i> do ano de 2005. (b) Imagem do ano de 2010. (c) Imagem de 2015. (d) Imagem do ano de 2021.	37
19	Definição da linha de base a ser analisada.	38
20	Definição dos parâmetros necessários para a análise.	39

21	Relatório dos transectos disponíveis para exportação.	40
22	Visão geral da plataforma MapBiomias.	41
23	<i>Buffer</i> gerado utilizando a plataforma ArcGIS em torno do Rio Piranji, Fortim.	42
24	Delimitação das linhas de costa geradas pela plataforma para os anos de 1985 (rosa) e 2021 (vermelho). Note que a delimitação mais recente avançou em relação à de 1985, o que indica deposição de sedimentos.	43
25	Transectos gerados ao longo da linha de costa. Cada cor indica uma diferente taxa anual de variação da encosta a partir do cálculo realizado pela plataforma CASSIE.	44
26	Valores percentuais de cada classe de transectos.	45
27	Exemplo de análise para transectos estáveis e acrescidos (destacados pela seta verde e seta azul, respectivamente).	46
28	Exemplo de análise para transectos erodidos e criticamente erodidos (destacados pela seta amarela e vermelha, respectivamente).	46
29	Taxa anual de variação da linha de costa para cada transecto gerado. Valores positivos indicam avanço da linha de costa (deposição) e valores negativos, recuo (erosão).	47
30	Região destacada representa os transectos 5 a 25.	48
31	Área em destaque para os transectos criticamente erodidos. Transectos de número 70 ao 90 estão em evidência.	49
32	Destaque para os transectos de número 90 a 110.	50
33	Destaque para os transectos de número 110 a 130.	51
34	Destaque para a região final da área em que há predominantemente erosão acrescida (transecto 130 ao 140).	52
35	(a) Mapa do uso e cobertura do solo para o estado do Ceará em 2021. (b) Variação temporal do uso e cobertura do solo do estado do Ceará para os últimos 36 anos.	53
36	Variação da área de aquicultura (m ²) em função do ano para o estado do Ceará.	54
37	Mapa de evolução do padrão de aquicultura na região. Anos de (a) 1985 e (b) 2021.	55
38	<i>Buffer</i> obtido por meio do ArcGIS. Comparação entre as feições de aquicultura em (a) 1985 e (b) 2021 ao longo do Rio Piranji.	56
39	Histogramas gerados para as áreas de Rios e Lagos e Aquicultura nos anos de 1985 e 2021.	57
40	Em azul, variação da área destinada à aquicultura no município de Fortim. Em vermelho, média das distâncias da linha de base dos transectos próximos à foz do Rio Piranji.	58

41	Distância média da linha de costa (m) em função do aumento da área de aquicultura (m ²).	59
----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

Lista de Tabelas

1	Diferentes cores e os respectivos intervalos espectrais.	15
2	Principais partes de um sensor e suas respectivas funções. . . .	19
3	Informações das imagens selecionadas.	35
4	Parâmetros da classificação dos transectos. Modificado de Almeida et al. (2021).	45

Lista de Abreviações

GIS - *Geographic Information System*

GEE - *Google Earth Engine*

API - *Application Programming Interface*

CASSIE - *Coastal Analyst System from Space Imagery Engine*

SR - *Sensoriamento Remoto*

REM - *Radiação Eletromagnética*

NOAA - *National Oceanic and Atmosphere Administration*

ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

MODIS *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

GLAD - *Global Land Analysis & Discovery*

JRC - *Joint Research Centre*

ESRI - *Environmental System Research Institute*

DSAS - *Digital Shoreline Analysis System*

ZCIT - *Zona de Convergência Intertropical*

NDWI - *Índice de Água de Diferença Normalizada*

SCE - *Shoreline Change Envelope*

NMS - *Net Shoreline Movement*

EPR - *End Point Rate*

LRR - *Linear Regression Rate*

1 Introdução

Em zonas costeiras, a erosão é um dos problemas mais frequentes, considerado como um fenômeno global a partir da excessiva exploração antrópica dos seus recursos naturais e de questões físicas, oceanográficas, meteorológicas e fluviais (Gruber et al., 2003). Estudos sobre a erosão costeira visam compreender os processos físicos. Entretanto, diante à intensa urbanização das orlas, tais estudos recebem uma nova vertente com o enfoque sócio-econômico (Lins-de Barros, 2005).

Ao longo do tempo, o Brasil desencadeia uma urbanização acelerada não planejada e uma consequente degradação dos recursos naturais (de Gouveia Souza, 2009). Esses processos resultam em grandes prejuízos financeiros, sendo necessárias políticas de planejamento urbano para as orlas costeiras.

No estado do Ceará, os processos erosivos ao longo dos 573 km de costa se apresentam com velocidades e intensidades diferenciadas e são causados por: a) elevação do nível do mar; b) urbanização nas áreas fontes de sedimentos; c) construção de obras portuárias (Morais et al., 2006). A escassez de água no Ceará impulsionou a ocupação em margens fluviais das bacias dos rios Pirangi e Jaguaribe e foi um agravante a curto prazo no recuo da linha de costa (Pinheiro et al., 2008).

As técnicas de geoprocessamento são utilizadas com frequência para o gerenciamento de ambientes costeiros, pois permitem uma análise temporal por meio de imagens de satélite *Landsat* (Thieler et al., 2009). Apesar dos estudos realizados com técnicas de GIS (*Geographic Information System*) serem proveitosos, possuem a necessidade de grande capacidade computacional. Em contrapartida, ferramentas que utilizam processamento e armazenamento em nuvem surgem como uma alternativa para reduzir tal necessidade.

Atualmente, o *Google Earth Engine* (GEE) é um dos principais programas de processamento de dados geográficos com computação em nuvem (Almeida et al., 2021). A plataforma possui uma alta capacidade de armazenamento e processamento de imagens de satélites, em que é possível realizar diversas análises a nível global e regional com maior velocidade computacional que as técnicas de GIS convencionais.

O GEE permite livre acesso ao API (*Application Programming Interface*), o que possibilita ao usuário utilizar algoritmos já disponíveis. A ferramenta CASSIE (*Coastal Analyst System from Space Imagery Engine*) surgiu a partir de pesquisadores que utilizaram este programa para a análise de linhas de costa (Almeida et al., 2021).

O presente trabalho tem como objetivo principal utilizar técnicas computacionais do CASSIE para diagnosticar os processos erosivos na região costeira do município de Fortim (CE) e observar tendências espaciais e temporais.

A leitura do mapa de uso e cobertura do estado do Ceará disponível em <http://mapbiomas.org> será válida para uma análise quantitativa e qualitativa dos possíveis fatores naturais e antrópicos que contribuem para os processos erosivos.

2 Objetivos

2.1 Objetivo Geral

Diagnosticar os processos erosivos na região costeira do município de Fortim, Ceará, e observar tendências espaciais e temporais nos últimos 36 anos.

2.2 Objetivos Específicos

1. Definir a região litorânea no Nordeste que sofre impacto por processos erosivos;
2. Analisar a tendência temporal do comportamento da encosta;
3. Diagnosticar e identificar possíveis fontes causadoras dos impactos ambientais.

3 Fundamentação Teórica

Nesta seção, são apresentados os principais conceitos necessários para a compreensão da aplicação das tecnologias do Sensoriamento Remoto à análise da erosão costeira.

3.1 Sensoriamento Remoto

Na literatura, é possível obter diferentes definições para sensoriamento remoto (SR). Dentre elas, a definição que mais se aproxima em termos científicos é a ciência que utiliza as respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres para a obtenção de imagens da superfície terrestre (Meneses e Almeida, 2012).

A fonte de radiação eletromagnética, a atmosfera, o alvo e o sensor são elementos essenciais para as técnicas de sensoriamento remoto (Silva, 2009). Sendo assim, se torna indispensável o conhecimento teórico dos assuntos mencionados.

3.1.1 Radiação Eletromagnética

Para um maior entendimento do que se trata a radiação eletromagnética (REM), é necessário listar a sua dualidade de comportamento *onda* e *energia*, que são formuladas pelos modelos ondulatórios e corpuscular (Young e Freedman, 2009).

- Modelo Ondulatório

O movimento de uma partícula carregada eletricamente gera um campo elétrico em torno de si e esse movimento, por sua vez, gera um campo magnético (Maxwell, 1954).

A energia eletromagnética independe de um meio material para se propagar e é definida como ondas eletromagnéticas que se propagam na velocidade da luz ($c \approx 300.000$ km/s no vácuo).

A Figura 1 retrata o comportamento de uma onda eletromagnética e os seus parâmetros: comprimento (λ) e frequência (f). O comprimento da

onda eletromagnética é definida pela distância entre dois picos ou dois ventres sucessivos e a frequência se dá pelo número de oscilações que a onda executa em um determinado intervalo de tempo (Halliday et al., 1993).

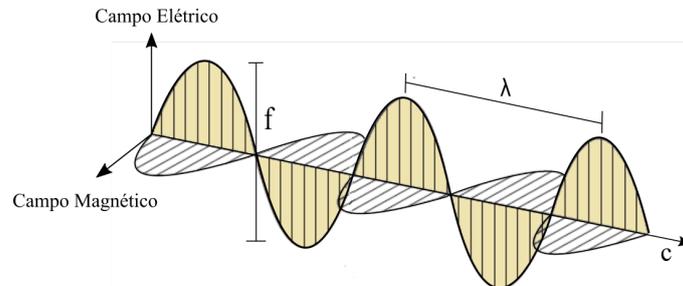


Figura 1: Propagação de uma onda eletromagnética. Adaptada de Meneses e Almeida (2012).

Existe uma relação entre os parâmetros que definem as ondas eletromagnéticas, em que um menor comprimento de onda resulta em uma maior frequência. A seguinte equação indica a lei do comportamento ondulatório:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

em que λ é o comprimento de onda, c é a velocidade da luz e f é a frequência.

Segundo Meneses e Almeida (2012), a resposta da intensidade que um objeto reflete a radiação eletromagnética depende, entre outros fatores, da razão do tamanho da onda e a textura de sua superfície. Essa resposta é conhecida como interação macroscópica. Em outras palavras, as características das imagens levam em consideração a relação entre o tamanho do objeto e da onda.

- Modelo Corpuscular

Apesar do modelo ondulatório descrever satisfatoriamente a propagação da radiação, ainda é necessário abordar outro comportamento para melhor entendimento da absorção e emissão da REM: o modelo corpuscular.

Einstein, em 1905, afirmou que a radiação não se propaga uniformemente pelo espaço, tal como sugere o modelo ondulatório, mas sim por meios de

pacotes conhecidos como *fóton* ou *quanta* (Einstein, 1982). A física quântica, ciência que investiga sistemas físicos em escala atômica ou subatômica, define fótons como partículas mensageiras da onda eletromagnética.

Segundo Young e Freedman (2009), a quantidade de energia emitida (E), recebida ou transmitida está associada ao comprimento de onda (λ) ou frequência (f). Ao relacionar com $f = c/\lambda$ para ondas eletromagnéticas no vácuo (Equação 1), temos a seguinte expressão para a energia de um fóton:

$$E = h \cdot f = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2)$$

em que h é a constante de Planck ($6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s).

Ao considerar a radiação que incide em um material, parte dos *fótons* transfere toda a sua energia à parcela equivalente aos elétrons livres do material. Assim como na Figura 2, parte da energia incidente é completamente absorvida pelo material, enquanto outra parte é refletida e registrada pelo sensor (Moraes, 2002).

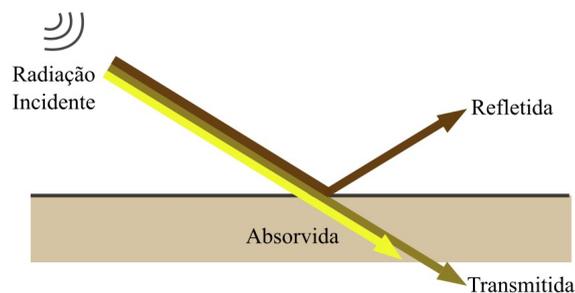


Figura 2: Trajetória esquemática para o comportamento de REM.

Aplicando esta teoria, é possível obter a composição de diferentes materiais diante da quantidade de energia absorvida. (Steffen et al., 1996). Para o sensoriamento remoto, menores comprimentos de onda são mais proveitosos por possuírem maiores energias.

3.1.2 Fontes de Radiação Eletromagnética

A radiação térmica é o resultado do movimento térmico das moléculas de um material. As fontes de radiação eletromagnética são cargas elétricas aceleradas (Halliday et al., 1993).

Para que um corpo seja considerado fonte de energia eletromagnética, basta que ele possua uma temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin). Quaisquer que sejam as fontes, as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo com a velocidade da luz.

A radiação eletromagnética conta com duas principais fontes naturais de energia: o Sol e a Terra. A temperatura da superfície solar é de aproximadamente 6000°C , já a temperatura média da superfície terrestre é de 27°C . (Moraes, 2002) Há uma diferença de duas ordens de grandeza entre as energias da primeira e da segunda fonte. Deste modo, no âmbito radiação eletromagnética, o Sol é a fonte natural mais potente e o responsável pela região espectral do visível.

Apesar de serem de enorme contribuição para o sensoriamento remoto, estas fontes não são capazes de emitir todos os comprimentos de ondas que compõem o espectro eletromagnético (Shimabukuro et al., 1998). Com o objetivo de alcançar maiores intensidades em comprimentos de onda, fontes artificiais foram criadas pelo homem, e.g., o radar.

- Espectro Eletromagnético

O termo surgiu pela primeira vez quando experiências de Isaac Newton em 1672 constataram que, ao atravessar um prisma de vidro, um raio luminoso de luz branca se desdobrava em um feixe colorido (Figura 3).

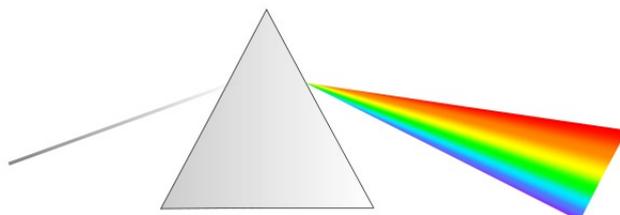


Figura 3: Espectro de cores resultante de um prisma (efeito da difração).

Com o avanço dos estudos a respeito destes assuntos, cientistas afirmam que a energia eletromagnética distribuída em função do seu comprimento de onda ou frequência dá origem ao espectro eletromagnético (Figueiredo, 2005). As regiões do espectro são divididas de acordo com o comprimento da onda, conforme a Figura 4.

Na parte superior da Figura 4, o espectro ilustra diferentes comprimentos de ondas e as regiões em que se encontram, em Hz. Ao observar a parte esquerda da imagem, é possível notar baixas frequências de onda e, a medida que se avança para a direita, surgem ondas com menores comprimentos e maiores frequências (Gaspar, 2013).

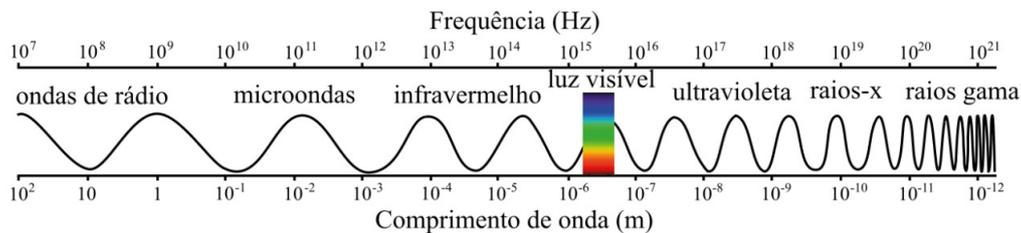


Figura 4: Espectro eletromagnético com diferentes energias.

Como já discutido no tópico anterior, a região do visível é originada pelo Sol e ocupa uma pequena faixa diante do amplo espectro eletromagnético (Francisco de Oliveira, 2004). O conjunto de radiações perceptíveis ao sistema visual humano consiste nos intervalos espectrais destacados na Tabela 1.

Tabela 1: Diferentes cores e os respectivos intervalos espectrais.

Cor	Intervalo Espectral (μm)
Violeta	0,38 a 0,45
Azul	0,45 a 0,49
Verde	0,49 a 0,58
Amarelo	0,58 a 0,6
Laranja	0,6 a 0,62
Vermelho	0,62 a 0,70

Nas técnicas de SR, ao considerar o Sol como fonte, os sensores detectam energia refletida pelos objetos terrestres. Neste caso, o sensoriamento remoto

é realizado na faixa de espectro solar. Em outro cenário, ao considerar a Terra como fonte de energia, os sensores detectam a energia emitida pelos corpos terrestres. Assim, o sensoriamento remoto é realizado na faixa de espectro termal (Shimabukuro et al., 1998).

3.1.3 Atenuação Atmosférica

Para cada comprimento de onda, os diferentes gases presentes na atmosfera terrestre apresentam variações na capacidade de absorção da energia solar incidente e da energia emitida pela superfície terrestre (Moraes, 2002).

Em algumas regiões do espectro eletromagnético, grande parte da radiação incidente é atenuada por moléculas gasosas e pouca energia é capaz de atingir a superfície terrestre. A Figura 5 mostra a relação entre absorção e transmitância de diversos gases presentes na atmosfera.

Diante disto, a atmosfera funciona como uma espécie de filtro das radiações eletromagnéticas. Os autores Meneses e Almeida (2012) afirmam que em média 47% da radiação solar incidente é absorvida pelos materiais da superfície terrestre; 37% é refletida e 16% é absorvida pela atmosfera.

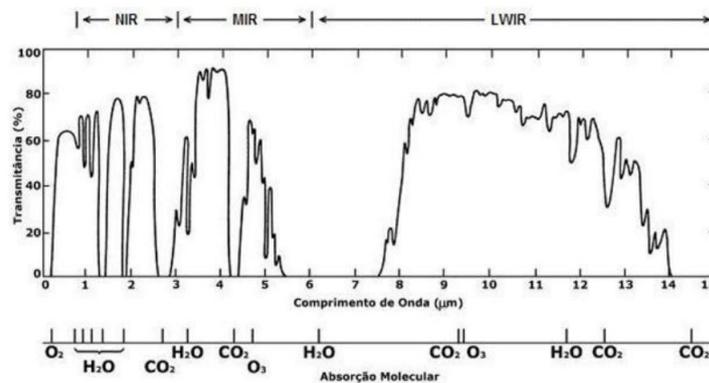


Figura 5: Assinatura espectral para determinados alvos. Retirado de Curityba et al. (2007).

De acordo com os mesmos autores, a absorção é um comportamento prejudicial para o sensoriamento remoto de alta altitude ou orbital, uma vez que o sensor colocado em órbita fica impedido de obter imagens da superfície

terrestre em diversos intervalos de comprimento de onda. Essa problemática é denominada como “bandas de absorção da atmosfera”. As demais regiões onde a radiação consegue alcançar a superfície terrestre sem ser absorvida pela atmosfera são conhecidas como janelas atmosféricas.

3.1.4 Alvos e o Comportamento Espectral

No sensoriamento remoto, os alvos interagem de maneira distinta a depender do comprimento da onda da energia eletromagnética incidente (Figura 6). Devido à essa variação de porcentagem de energia refletida em cada comprimento de onda, é possível reconhecer e distinguir diferentes objetos terrestres e tipos de coberturas de solo (Steffen et al., 1996).

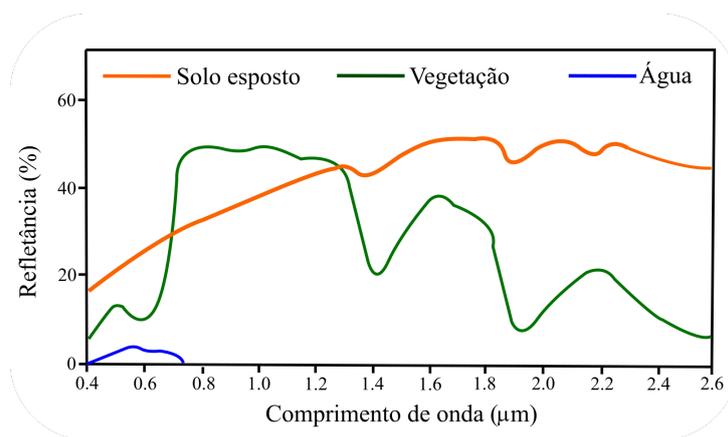


Figura 6: Assinatura espectral para determinados alvos. Adaptado de Rosa (1990).

A Figura 6 mostra como é esperado o comportamento de objetos comuns na superfície terrestre e as suas características básicas em um comportamento espectral. De modo geral, os alvos absorvem ou refletem de modo diferente em cada uma das faixas do espectro.

- Solos

Para determinar a assinatura espectral de um solo, é necessário que haja conhecimento de sua composição física, química, biológica e mineralógica, pois

as combinações e arranjos dos materiais são o que definem o seu comportamento espectral (Silva, 2009). Os constituintes que mais afetam a assinatura do solo são os óxidos de ferro ou por matéria orgânica, além do tamanho de partículas e a umidade do solo.

Baumgardner et al. (1986) propuseram um atlas com curvas espectrais de diferentes solos, cujas informações permitem reconhecer as características dos objetos presentes na superfície terrestre.

- Vegetação

A clorofila é um grupo de pigmentos presentes nas plantas responsável pela alta absorção da radiação eletromagnética. É através do processo conhecido como fotossíntese que os nutrientes chegam até a planta, produzindo sua característica coloração esverdeada (Raven et al., 2007). Por esse motivo, a vegetação conta com uma alta absorção da radiação eletromagnética no espectro do visível.

Os comprimentos de onda infravermelho próximo (até $1,2 \mu\text{m}$) indicam baixa absorção. Nessa região, é o conteúdo de água na vegetação que define as bandas de absorção presentes em sua assinatura espectral.

- Água

A água cobre a maior parte da superfície terrestre e é encontrada na natureza em três estados físicos. Em cada um deles, apresenta um comportamento espectral completamente distinto. Em seu estado líquido, a água apresenta baixa reflectância entre $0,38$ e $0,7 \mu\text{m}$ e máxima absorção acima de $0,7 \mu\text{m}$, sendo o principal elemento observável utilizando as técnicas de SR.

3.1.5 Sistema Sensor

Um sensor remoto pode ser definido como um equipamento capaz de captar a radiação eletromagnética proveniente de um objeto, convertê-la em sinal elétrico para então ser transformado em informações que descrevam as feições do objeto (Slater, 1980).

As principais partes de um sensor e as suas respectivas finalidades são descritas na Tabela 2. Tal descrição foi feita de acordo com o estudo de (Moraes, 2007).

Tabela 2: Principais partes de um sensor e suas respectivas funções.

Parte do sensor	Finalidade
Coletor	Concentra o fluxo de energia proveniente do objeto da amostra no detector.
Filtro	Seleciona a faixa espectral da energia a ser medida.
Detector	Produz sinais elétricos diante da variação das propriedades elétricas de sua composição.
Processador	Amplifica um sinal fraco gerado pelo detector e pela digitalização do sinal elétrico.
Unidade de saída	Registra os sinais elétricos captados pelo detector para posterior extração de informações.

Há diversos aspectos que classificam os sistemas sensores (Francisco de Oliveira, 2004):

a) Fonte de energia

Nesta classificação se encaixam o sistema passivo e o sistema ativo. O primeiro depende da radiação solar refletida ou emitida por qualquer objeto da superfície terrestre para que possa funcionar. Já sensores ativos independem de uma radiação externa, uma vez que são responsáveis pela produção de sua própria fonte. Exemplos deste tipo de sensores são os radares e qualquer câmera fotográfica com *flash*.

b) Região do espectro eletromagnético

Quanto a este tipo de classificação, os sensores se diferenciam de acordo com a banda que operam: na região ótica ou na região de micro-ondas do espectro. Os sensores que atuam na região ótica podem ser subdivididos de acordo com a energia que detectam: sensor de energia solar refletida por objetos e sensor de energia térmica de um objeto.

c) Tipo de transformação

Ao se tratar de transformações sofridas pela radiação detectada, duas subclassificações são conhecidas: sensores imageadores e não-imageadores. Como o próprio nome sugere, um sistema imageador fornece um imagem como produto, enquanto o não-imageador apresenta o resultado em forma de dígitos ou gráficos.

Após as definições dos conteúdos apresentados nos tópicos anteriores, é necessário conceituar os tipos de resolução.

d) Resolução dos sensores

A resolução espacial se relaciona com a capacidade do sensor de distinguir o tamanho dos objetos. Ao definir um valor, será imageado apenas o objeto maior ou igual aquele valor (Francisco de Oliveira, 2004). O detector e a altura do sensor em relação ao objeto são parâmetros essenciais que definem o grau de distinção entre objetos próximos, assim como ilustra a Figura 7.

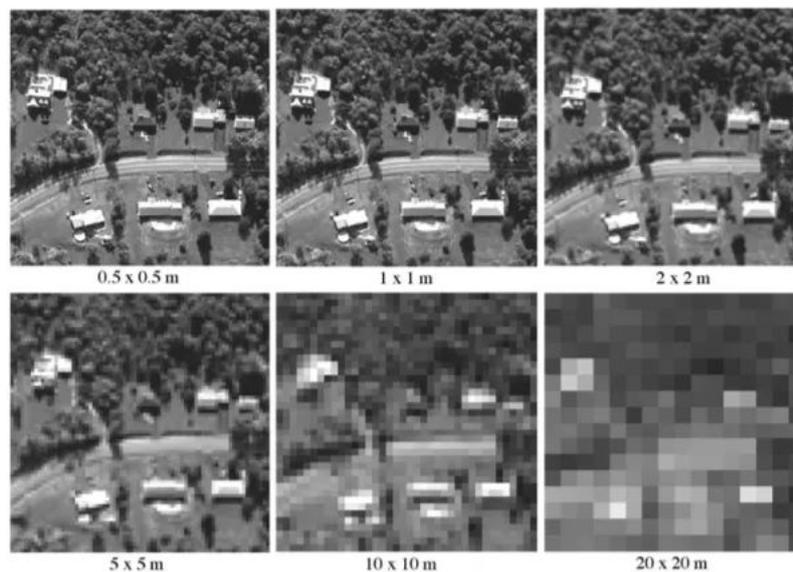


Figura 7: Exemplo de diferentes resoluções espaciais. Retirado de Jensen (2000).

A resolução espectral envolve pelo menos três parâmetros de medida: o número de bandas do sensor, a largura em comprimento de onda das bandas e as posições das bandas no espectro eletromagnético (Meneses e Almeida, 2012). Um sensor com maior número de bandas em diferentes regiões espectrais possui melhor resolução espectral. A largura da banda considera o espectro de refletância e a capacidade de absorção de cada material.

3.2 Google Earth Engine

A plataforma computacional desenvolvida pela empresa *Google™* é voltada para a análise de dados ambientais em escala planetária. O *Google Earth Engine* (GEE) é gratuito para atividades científicas e para pesquisas sem fins lucrativos (Rodrigues, 2018) e traz recursos avançados para uma variedade de soluções de alto impacto. A Figura 8 apresenta a visão geral da plataforma.

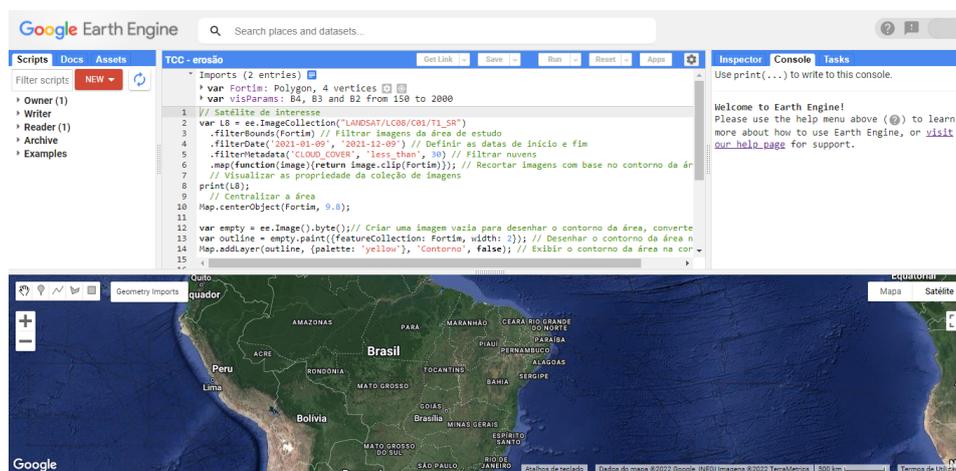


Figura 8: Visão geral da plataforma *Google Earth Engine*.

Imagens de satélite são armazenadas em nuvem de maneira a facilitar o acesso eficiente e rápido a partir de servidores da *Google*, o que possibilita a análise por computadores que não possuem uma grande capacidade de processamento (Gorelick et al., 2017). Uma importante aplicação envolvendo esta plataforma é o monitoramento da perda e ganho da cobertura florestal da superfície terrestre (Campos-Taberner et al., 2018).

O GEE possui um vasto catálogo de dados geoespaciais. Conta com diversas coleções de imagens de satélite como *Landsat*, *Sentinel* e NOAA, além de sensores ASTER e MODIS, assim como produtos MeaSURES (Ganem, 2017). A plataforma também disponibiliza algoritmos na linguagem de programação *JavaScript* de fácil acesso via API, o que facilita a análise de dados estatísticos (Guerra et al., 2017). Além de usufruir dos algoritmos já disponíveis, o usuário pode integrar os seus próprios dados com o banco de dados da nuvem (Ganem, 2017).

- Aplicações científicas

Algumas pesquisas científicas envolvendo o GEE apresentam grande visibilidade. Um exemplo é o monitoramento da perda e ganho da cobertura florestal da superfície terrestre realizada por cientistas da Universidade de Maryland, que deram início ao sistema *Global Land Analysis & Discovery* (GLAD - <https://glad.umd.edu/>). Nesta pesquisa, utiliza-se imagens de satélite para mapear e monitorar a cobertura florestal da Terra diante do desmatamento (Nepstad et al., 2014).

O *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia desenvolveu um estudo com grande repercussão internacional. O trabalho analisou a série histórica de imagens desde 1984 a 2015 para mapear a localização, persistência e sazonalidade de águas superficiais do planeta (Pekel et al., 2016).

No âmbito nacional, o projeto MapBiomass - Mapeamento Anual da Cobertura do Solo do Brasil (<http://mapbiomas.org/>), desenvolvido por empresas de tecnologia e por organizações não-governamentais, utiliza imagens do satélite *Landsat* para produzir mapas de uso e cobertura do solo do Brasil. O estudo permite o mapeamento utilizando diversas classes como vegetação, pastagem, corpos hídricos, formações florestais e savânicas.

3.3 ArcGis

Consiste em um *software* licenciável baseado em GIS, fundado em 1999 pela empresa americana *Environmental System Research Institute* (ESRI).

Neste programa há uma enorme variedade de funções geográficas, em que é possível elaborar e visualizar mapas; compilar dados geográficos; analisar

informações mapeadas e outras aplicabilidades (Awaludin, 2010). Além de funções básicas, o ArcGis conta com extensões que podem ser adicionadas e utilizadas conforme o usuário necessitar.

- Digital Shoreline Analysis System

O *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) é uma extensão de *software* disponível dentro do programa ArcGIS. O DSAS calcula alterações temporais da linha de costa utilizando estatísticas de dados vetoriais (Thieler et al., 2009). Embora a nomenclatura seja baseada para o uso em um ambiente costeiro, o DSAS pode ser utilizado para o cálculo de taxas de mudança para qualquer limite claramente identificado, como limites de geleiras, rios e margens ou limites de uso e cobertura da terra.

3.4 Coastal Analyst System from Space Imagery Engine

Abreviado por CASSIE, o *Coastal Analyst System from Space Imagery Engine* é uma ferramenta *web* de código aberto que utiliza imagens de satélite para mapeamento e análise automática da linha costeira (<https://cassiengine.org/>). O programa foi construído em *JavaScript* utilizando o API do GEE e possui imagens de satélite *Landsat* e *Sentinel-2* (Almeida et al., 2021). A análise das linhas de costa pode ser feita em qualquer região costeira onde exista um limite claro entre água e a terra. Para isso, o CASSIE utiliza a extensão DSAS, em que diversos cálculos estatísticos são realizados.

3.5 Erosão Costeira

De acordo com o Decreto nº 5300 de 7 de dezembro de 2004, a zona costeira consiste em um espaço geográfico onde há a interação entre o ar, o mar e a terra, envolvendo uma faixa marítima e uma faixa terrestre. Muehe (2001) considera a zona costeira como uma das áreas mais dinâmicas do planeta, em que o gerenciamento integrado é necessário para detectar os impactos naturais e antrópicos da erosão costeira.

A costa brasileira possui aproximadamente 8.500 km de extensão ao longo dos 17 estados que compõem o litoral do país. Estima-se uma população em torno de 44 milhões de habitantes, com densidade populacional de 135

hab/km² (Cavalcante e Aloufa, 2018). Em relação à área oceânica, o Brasil possui uma vasta área, tal qual destaca a Figura 9.

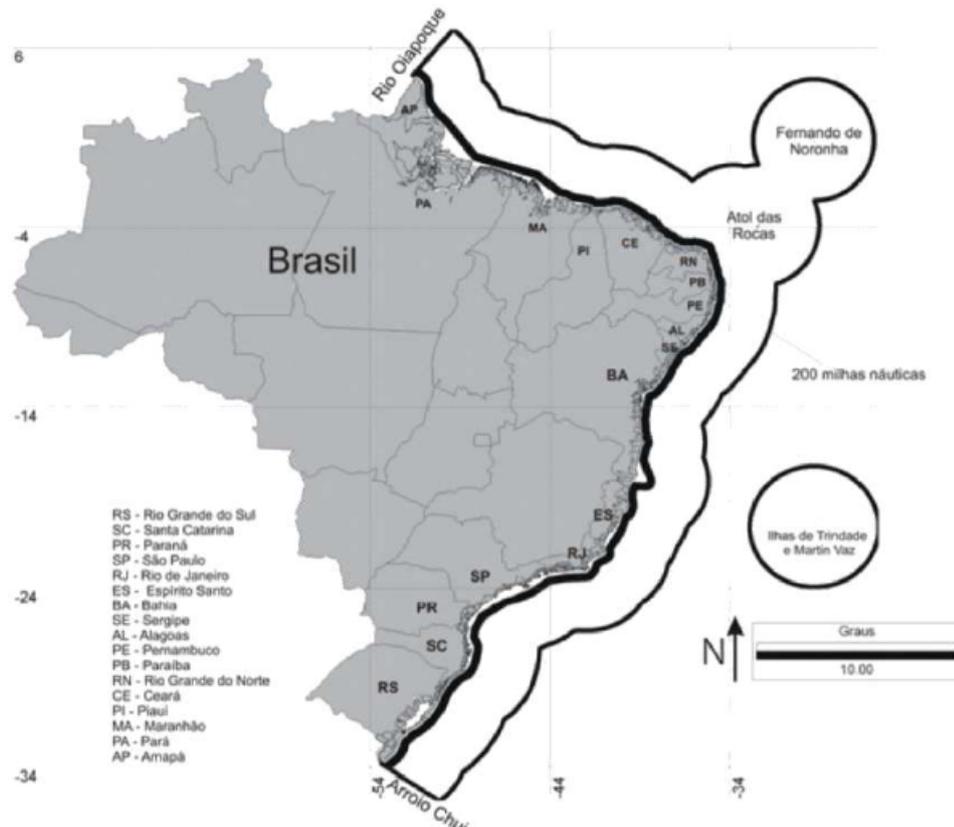


Figura 9: Mapa de delimitação da zona costeira brasileira em 2018. Retirado de Cavalcante e Aloufa (2018).

O Ceará possui uma zona costeira de aproximadamente 573 km de extensão. Ao longo dos 20 municípios que têm fronteira física com o mar, a zona costeira estende-se para o interior de 2 a 5 km até o limite terrestre dos campos de dunas (Souza Pinheiro et al., 2016).

Em um contexto socioeconômico, o litoral costeiro é uma região de exploração dos recursos marinhos. Moraes (2007) pontua que tal fato favorece a circulação de mercadorias e atrai uma apropriação cultural, identificadas como espaços de lazer. Os ambientes costeiros de todo o planeta são afetados diretamente pela ocupação desordenada e a exploração excessiva dos recursos naturais lá presentes (Agostini, 2019).

Muehe et al. (2006) destacam alguns dos fatores naturais que impactam na erosão costeira, como a elevação do nível do mar e a falta de suprimento sedimentar, seja por esgotamento da fonte natural, por sedimentos nos rios ou pelas perdas de sedimento na formação de dunas. Os autores também citam ações antrópicas que provocam graves alterações neste aspecto, como a urbanização das áreas-fonte de sedimentos e a retenção de sedimentos por obras de engenharia.

A pesquisa realizada por Nordstrom et al. (2011) ressalta a importância de estratégias para o ordenamento e proteção do espaço costeiro em termos ambientais, socioeconômicos e culturais. Entre as principais medidas para a gestão da zona costeira no Brasil, destaca-se a publicação do Decreto 5.377/05 que regulamenta o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro; aprova a Política Nacional para os Recursos do Mar, o Plano de Ação Federal da Zona Costeira e o Projeto Orla Federal (Figura 10).

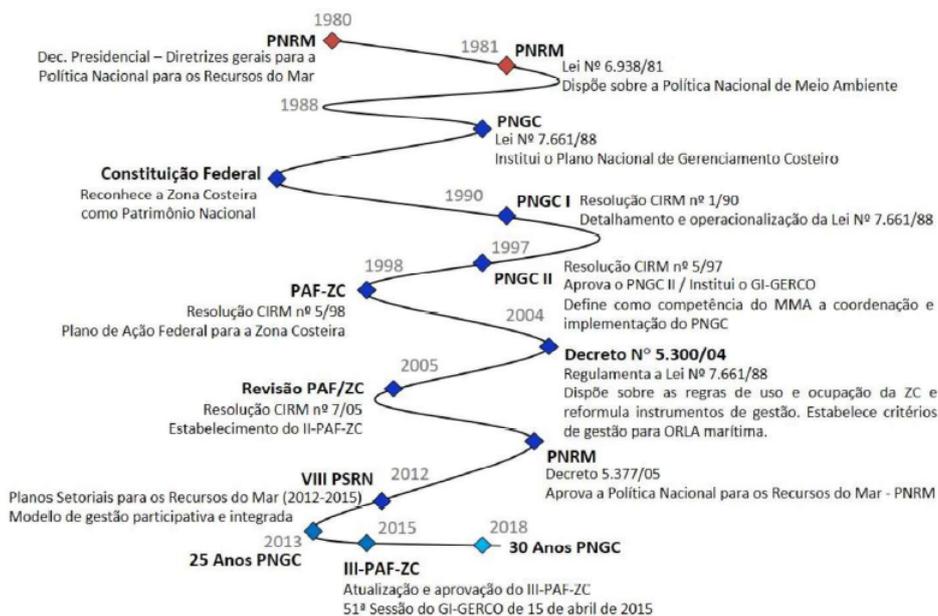


Figura 10: Marcos legais de Gestão Costeira no Brasil. Retirado de Guerra (2018).

Para avaliar os resultados dos impactos em zonas costeiras, a definição de linha de costa é um fator teórico importante. A linha de costa pode ser

definida como a linha que separa o continente do oceano e que sofre contantes mudanças (Diniz, 2002).

Diniz (2002) afirma que o processo chamado progradação ocorre quando a linha de costa avança em direção ao oceano, resultando num acréscimo de área continental. Por outro lado, o fenômeno conhecido como transgressão da linha costeira decorre de um recuo da linha de costa continente adentro, eliminando uma porção da área continental.

4 Materiais e Métodos

Nesta seção, são apresentados os principais materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho. Também são sintetizados os passos executados para a obtenção dos resultados.

4.1 Área de Estudo

O município de Fortim está situado ao litoral nordeste do Brasil e localiza-se a 113 km de Fortaleza, a capital do estado do Ceará. Possui limite entre municípios com dois rios como divisa: a oeste a foz do Rio Piranji limita o município de Beberibe e a leste a foz do Rio Jaguaribe limita o município de Aracati. A área de interesse possui 1650,4 km² e aproximadamente 70 km de orla (Figura 11). Em 2019 foi estimada uma população de 16.631 habitantes (IPECE, 2021).



Figura 11: Mapa de localização da área de estudo. A área de interesse é destacada pelo retângulo vermelho.

4.1.1 Aspectos Dinâmicos

a) Regime de ondas e maré

Para a determinação das feições costeiras é preciso conhecer as ondas mais frequentes no oceano. As ondas de superfície geradas pelo vento são conhecidas como ondas do tipo *sea*. Já as formadas longe do seu local de aparecimento são definidas como *swell* (Garrison, 2010).

No litoral do município de Fortim, as ondas incidentes mantêm uma estreita relação com as direções predominantes dos ventos e apresentam uma forte componente ao leste (Morais et al., 2006). As ondas mais frequentes são do tipo *sea* com altura média de 0,55 m e período de 5 s. No primeiro trimestre do ano, as ondas *swell* são mais frequentes com período de 10 s e altura média de 0,40 m (Leite et al., 2016).

As ondas provenientes dos quadrantes E-SE atingem o promontório da costa e geram um efeito de turbilhonamento (Morais et al., 2002). Isso faz com que o material em suspensão seja depositado nas imediações do pontal, sendo responsável pela alternância na direção do transporte de sedimentos (Figura 12).

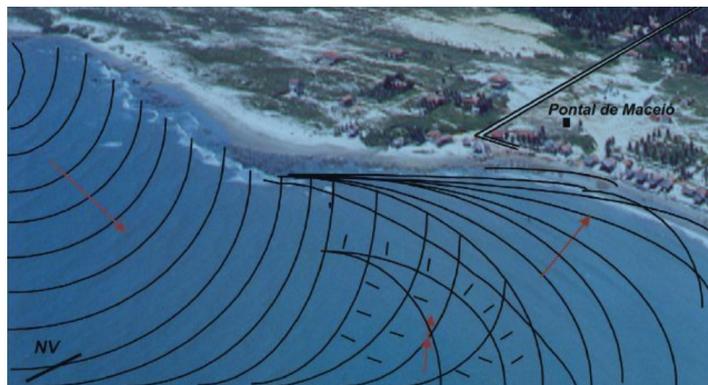


Figura 12: Esboço da refração em frente ao vilarejo de Pontal de Maceió - Fortim. As setas vermelhas indicam o direcionamento dos vetores de energia que geram o processo destrutivo da costa. Retirado de Moraes et al. (2002).

Nas marés de sizígia, as ondas de refração sofrem reflexão ao alcançar a praia de Fortim. Tal fenômeno provoca a remobilização de grandes

volumes de areias na direção da antepraia (Morais et al., 2006). O regime de maré do litoral de Fortim é caracterizado como de mesomaré com amplitudes máximas de 2,6 m (Pinheiro et al., 2008).

b) Ventos

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) tem influência primordial no clima de várias regiões nos trópicos, como por exemplo, no Nordeste do Brasil, onde a estação chuvosa depende fortemente da posição da ZCIT (Figura 13).

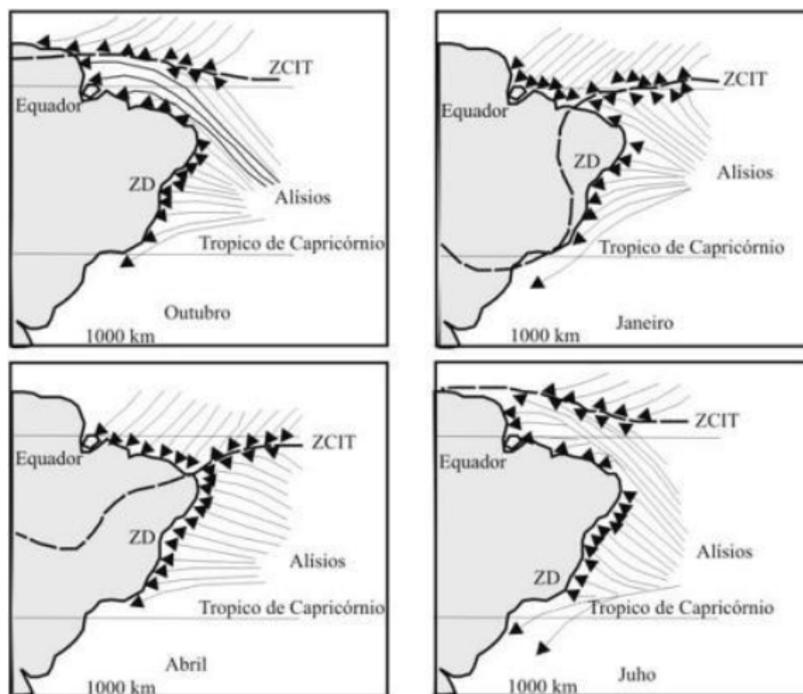


Figura 13: Síntese da movimentação da ZCIT. Retirado de Martin e Dominguez (1994).

No período de setembro-novembro, os ventos alísios de sudeste predominam na região Nordeste do Brasil (da Silva e de Araujo Filho, 2006). Já nos meses de dezembro-março, os ventos predominantes são os alísios de nordeste quando a ZCIT se encontra mais ao sul. Na costa do Ceará, há a tendência de crescimento de SE-NW, associada a um tipo anticiclônico de mudança de direção vetorial (Maia et al., 2000).

O Ceará possui velocidade média anual do vento em torno de 6,4 e 8,1 m/s. Durante o período de fevereiro-maio, são observados os menores valores, enquanto os maiores são observados nos meses de agosto a novembro (Maia et al., 2000). Os ventos são responsáveis pela indução das correntes marinhas e pelo transporte de sedimentos, pois ao incidirem com a costa, geram um vetor resultante paralelo à linha de costa.

c) Precipitação

As precipitações no Nordeste do Brasil podem ser classificadas como mecanismos dinâmicos de grande escala, responsáveis por cerca de 30% a 80% das chuvas observadas a depender do local. Os mecanismos de meso e microescalas completam o total observado (FUNCEME - <http://funceme.br>).

De julho a novembro, o Ceará passa por período de seca devido à ZCIT, que se move gradualmente para o norte do Equador. Nos meses de dezembro a março, a ZCIT chega ao seu máximo sul, resultando cerca de 91% da precipitação no Nordeste durante o primeiro semestre do ano (Souza Pinheiro et al., 2016).

O fenômeno *El Niño* influencia as precipitações no Nordeste. Consiste no aquecimento anômalo das águas superficiais do leste da Bacia do Pacífico que, combinado com o dipolo positivo do Atlântico, resulta na inibição da formação de nuvens e a ausência de chuvas (Ferreira e da Silva Mello, 2005).

O fenômeno oposto é chamado de *El Niña* e ocorre quando acontece o resfriamento anômalo das águas do leste do Pacífico sul-equatorial. Quando associado ao dipolo negativo do Atlântico, resulta no favorecimento da formação de chuvas na região (Morais et al., 2006).

A região nordestina possui um clima semi-árido e é marcada por dois períodos bem definidos: um seco, longo e outro úmido, curto e irregular.

d) Descarga Fluvial

Na área em estudo, o Rio Jaguaribe é um recurso hídrico responsável por fornecer sedimentos de origem continental para a construção da faixa de praia e pós-praia (de Farias e Maia, 2010).

O Rio Jaguaribe se comporta como espigão hidráulico e é fundamental para reverter a obstrução de canais, favorecendo os processos de sedimentação e de circulação estuarina (Ferreira et al., 2012). No entanto, a vazão do rio possui influência nestes processos por estar submetido a um regime climático com precipitação irregular e à grande quantidade de barragens que retêm sedimentos (Martin e Dominguez, 1994).

Tal redução da vazão se deve também ao abastecimento humano, aos inúmeros barramentos de menor porte, à carcinicultura, à irrigação e à piscicultura (Pinheiro et al., 2008).

O Rio Piranji compõe a Bacia Hidrográfica Metropolitana de Fortaleza e limita os municípios de Fortim e Beberibe (Silva, 2012). Seu estuário situa-se imediatamente à oeste da foz do Rio Jaguaribe.

A foz do rio possui formação de barreiras paralelas à linha de costa e essas barreiras estão associadas principalmente a interrupções ou alterações no padrão do transporte de sedimentos (de Claudino Sales e Peulvast, 2006).

4.1.2 Geologia Regional

O conhecimento geológico é de grande contribuição para a compreensão dos processos dinâmicos erosivos. A Figura 14 representa o Mapa Geológico do estado do Ceará.

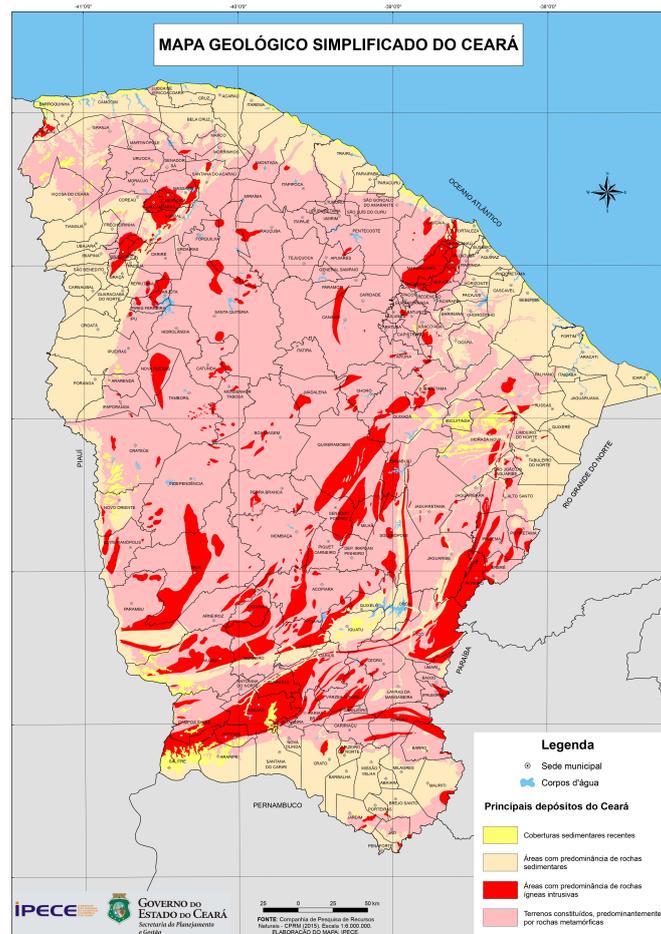


Figura 14: Mapa Geológico Simplificado do estado do Ceará. Retirado de IPECE (<https://www.ipece.ce.gov.br/>).

A região a ser estudada insere-se numa extensa faixa predominantemente comportada por rochas sedimentares que se desenvolveram ao final do período Terciário e início do Quaternário (Cavalcante et al., 2003). Os Depósitos Eólicos Litorâneos se baseiam em areias quartzosas de granulometria fina a média, com grãos bem selecionados e arredondados.

4.2 Aquisição de Dados

Para a obtenção dos dados, utilizou-se a plataforma CASSIE, que consiste em uma ferramenta de código aberto para mapear e analisar linhas costeiras por meio de imagens de satélite. A ferramenta comporta imagens de satélite *Landsat* e *Sentinel-2*, que são cedidas gratuitamente pelo GEE (Figura 15a).

De acordo com o que apresenta a Figura 15a, o satélite *Landsat* possui maior cobertura temporal, apesar de possuir menor resolução espacial (30 metros). Esta informação foi crucial para a escolha do satélite *Landsat*. Após, foi preciso definir a área de interesse para a aquisição, onde também é possível importar um arquivo de extensão *.kml*, assim como ilustra a Figura 15b.

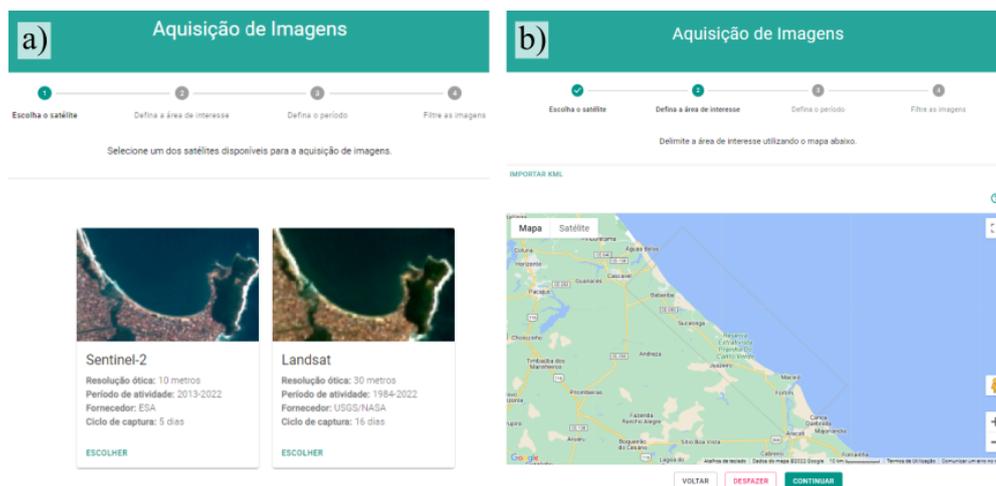


Figura 15: (a) Satélites disponíveis na plataforma CASSIE. (b) Definição da área de interesse a ser estudada.

O período de 1985 a 2021 foi definido em seguida. Nesta etapa, também é possível filtrar o percentual calculado de nuvens presentes nas imagens (Figura 16a). Para esta pesquisa, foi requisitado um valor inferior a 10%.

Uma lista é gerada com as imagens disponíveis de acordo com as definições anteriores, em que é possível seleccionar as imagens pretendidas. A Figura 16b apresenta a maneira em que são dispostas todas essas informações.

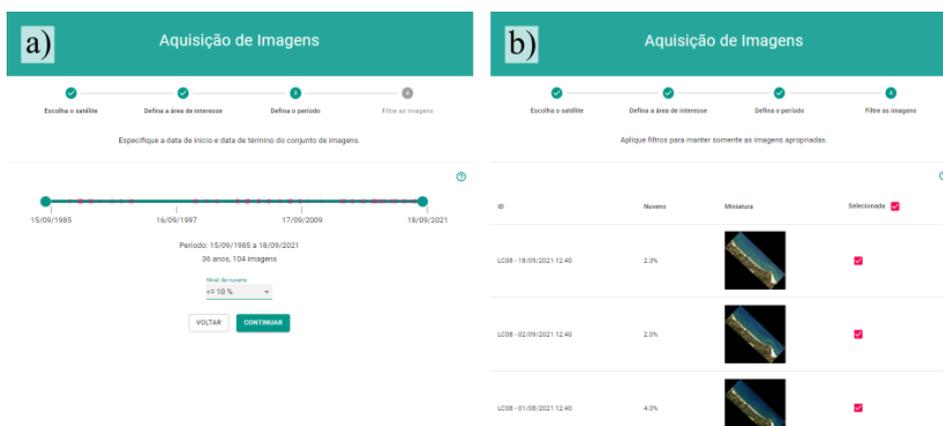


Figura 16: (a) Etapa de definição do percentual de nuvens e do período desejado. (b) Seleção das manual imagens disponíveis.

Foram escolhidas 8 imagens de satélite com a menor percentagem de nuvens em diferentes datas com o intervalo médio de 5 anos. As informações estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3: Informações das imagens seleccionadas.

Data e hora da aquisição	Satélite	Porcentagem de nuvens
15/09/1985 - 12:09	Landsat 5	0.8%
27/07/1990 - 12:00	Landsat 5	6.1%
04/08/1995 - 12:03	Landsat 5	2.2%
23/08/2000 - 12:18	Landsat 5	1.0%
04/07/2005 - 12:28	Landsat 7	4.0%
15/05/2010 - 12:31	Landsat 7	1.8%
01/08/2015 - 12:40	Landsat 8	0.7%
02/09/2021 - 12:40	Landsat 8	2.1%

A partir das etapas anteriores, as imagens de satélite foram geradas e estão representadas nas Figuras 17 e 18.

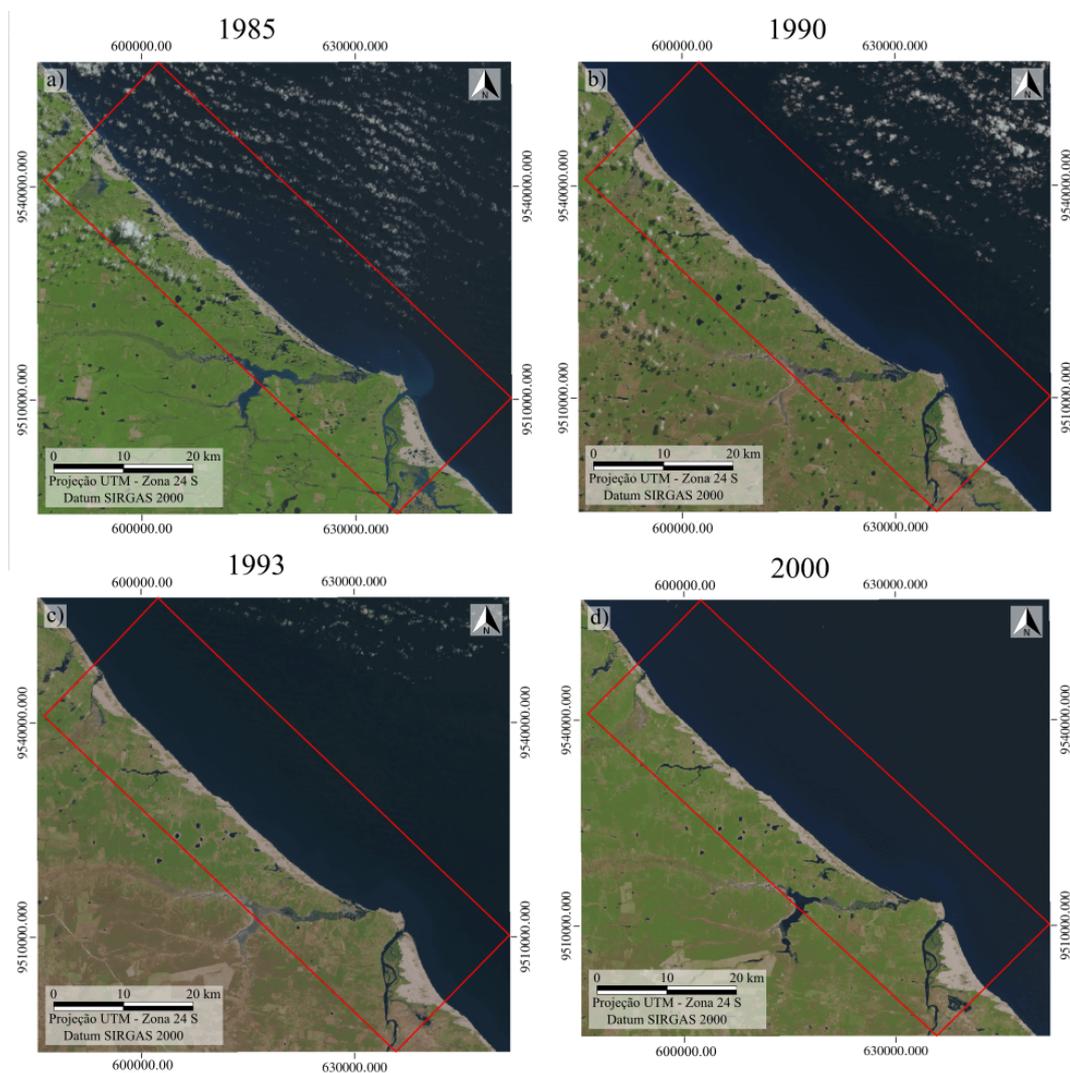


Figura 17: Imagens do satélite *Landsat 5* em diferentes anos são apresentadas. (a) Representa a imagem do ano de 1985. (b) Aquisição realizada no ano de 1990. (c) Imagem de 1993. (d) Imagem de 2000.

A Figura 17 possui imagens de um mesmo satélite *Landsat 5*.

Para a conclusão das aquisições das imagens durante o período selecionado, foi preciso utilizar os satélites *Landsat 7* e *8*, que foram posicionadas na Figura 18.

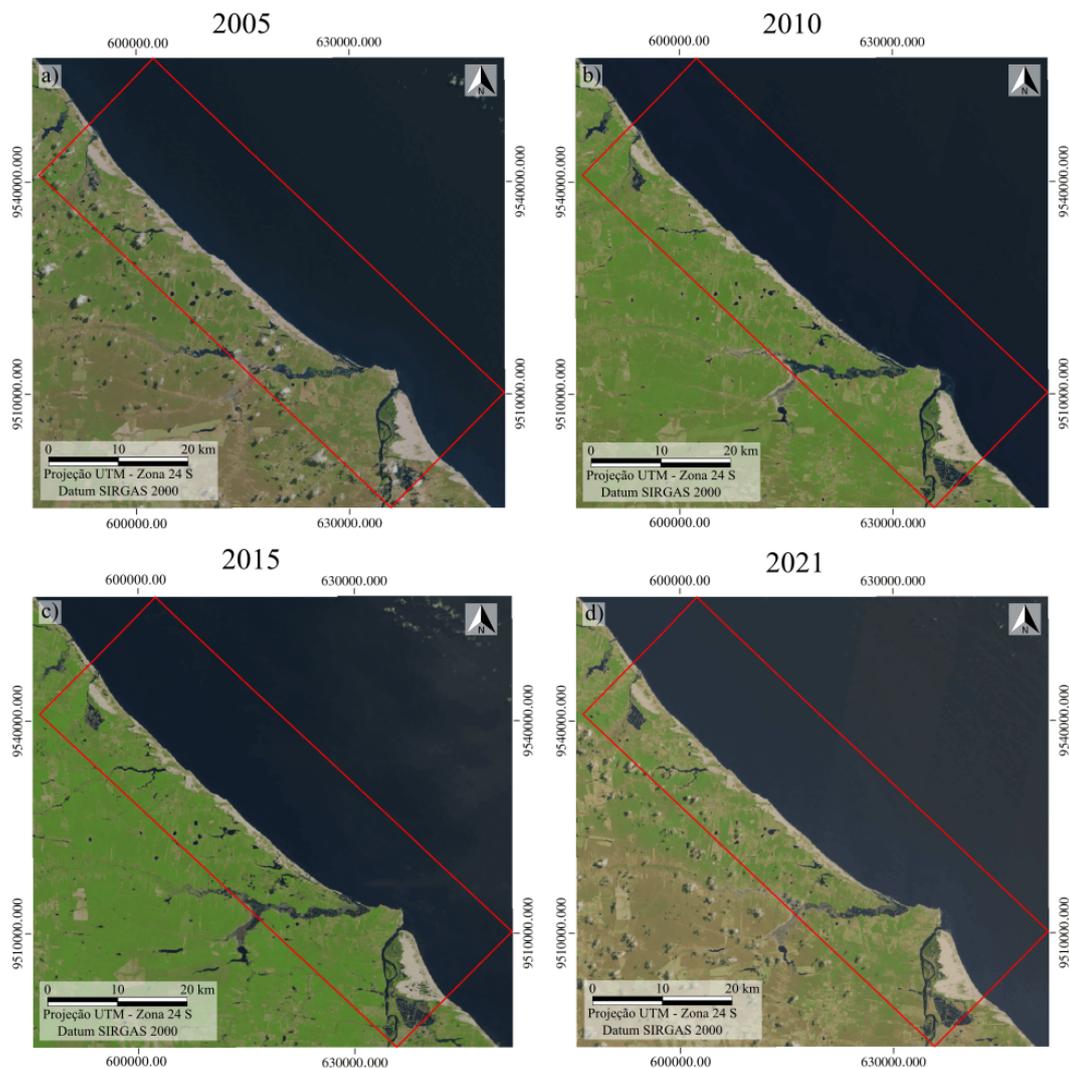


Figura 18: (a) Imagem do satélite *Landsat 7* do ano de 2005. (b) Imagem do ano de 2010. (c) Imagem de 2015. (d) Imagem do ano de 2021.

Para a análise da linha de costa, é possível estabelecer uma linha de base manualmente ou importar uma linha previamente desenhada por meio de um arquivo de extensão *.kml* (Figura 19). A imagem de satélite do ano de 2021 serviu como parâmetro para a definição da linha.

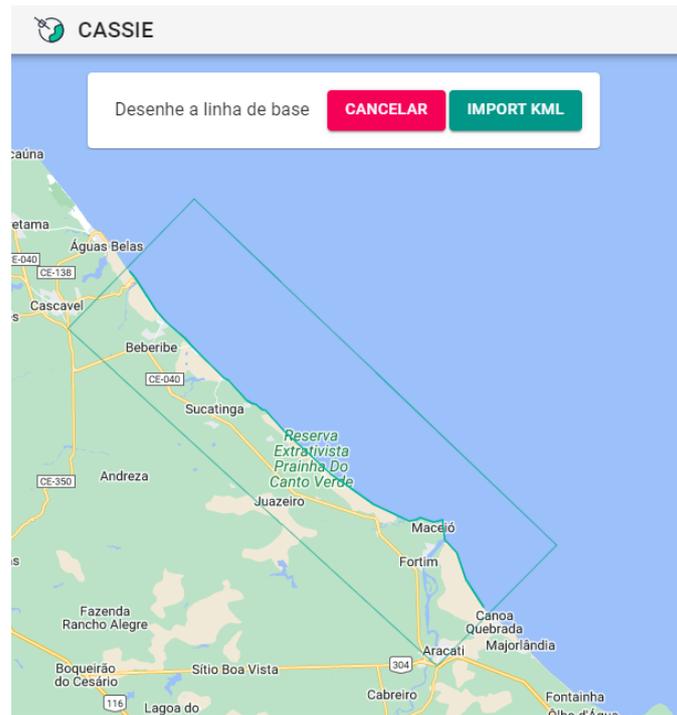


Figura 19: Definição da linha de base a ser analisada.

Para a detecção automática da linha costeira, o CASSIE utiliza o Índice de Água de Diferença Normalizada (NDWI) (Equação 3) em cada uma das imagens selecionadas:

$$NDWI = \frac{(NIR - VERDE)}{(NIR + VERDE)}, \quad (3)$$

em que NIR é a refletância do pixel na faixa do infravermelho próximo e VERDE é a refletância do pixel na faixa verde.

A plataforma utiliza por padrão o valor “0” para representar o algoritmo Otsu de suas classes para histograma bimodal (duas classes bem distinguidas na imagem, como terra e água) (Otsu, 1979).

Os parâmetros necessários para a análise são modificáveis e consistem

em coeficiente de limiarização, extensão e espaçamento entre os transectos (Figura 20). Para esta pesquisa foram definidos uma distância entre os transectos de 500 m ao longo de 7,6 km de extensão e valor “0” para o coeficiente de limiarização.

Parâmetros de análise

Defina os parâmetros de espaçamento e extensão dos transectos, em metros, e o coeficiente de limiarização (valores mais altos são mais rígidos quanto ao que é considerado um corpo de água).

Espaçamento (m)	Extensão (m)	Limiar
500	7600	0

CANCELAR **CONFIRMAR**

Figura 20: Definição dos parâmetros necessários para a análise.

A plataforma utiliza a extensão DSAS para as análises estatísticas dos transectos, que são apresentadas a seguir (Almeida et al., 2021):

- *Shoreline Change Envelope* (SCE): distância (m) entre a linha de costa mais distante e mais próxima da linha de base.
- *Net Shoreline Movement* (NMS): distância (m) entre as linhas de costa mais antigas e mais novas.
- *End Point Rate* (EPR): taxa de variação da linha de costa (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.

Após todas as etapas de aquisição, o CASSIE disponibiliza o relatório da análise em arquivos de extensão *.shp*, *.json* ou *.csv* (Figura 21).

Análise da Linha de Costa

RELATÓRIO DE TRANSECTOS							
ID ↑	Latitude inicial	Longitude inicial	Latitude final	Longitude final	Data inicial	Data final	Intercepto
0	-4.0848	-38.1514	-4.0942	-38.1623	04/07/2005	02/09/2021	93.2516
1	-4.0851	-38.1512	-4.0953	-38.1613	04/07/2005	02/09/2021	68.1795
2	-4.0857	-38.1505	-4.0960	-38.1607	04/07/2005	02/09/2021	-75.1655
3	-4.0864	-38.1498	-4.0965	-38.1601	04/07/2005	02/09/2021	-107.5958
4	-4.0871	-38.1492	-4.0971	-38.1595	04/07/2005	02/09/2021	-154.0226

[EXPORTAR DADOS DE TRANSECTOS](#) [FECHAR](#)

Figura 21: Relatório dos transectos disponíveis para exportação.

Para a elaboração de gráficos e histogramas, utilizou-se a linguagem de programação *Python*. Assim, é possível analisar quantitativamente os dados gerados e apresentá-los de forma gráfica.

4.3 Uso e Cobertura do Solo

Diante às técnicas de Sistema de Informações Geográficas e de Sensoriamento Remoto, as imagens de satélite permitem a distinção geométrica de feições presentes no solo ao longo do tempo.

Com o intuito de analisar as características físicas do município de Fortim ao longo dos anos, mapas de uso e cobertura do solo desde 1985 são importantes produtos para esta pesquisa.

O MapBiomias é uma ferramenta gratuita que disponibiliza o acesso ao banco de dados de maneira rápida e confiável. A ferramenta permite a extração de mapas em escala nacional e regional do uso e cobertura do solo no Brasil a partir de 1985 até os dias atuais. Além de diversas aplicações, a plataforma também permite a comparação temporal de feições desde 1985 a 2020.

A Figura 22 demonstra a visão geral da plataforma ao mapear o uso e cobertura do Brasil e ao comparar dados históricos.



Figura 22: Visão geral da plataforma MapBiomias.

4.3.1 Elaboração do Buffer

A partir de análises preliminares de possíveis fatores que podem impactar na erosão da região estudada, chegou-se à hipótese de que o Rio Piranji possui uma potencial ligação com o comportamento erosivo apresentado pela encosta.

Diante disso, o *Buffer* é uma ferramenta disponível no ArcGIS essencial para delimitar uma área de influência. É possível definir uma área a ser estudada, estipular parâmetros matemáticos e realizar comparações com outras feições diante de variação histórica. Isso permite uma análise quantitativa sobre os resultados obtidos. A Figura 23 representa a feição e o curso do Rio Piranji no município de Fortim.

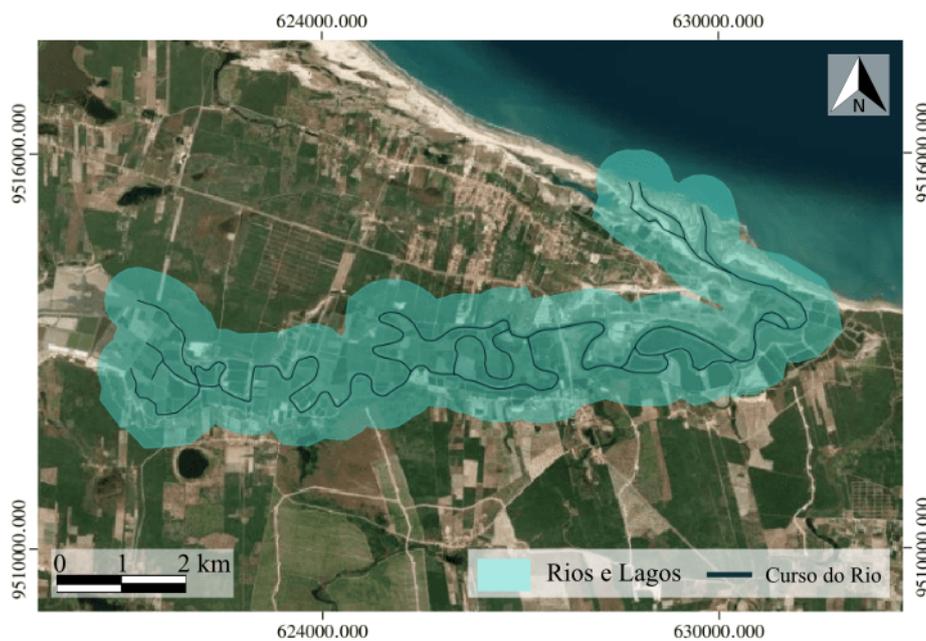


Figura 23: *Buffer* gerado utilizando a plataforma ArcGIS em torno do Rio Piranji, Fortim.

5 Resultados e Discussões

Os resultados gerados durante a aquisição são apresentados e discutidos ao decorrer desta seção.

5.1 Linha de Costa e Transectos

Após uma detecção automática a partir da linha de base inserida manualmente, a plataforma CASSIE gera linhas para cada uma das imagens selecionadas e permite a comparação entre elas. A Figura 24 equivale às linhas de costa dos anos de 1985 e 2021. Assim, é possível realizar uma rápida análise qualitativa do recuo da linha de costa, indicativo de erosão, ou de seu avanço, indicativo de deposição de sedimentos (acresção).

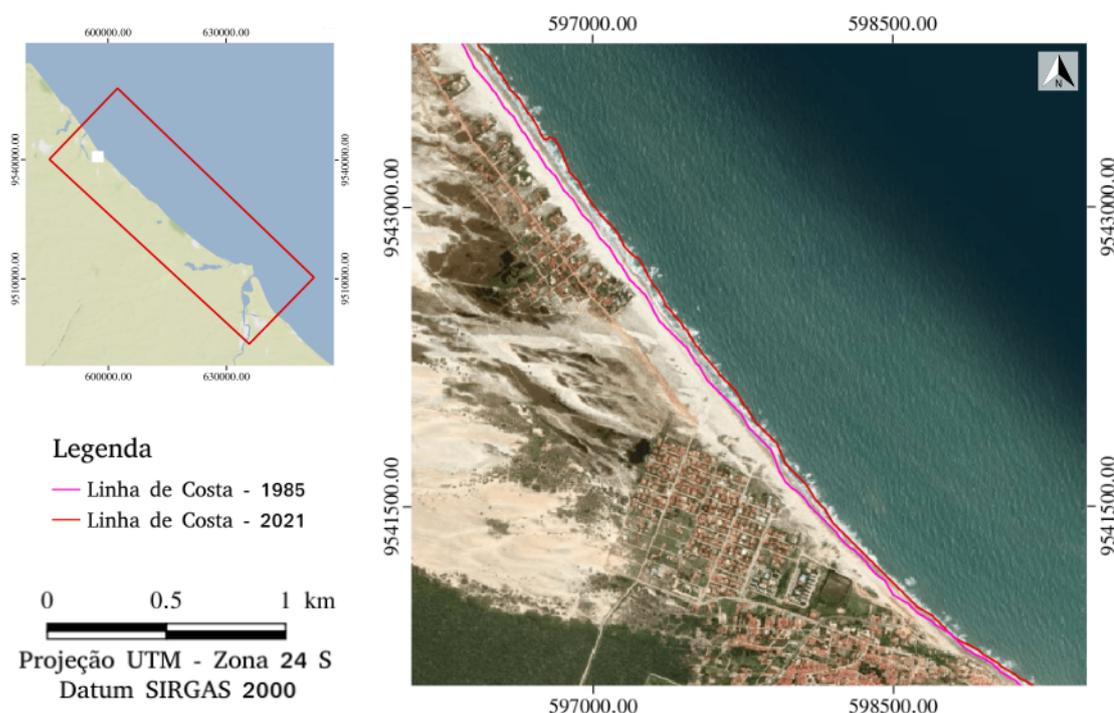


Figura 24: Delimitação das linhas de costa geradas pela plataforma para os anos de 1985 (rosa) e 2021 (vermelho). Note que a delimitação mais recente avançou em relação à de 1985, o que indica deposição de sedimentos.

Foram gerados 143 transectos perpendiculares à linha de costa espaçados 500 metros entre si, assim como está disposto na Figura 25. Cada transecto representa uma classificação diferente de acordo com a dinâmica de deposição ou erosão.

A cor verde contida no mapa representa a estabilidade e a cor azul simboliza uma erosão acrescida. As linhas que são representadas pelas cores amarela e vermelha caracterizam níveis de erosão: erodida e criticamente erodida, respectivamente.

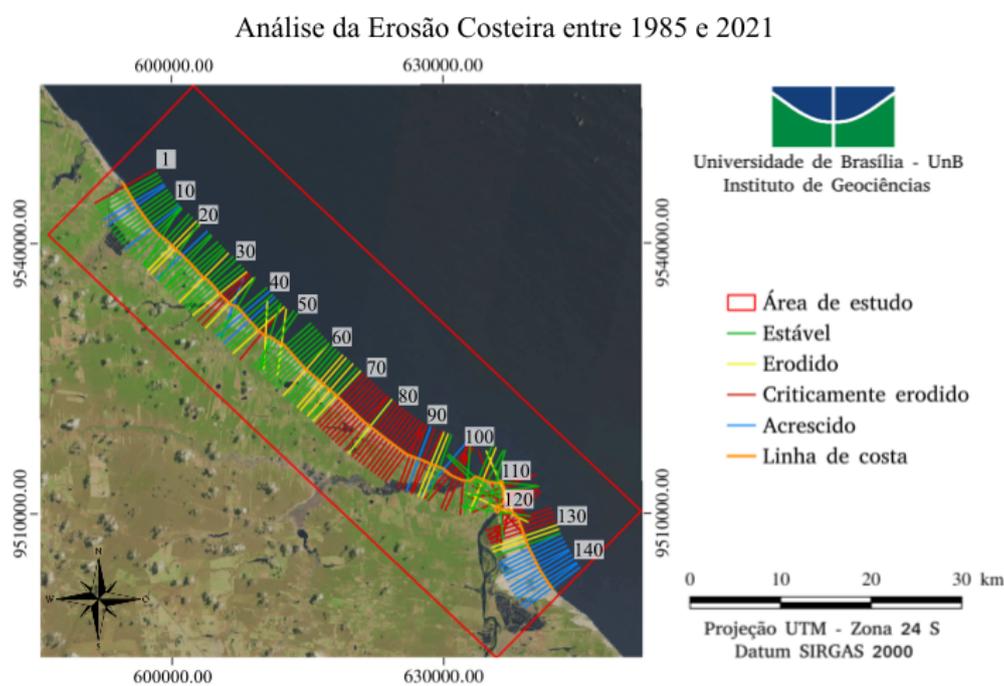


Figura 25: Transectos gerados ao longo da linha de costa. Cada cor indica uma diferente taxa anual de variação da encosta a partir do cálculo realizado pela plataforma CASSIE.

Os transectos são gerados ao fim da análise realizada pelo CASSIE, em que a classificação é feita pela própria plataforma. A classificação de cada transecto é feita por meio da taxa de mudança da linha de costa, calculada após o ajuste de uma regressão linear, conforme proposto por Esteves e Finkl (1998) (Tabela 4).

Tabela 4: Parâmetros da classificação dos transectos. Modificado de Almeida et al. (2021).

Classificação	Cor	Taxa de regressão linear (metros/ano)
Estável	Verde	-0,5 a 0,5
Erodida	Amarelo	-1 a -0,5
Criticamente Erodida	Vermelho	<-1
Acrescida	Azul	>0,5

A partir dos resultados gerados na Figura 25, calculou-se o percentual de transectos para cada classificação, conforme apresentado na Figura 26. É possível notar que a maior parte dos transectos foram classificados como “Estável” (39,16%).

A segunda classificação mais recorrente é a de “Criticamente Erodido” e representa um total de 32,17%. A classe “Erodido” representa 14,69% dos transectos. Ao considerar as classes “Erodido” e “Criticamente Erodido”, ambas representam 46,85% da extensão da costa estudada. A classe de erosão “Acrescido” é a de menor expressão, com total de 13,99%.

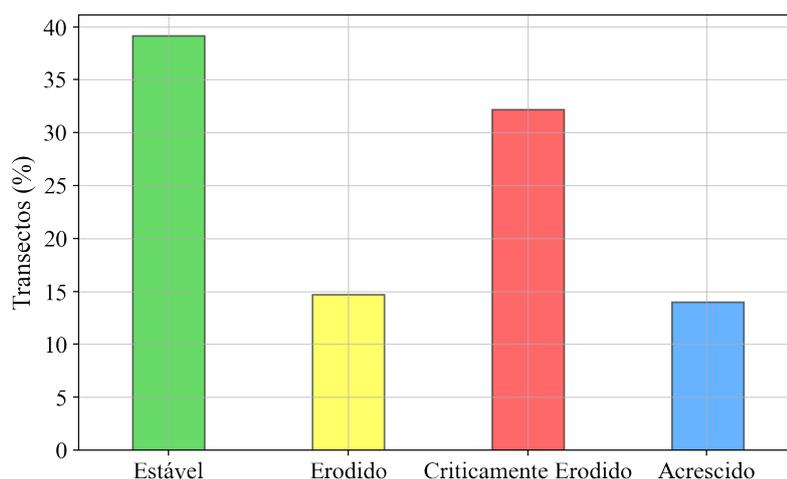


Figura 26: Valores percentuais de cada classe de transectos.

A regressão linear dos transectos pode ser consultada individualmente, de acordo com as Figuras 27 e 28. Os gráficos para cada uma das classificações de erosão estão destacadas por setas das cores respectivas.

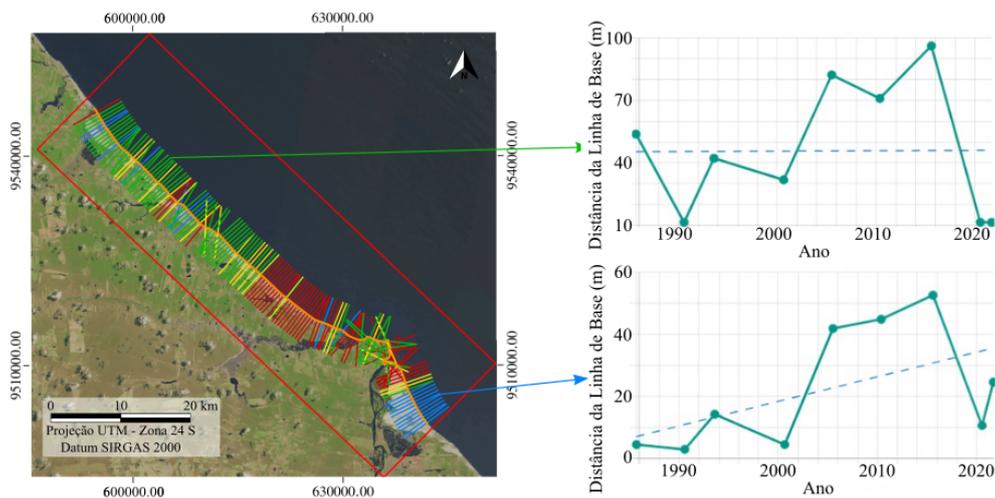


Figura 27: Exemplo de análise para transectos estáveis e acrescidos (destacados pela seta verde e seta azul, respectivamente).

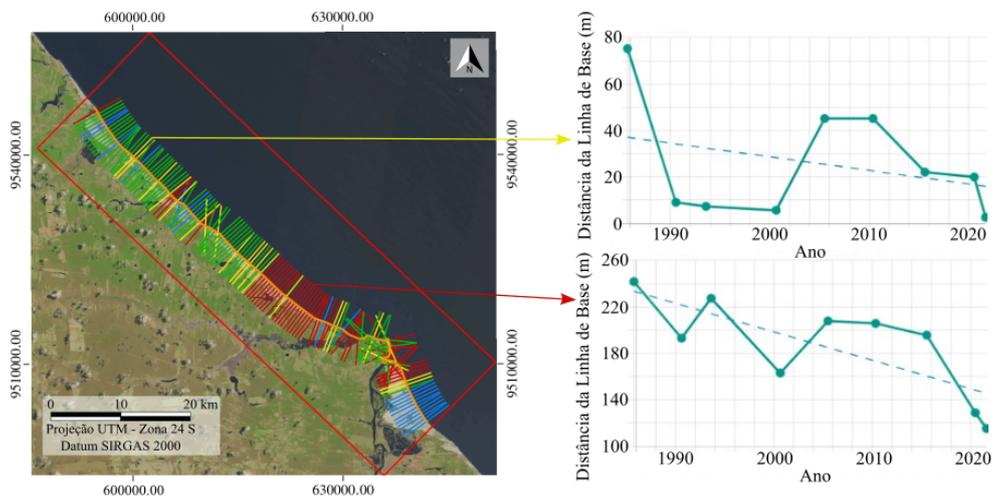


Figura 28: Exemplo de análise para transectos erodidos e criticamente erodidos (destacados pela seta amarela e vermelha, respectivamente).

Os valores de distância em relação à linha de base ao longo dos anos são percebidos no gráfico, o que permite a realização de uma análise temporal completa.

As taxas de variação (metros/ano) de cada transecto são apresentados na Figura 29. Até o transecto de número 60, as taxas se mantêm abaixo de $\pm 2,0$ m/ano, com média de $-0,08$ m/ano. No entanto, entre os transectos 61 e 130, há uma forte tendência de recuo da linha de costa, em que a maioria dos transectos se classificam como “Críticamente Erodidos”.

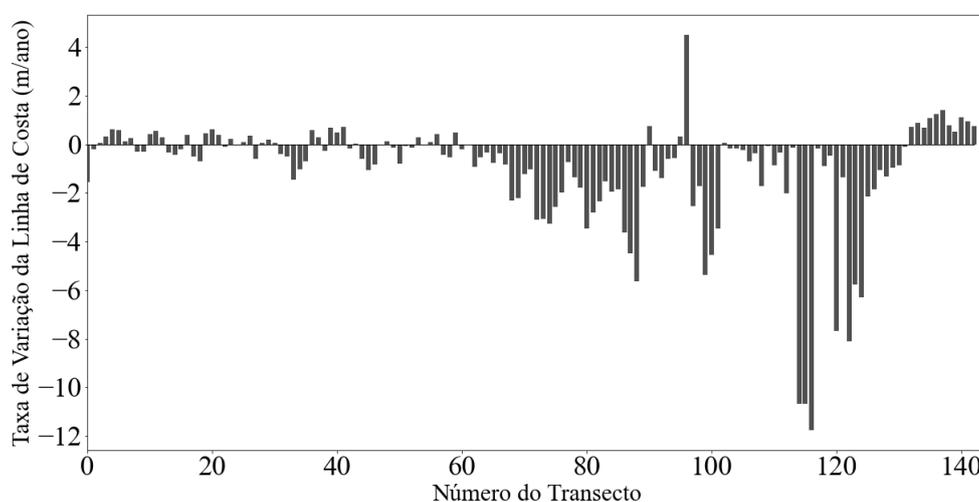


Figura 29: Taxa anual de variação da linha de costa para cada transecto gerado. Valores positivos indicam avanço da linha de costa (deposição) e valores negativos, recuo (erosão).

O valor de variação mais elevado é de $-11,78$ m/ano (número 117), e a média de variações entre esses transectos é de $-2,2$ m/ano. Os últimos nove transectos analisados (entre 131 e 140) apresentam uma tendência de avanço da linha da costa, com média de $0,83$ m/ano.

Os transectos de número 61 a 130 estão localizados antes e depois da foz dos rios Piranji e Jaguaribe. Dessa forma, os resultados de variação da linha de costa podem estar relacionados com a diminuição de vazões líquidas e sólidas das bacias hidrográficas em decorrência do aumento de barramentos artificiais presentes ao longo de ambos os rios, como apontado por de Farias e Maia (2010).

A Figura 30 apresenta o detalhe dos transectos 2 a 28 e suas respectivas taxas de variação.

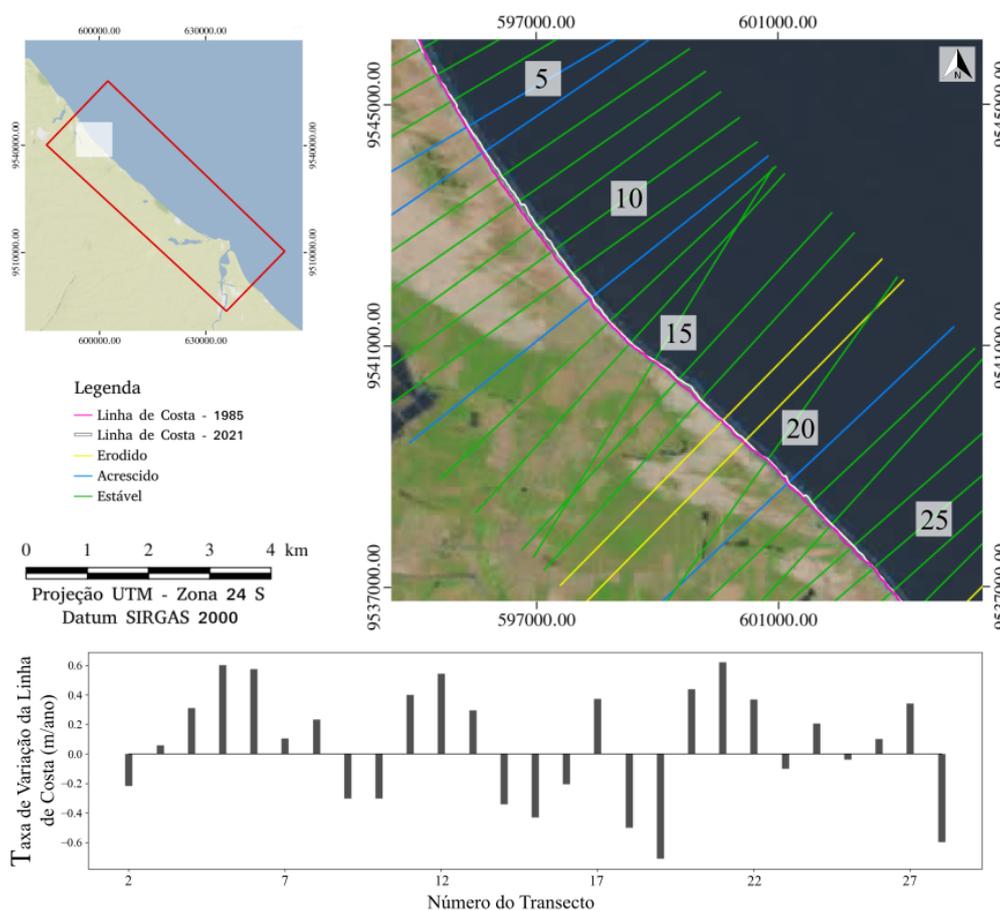


Figura 30: Região destacada representa os transectos 5 a 25.

Nesta região, nota-se o predomínio da classificação “Estável”, com a presença de algumas linhas acrescidas e erodidas. Ao analisar as linhas de costa definidas para 1985 (rosa) e 2021 (branco), não há grandes variações. Assim,

não houve grandes deposições ou erosão notável.

A Figura 31 apresenta o detalhe dos transectos 61 a 92. É uma região em que há o predomínio da classe criticamente erodida e está próxima à foz do Rio Piranji.

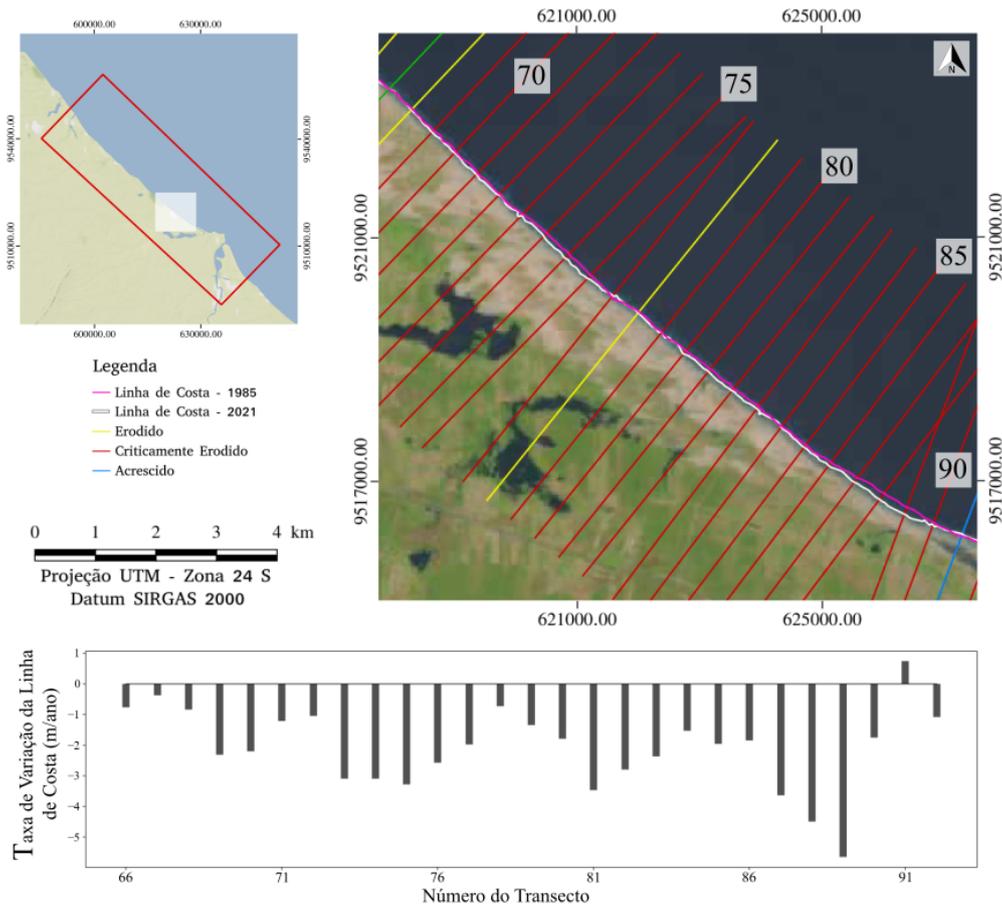


Figura 31: Área em destaque para os transectos criticamente erodidos. Transectos de número 70 ao 90 estão em evidência.

Como discutido por de Farias e Maia (2010), supõe-se que o aumento das atividades de barramento e aquicultura artificiais diminuem as vazões dos rios, fato que também pode estar ligado aos elevados valores de erosão registrados para a região. Ao analisar as linhas de costa referentes aos anos 1985 e 2021, é possível notar que a linha de 2021 avançou em direção ao continente, indicativo de erosão.

A Figura 32 mostra o detalhe entre os transectos 90 a 110. Na região próxima à desembocadura do Rio Piranji, o valor médio de variação é de -0,99 m/ano, classificado como criticamente erodido. Possui o valor máximo de -5,39 m/ano no transecto de número 100.

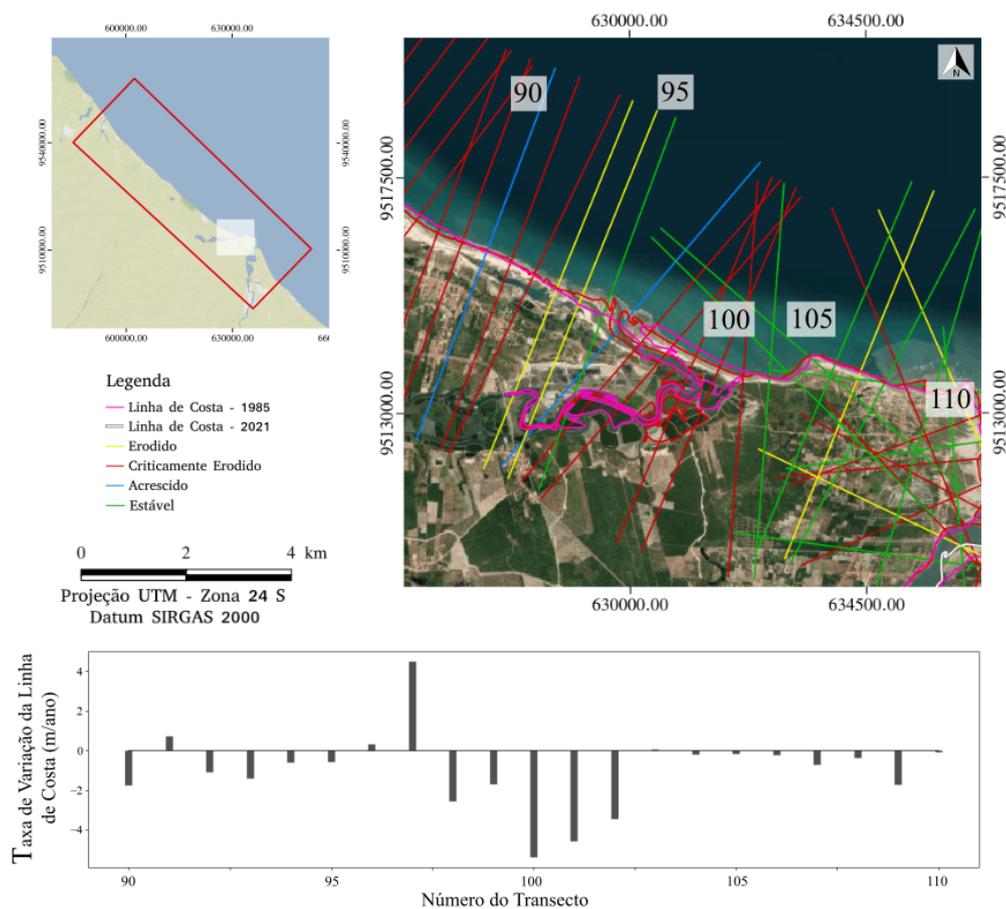


Figura 32: Destaque para os transectos de número 90 a 110.

A Figura 33 mostra o detalhe dos transectos 110 a 130. O valor máximo de variação observado é igual a -11,78 m/ano e a média é igual a -3,56 m/ano.

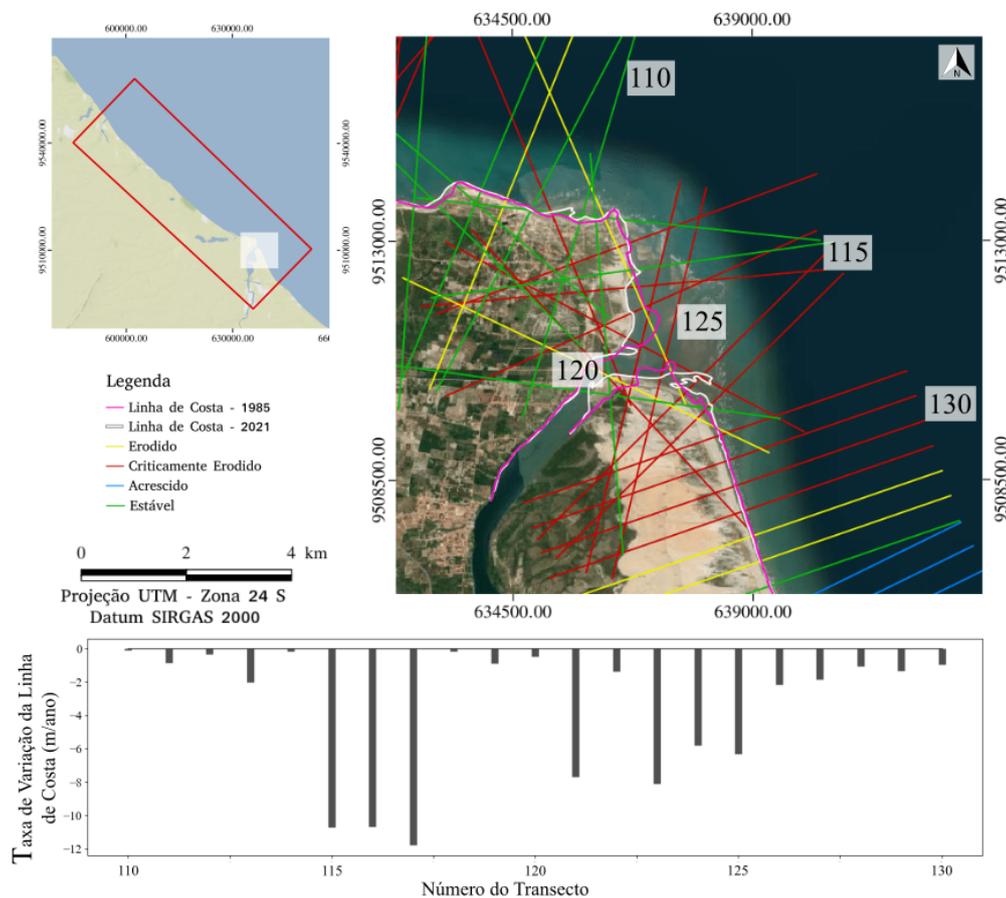


Figura 33: Destaque para os transectos de número 110 a 130.

A Figura 34 mostra o detalhe entre os transectos 130 a 143. A região, a sul da foz do Rio Jaguaribe, apresenta uma tendência de linhas acrescidas. A linha de costa referente ao ano de 2021 avançou em direção ao mar se comparada com a linha de 1985, o que indica a deposição de sedimentos na região.

Um fator que pode estar contribuindo para a aceleração desta deposição de materiais é a dinâmica erosiva que ocorre com a desembocadura do Rio Jaguaribe. Como a dinâmica de marés e de ventos empurra a foz do rio para leste, é esperado que ocorra a deposição do material nesta região.

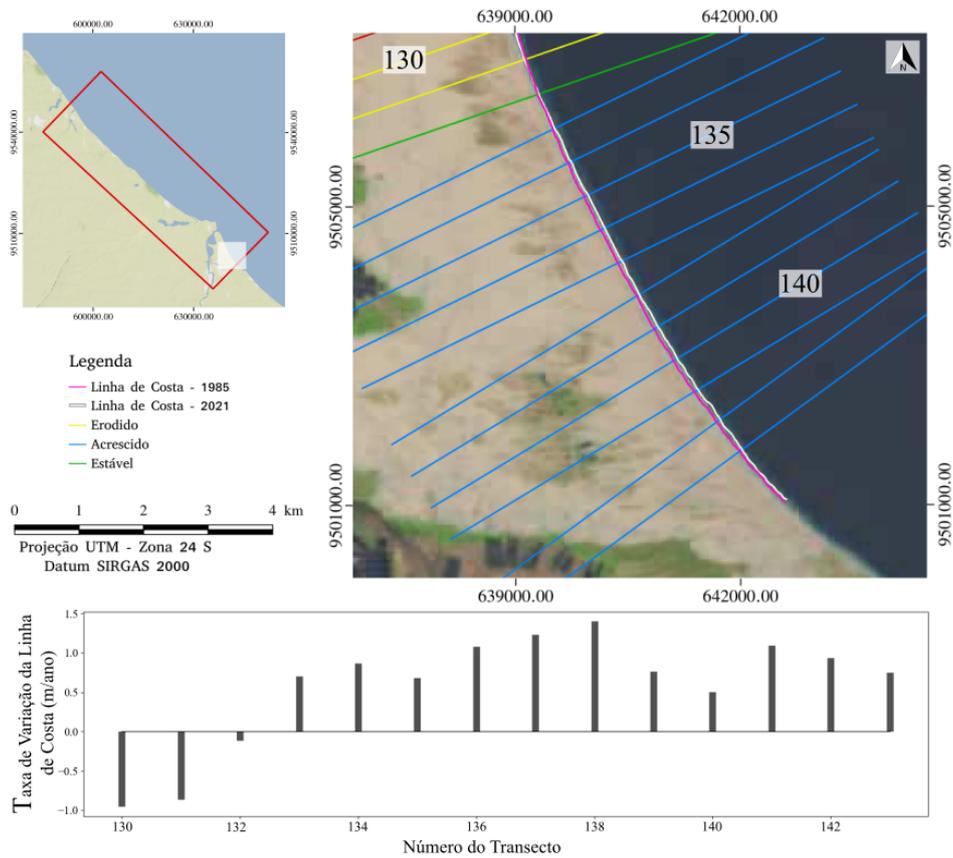


Figura 34: Destaque para a região final da área em que há predominantemente erosão acrescida (transecto 130 ao 140).

5.2 Uso e Cobertura do Solo

Com o intuito de analisar as possíveis causas destas elevadas taxas de erosão anuais registradas para a região, utilizou-se os dados de uso e cobertura do estado do Ceará por meio do MapBiomas.

A Figura 35a representa o estado em questão e a ocupação do solo no ano de 2021. Já a Figura 35b apresenta a variação temporal para determinadas classes ao longo dos 36 anos de análise.

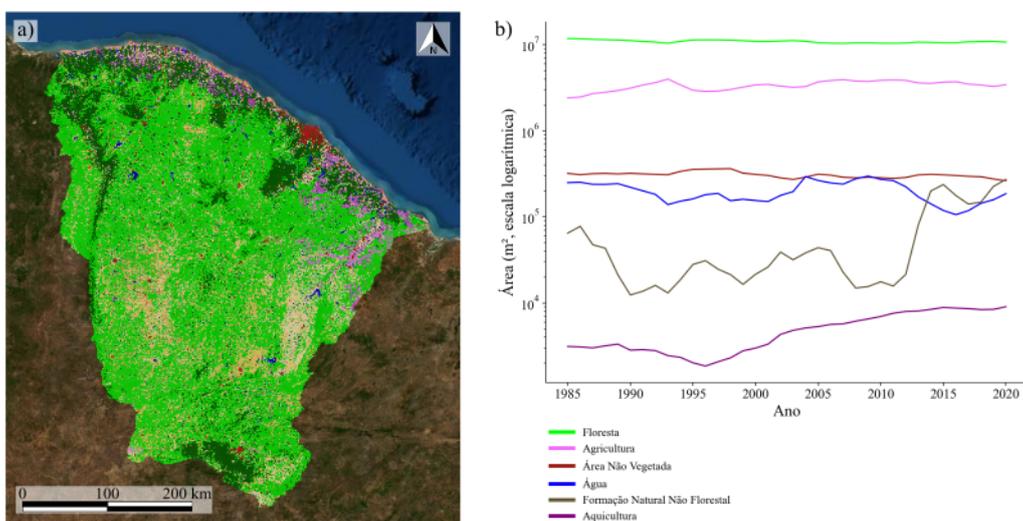


Figura 35: (a) Mapa do uso e cobertura do solo para o estado do Ceará em 2021. (b) Variação temporal do uso e cobertura do solo do estado do Ceará para os últimos 36 anos.

Ao observar individualmente cada classe disponível para análise, foi possível perceber uma ascensão na prática da aquicultura.

Diante de tal observação, gerou-se um gráfico a partir dos dados obtidos (Figura 36) o que permite quantificar a variação da área de aquicultura ao longo das últimas décadas.

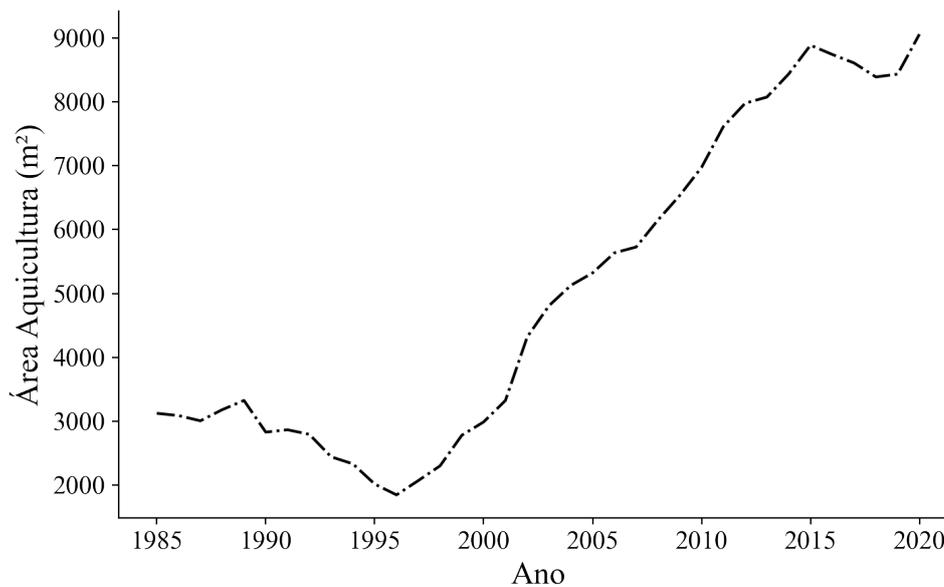


Figura 36: Variação da área de aquicultura (m^2) em função do ano para o estado do Ceará.

A prática da aquicultura no estado do Ceará teve um aumento significativo a partir do ano de 1998, passando de uma área de aproximadamente $2.000 m^2$ para $9.000 m^2$ em 2021.

Diante desta análise, o estudo foi direcionado para a prática de aquicultura na área de estudo para avaliar se isso pode representar um fator contribuinte para as taxas de variação da linha de costa observadas. A Figura 37 apresenta a área de aquicultura durante os anos 1985 e 2021.

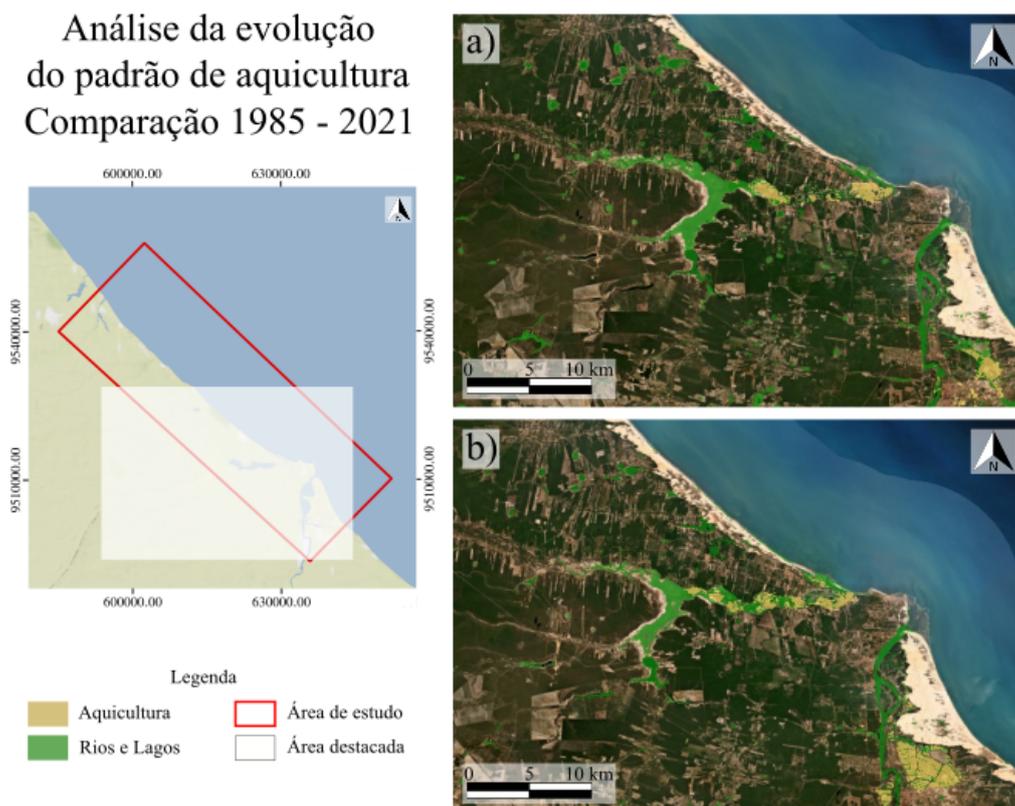


Figura 37: Mapa de evolução do padrão de aquicultura na região. Anos de (a) 1985 e (b) 2021.

É possível perceber o aumento da área que representa a aquicultura (destaque em amarelo), o que condiz com o gráfico da Figura 36.

Elaborou-se um *buffer* ao longo do curso do Rio Piranji por meio do ArcGIS (Figura 38) para verificar a dinâmica da aquicultura neste corpo hídrico. A geometria em azul simboliza o rio e a geometria em vermelho destaca a área de aquicultura.

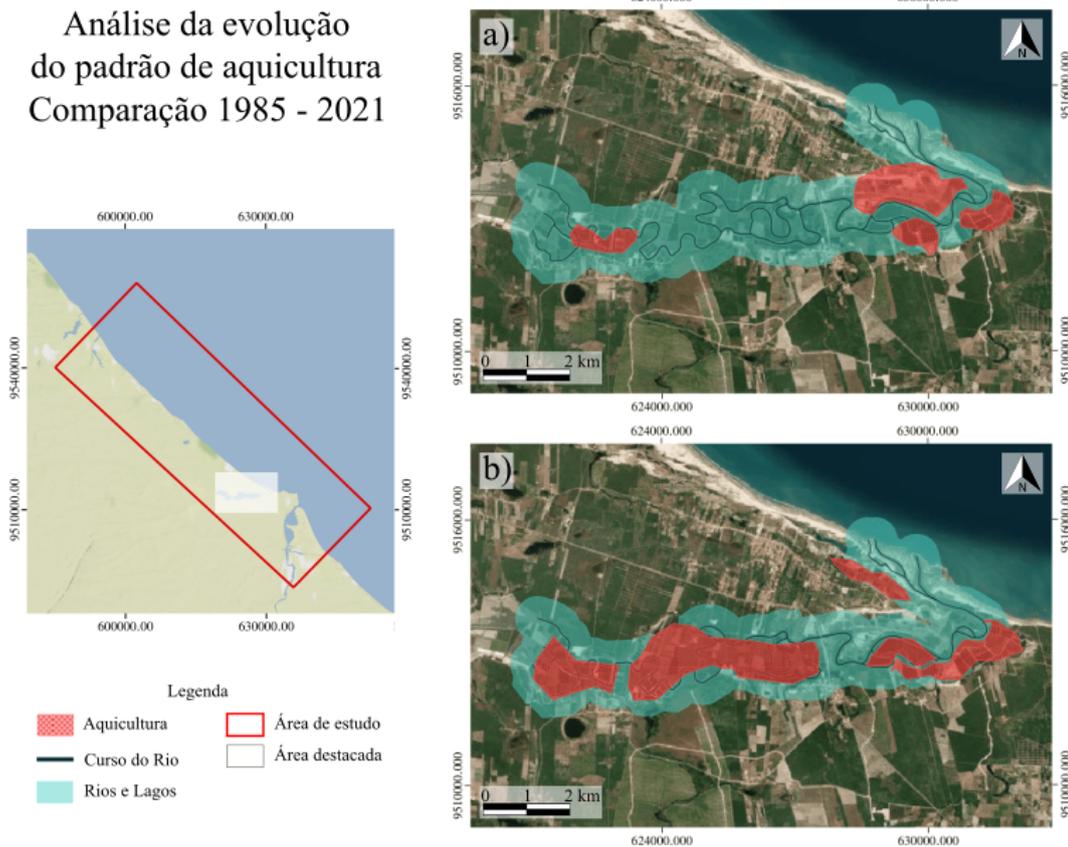


Figura 38: *Buffer* obtido por meio do ArcGIS. Comparação entre as feições de aquicultura em (a) 1985 e (b) 2021 ao longo do Rio Piranji.

Para uma comparação quantitativa da região de interesse, os dados retirados a partir do *buffer* são dispostos no gráfico da Figura 39. Em 1985 a área de rios e lagos equivalia a aproximadamente 20.571 m², enquanto a aquicultura representava aproximadamente 3.712 m².

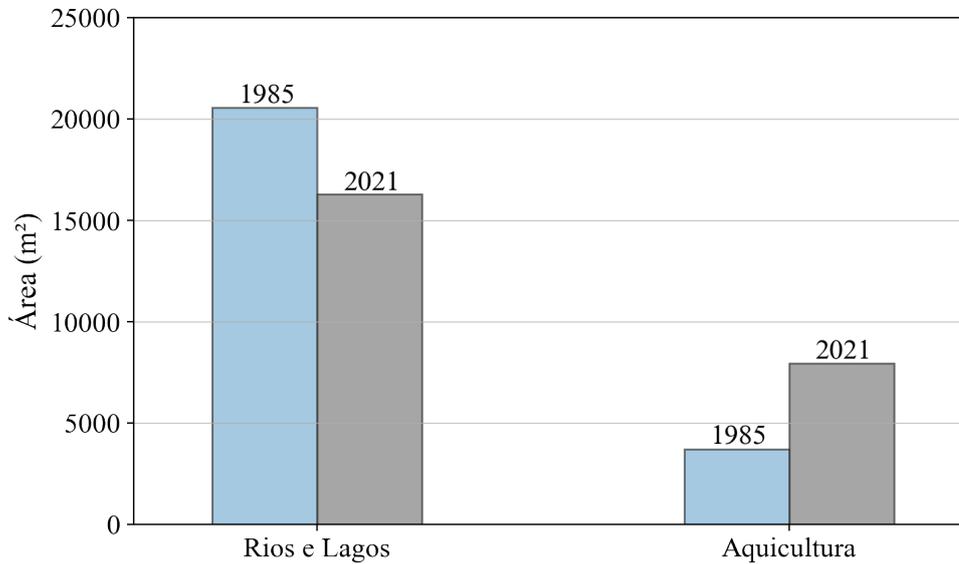


Figura 39: Histogramas gerados para as áreas de Rios e Lagos e Aquicultura nos anos de 1985 e 2021.

Já no ano de 2021, a área correspondente a rios e lagos diminuiu cerca de 20,83% em relação a 1985. No âmbito de aquicultura, houve um aumento de aproximadamente 114,09% em relação ao primeiro ano de análise (1985). Sendo assim, a área de aquicultura passou de 3.712 m² para 7.947² em um período de 36 anos.

5.3 Análise da Prática de Aquicultura e Região Ero- dida

A partir dos dados temporais de uso e cobertura disponibilizados pelo MapBiomas, elaborou-se o gráfico da variação da aquicultura ao longo das últimas décadas no município de Fortim, apresentado na Figura 40 (azul tracejado).

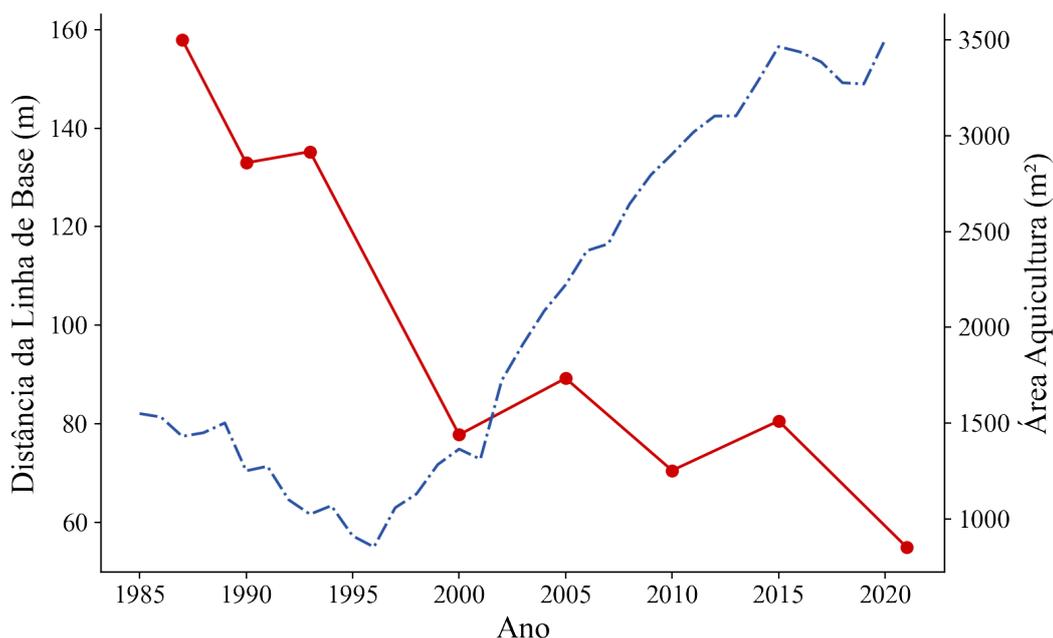


Figura 40: Em azul, variação da área destinada à aquicultura no município de Fortim. Em vermelho, média das distâncias da linha de base dos transectos próximos à foz do Rio Piranji.

O comportamento deste gráfico é similar à variação da aquicultura no estado do Ceará (Figura 36), o que reflete um aumento significativo desta prática na região. A área destinada à aquicultura em Fortim passou de menos de 1000 m² para mais de 3000 m² em 36 anos. Parte desta área localiza-se ao longo do Rio Piranji, como indicado no *buffer* da Figura 38.

Foram extraídos os valores anuais de variação da distância da encosta dos transectos de número 90 a 110 (Figura 32), que compreendem a foz do Rio Piranji. Para cada ano, calculou-se a média de variação entre estes 20

transectos. O resultado é apresentado pela curva vermelha na Figura 40.

A média da variação dos transectos selecionados possui uma tendência de diminuição, o que indica um recuo da linha de costa. Tal recuo configura a remoção do material sedimentar ou erosão da região. A média da distância da linha de base era de 157,9 metros em 1985 e caiu para 55,3 metros em 2021. Dessa forma, os dados indicam um recuo médio de mais de 100 metros nos últimos 36 anos na região próxima à foz do Rio Piranji.

O valor do coeficiente de correlação (Pearson) calculado entre as duas curvas é igual a -0.77, o que indica uma dependência da diminuição da distância da linha de base com o aumento da área de aquicultura. Esta dependência também é notada na Figura 41, em que a área da aquicultura é o eixo x e a média das distâncias da encosta é o eixo y. O gráfico possui o comportamento esperado a partir do coeficiente de correlação apresentado: o aumento da área de aquicultura causa a diminuição da distância da encosta.

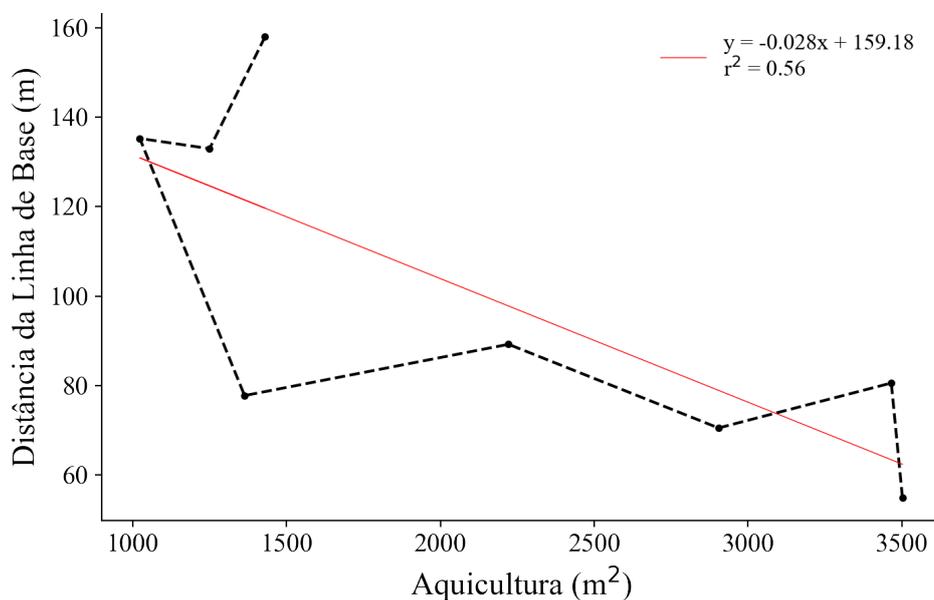


Figura 41: Distância média da linha de costa (m) em função do aumento da área de aquicultura (m²).

Assim, um provável fator que impacta a erosão da linha de costa da

região adjacente à desembocadura do Rio Piranji é o aumento da prática de aquicultura neste corpo hídrico. Houve um aumento superior a 114% da área destinada à aquicultura, o que sugere a falta de planejamento do uso e ocupação da área do rio. Uma possível decorrência é o aumento da erosão da encosta, como indicado pela diminuição da distância da linha de costa (Figura 40).

O estudo de Franco et al. (2012) ressalta a importância de um monitoramento sistemático mediante a alta vulnerabilidade das praias adjacentes a desembocaduras fluviais, por serem informações muito importantes para a gestão do litoral. Dessa forma, sugestões para reduzir os altos valores de erosão identificados na região consistem na adoção de políticas públicas com o intuito de ordenar o uso e ocupação da área do Rio Piranji e na elaboração de estudos mais aprofundados sobre o impacto ambiental da ocupação antrópica ao longo da região. Para futuras pesquisas sugere-se aprofundar no diagnóstico dos processos erosivos na região próxima ao Rio Jaguaribe e relacionar com a evolução das práticas de aquicultura.

6 Conclusão

Com o intuito de diagnosticar o processo erosivo na região costeira de Fortim, o presente trabalho contou com imagens temporais de satélite Landsat disponíveis na plataforma CASSIE, cedidas gratuitamente pelo *Google Earth Engine*. De tal modo foi possível obter imagens temporais e delimitar zonas sujeitas ao processo erosivo na costa do município de Fortim desde o ano de 1985 ao ano de 2021.

A plataforma utilizou a ferramenta de extensão DSAS para calcular a variação da linha de costa e gerou 143 transectos ao longo da linha de base. Analisou-se que as maiores taxas de avanço do mar em relação à costa foram de -11,78 m/ano. A média da taxa de variação da linha de costa dos 60 primeiros transectos foi igual a -0,08 m/ano, o que indica estabilidade da encosta. Dos transectos de número 61 a 130, observou-se valores mais elevados, com média de -2,2 m/ano, o que configura erosão crítica. Para os últimos transectos (número 131 a 143), a média é igual a 0,83 m/ano, o que configura uma erosão acrescida.

A partir dos dados de uso e cobertura do solo disponibilizados pelo Map-Biomas, extraiu-se as informações de aquicultura para gerar análises do padrão de variação desta prática na região, com foco no Rio Piranji. Assim, foi possível notar um elevado aumento da aquicultura nos últimos 36 anos, correspondendo a mais de 114%. Isso se deve à ocupação antrópica desordenada para esta finalidade ao longo do rio, o que reflete a falta de políticas públicas na região que organizem tal ocupação.

O aumento da aquicultura no Rio Piranji é um provável agravante à erosão das zonas costeiras próximas à foz, como analisado na variação temporal da distância da linha de costa dos transectos desta região. O comportamento apresentado pelos transectos é de recuo ao longo dos últimos anos, com uma redução de quase 100 metros da linha costeira.

Outras causas prováveis da erosão costeira na região são a diminuição das vazões das bacias hidrográficas do Rio Piranji em decorrência do aumento de barramentos artificiais presentes ao longo deste corpo hídrico, como discutido por de Farias e Maia (2010), e a própria dinâmica de ventos e marés presente

na desembocadura.

A elaboração de prognósticos de modificação da linha de costa são subsídios relevantes às estratégias de gestão de zona costeira (Franco et al., 2012). Possíveis soluções que podem ser implementadas como forma de mitigar as elevadas taxas erosivas analisadas é a aplicação de políticas públicas para ordenar o uso e ocupação da área e a investigação mais a fundo da prática desordenada da aquicultura e de barramentos artificiais no Rio Piranji. Pesquisas futuras podem focar em estudar e analisar a foz do Rio Jaguaribe para complementar este trabalho acerca de assuntos erosivos na região de Fortim.

Referências Bibliográficas

- Agostini, L., 2019, Efeitos da urbanização sobre a estrutura e funcionamento de comunidades macrobênticas de ambientes estuarinos de Santa Catarina: Trabalho de Conclusão de Curso - Centro de de Ciências Físicas e Matemáticas, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Almeida, L. P., I. E. de Oliveira, R. Lyra, R. L. S. Dazzi, V. G. Martins, e A. H. da Fontoura Klein, 2021, Coastal analyst system from space imagery engine (CASSIE): shoreline management module: *Environmental Modelling & Software*, **140**, 105033.
- Awaludin, N., 2010, Geographical information systems with ArcGIS 9. X principles, techniques, applications, and management: Penerbit Andi.
- Baumgardner, M. F., L. F. Silva, L. L. Biehl, e E. R. Stoner, 1986, Reflectance properties of soils: *Advances in agronomy*, **38**, 1–44.
- Campos-Taberner, M., Moreno-Martínez, F. J. García-Haro, G. Camps-Valls, N. P. Robinson, J. Kattge, e S. W. Running, 2018, Global estimation of biophysical variables from Google Earth Engine platform: *Remote Sensing*, 1167.
- Cavalcante, J. C., A. M. Vasconcelos, M. F. Medeiros, e I. G. Paiva, 2003, Mapa geológico do estado do Ceará.
- Cavalcante, J. d. S. I., e M. A. I. Aloufa, 2018, Gerenciamento costeiro integrado no Brasil: uma análise qualitativa do Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro/Coastal Management integrated in Brazil: a qualitative analysis of National Coastal Management Plan: *DRd-Desenvolvimento Regional em debate*, **8**, 89–107.
- Curityba, A. G. S., R. A. T. Santos, F. D. P. Alves, et al., 2007, Atenuação atmosférica da radiação infravermelha: Influência de elevados níveis higrométricos no desempenho operacional de mísseis ar-ar.: IX Simpósio de Guerra Eletrônica, **GE**, 55.
- da Silva, A. C., e M. C. de Araujo Filho, 2006, An analysis of water properties in the western tropical Atlantic using observed data and numerical model results: Tese de Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco.

- de Claudino Sales, V., e J.-P. Peulvast, 2006, Geomorfologia da Zona Costeira do estado Estado Ceará, Nordeste do Brasil: Litoral e Sertão: Natureza e Sociedade no Nordeste Brasileiro, **1**, 349.
- de Farias, E. G. G., e L. P. Maia, 2010, Uso de técnicas de geoprocessamento para a análise da evolução da linha de costa em ambientes litorâneos do Estado do Ceará, Brasil: Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, **10**, 521–544.
- de Gouveia Souza, C. R., 2009, A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no brasil: Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management, **9**, 17–37.
- Diniz, R. F., 2002, Erosão costeira ao longo do litoral oriental do Rio Grande do Norte: causas, conseqüências e influência nos processos de uso e ocupação da região costeira: Tese de Doutorado - Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.
- Einstein, A., 1982, How I created the theory of relativity: Physics today, **35**, 45–47.
- Esteves, L. S., e C. W. Finkl, 1998, The problem of critically eroded areas (CEA): an evaluation of Florida beaches: Journal of Coastal Research, 11–18.
- Ferreira, A. G., e N. G. da Silva Mello, 2005, Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região: Revista brasileira de climatologia, **1**.
- Ferreira, L. P. d. L. Q., M. C. Cavalcante, M. L. de Araújo Brito, M. V. P. de Araújo, et al., 2012, Importância da pesquisa de mercado para organização rural: uma breve reflexão: Revista de Casos e Consultoria, **3**, e311–e311.
- Figueiredo, D., 2005, Conceitos básicos de sensoriamento remoto: São Paulo: Conab.
- Francisco de Oliveira, M., 2004, Sensoriamento remoto: Instrumento para o planejamento e gestão do ambiente urbano: Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco.
- Franco, C. G. d. M., V. E. Amaro, e M. Souto, 2012, Prognóstico da erosão

- costeira no litoral setentrional do Rio Grande do Norte para os anos de 2020, 2030 e 2040: *Revista de Geologia*, **25**, 37–55.
- Ganem, K. A., 2017, Classificação da cobertura do solo na Caatinga a partir de imagens do Landsat-8 e da ferramenta Google Earth Engine: uma comparação entre dados com e sem correção atmosférica: Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Garrison, T., 2010, Fundamentos de oceanografia: Cengage Learning.
- Gaspar, A., 2013, Compreendendo a Física: 2^o Edição. São Paulo: Ática.
- Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, e R. Moore, 2017, Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone: *Remote sensing of Environment*, **202**, 18–27.
- Gruber, N. L. S., E. G. Barboza, e J. L. Nicolodi, 2003, Geografia dos sistemas costeiros e oceanográficos: subsídios para gestão integrada da zona costeira: *Gravel*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **1**, 81–89.
- Guerra, J. B., B. Schultz, e I. Sanches, 2017, Mapeamento automático da expansão da agricultura anual no MATOPIBA entre 2002 e 2015 utilizando a plataforma Google Earth Engine: Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR. Santos, 6850–6857.
- Guerra, R., 2018, Erosão de praia associada a evolução do esporão arenoso em Parajuru, Beberibe, Ceará: Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Halliday, D., R. Resnick, e J. Walker, 1993, *Fundamentals of Physics*: New York: Wiley.
- IPECE, 2021, Relatório dos indicadores sociais do estado do Ceará: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Estado do Ceará, Fortaleza, 70 p.
- Jensen, J. R., 2000, *Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective*: New Jersey: Prentice Hall.
- Leite, N. S., I. M. Rizzatti, e E. V. da Silva, 2016, Análise paisagística do litoral do município de Fortim–Ceará: Subsídios ao planejamento ambiental local: *Espaço Aberto*, **6**, 103–126.
- Lins-de Barros, F. M., 2005, Risco e vulnerabilidade à erosão costeira no Município de Maricá, Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado - Pós-

- Graduação em Geografia-, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Maia, L. P., J. A. Jiménez, J. S. Raventos, e J. O. de Moraes, 2000, Dune migration and aeolian transport along Ceará State, Brazil: downscaling and upscaling aeolian induced processes: *Arquivos de Ciências do Mar*, **33**, 99–106.
- Martin, L., e J. M. L. Dominguez, 1994, Geological history of coastal lagoons: Elsevier, **60**, 41–68.
- Maxwell, J. C., 1954, *Electricity and magnetism*: New York: Dover.
- Meneses, P. R., e T. d. Almeida, 2012, *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*: Universidade de Brasília, Brasília.
- Moraes, A. C. R., 2007, *Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil: elementos para uma geografia do litoral brasileiro*: Annablume, **47**.
- Moraes, E. C., 2002, *Fundamentos de sensoriamento remoto - Capítulo 1*: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, **1**.
- Moraes, J., C. Granjero, E. Da Silva, e M. Souza, 2002, *Diagnóstico geoambiental da Bacia do Jaguaribe: Relatório da PROJUR/SEMACE*. 143p.
- Moraes, J. O., G. S. S. Freire, L. S. Pinheiro, M. J. N. Sousa, A. M. Carvalho, P. R. S. Pessoa, e S. H. M. Oliveira, 2006, *Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro—Ceará: Erosão e Progradação do Litoral Brasileiro*. Brasília: MMA, 133–154.
- Muehe, D., 2001, Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gerenciamento: *Revista brasileira de geomorfologia*, **2**.
- Muehe, D., et al., 2006, *Erosão e progradação do litoral brasileiro*: Brasília: Ministério do Meio Ambiente, **1**, 475.
- Nepstad, D., D. McGrath, C. Stickler, A. Alencar, A. Azevedo, B. Swette, T. Bezerra, M. DiGiano, J. Shimada, R. S. da Motta, E. Armijo, L. Castello, P. Brando, M. C. Hansen, M. McGrath-Horn, O. Carvalho, e L. Hess, 2014, Slowing Amazon deforestation through public policy and interventions in beef and soy supply chains: *Science*, **344**, 1118–1123.
- Nordstrom, K. F., N. L. Jackson, e K. H. Korotky, 2011, Aeolian sediment transport across beach wrack: *Journal of Coastal Research*, 211–217.

- Otsu, N., 1979, A threshold selection method from gray-level histograms: IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, **9**, 62–66.
- Pekel, J.-F., A. Cottam, N. Gorelick, e A. S. Belward, 2016, High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes: Nature, **540**, 418–422.
- Pinheiro, L. d. S., J. Morais, A. Cavalcante, D. P. d. Paula, e R. Silva, 2008, Erosão costeira em praias adjacentes às desembocaduras fluviais: O caso de Pontal de Maceió, Ceará, Brasil: Revista de Gestão Costeira Integrada, **2**, 61–76.
- Raven, P. H., R. F. Evert, e S. E. Eichhorn, 2007, Biologia vegetal: Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A., 830–830.
- Rodrigues, T. d. S., 2018, Detecção de desmatamentos no oeste da Bahia com dados de radar (Sentinel-1A) utilizando a plataforma Google Earth Engine: Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- Rosa, R., 1990, Introdução ao sensoriamento remoto: Minas Gerais: EDUFU.
- Shimabukuro, Y. E., E. M. Novo, e F. J. Ponzoni, 1998, Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal: Pesquisa Agropecuária Brasileira, **33**, 1729–37.
- Silva, H. P., 2009, Mapeamento das áreas sob risco de desertificação no semiárido de Pernambuco a partir de imagens de satélites: Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
- Silva, J. M. O., 2012, Análise integrada na bacia hidrográfica do rio pirangi-ce: subsídios para o planejamento ambiental.
- Slater, P. N., 1980, Remote sensing: optics and optical systems: Massachusetts: Wesley Publishing Company, Reading.
- Souza Pinheiro, L. d., J. O. d. Morais, e L. P. Maia, 2016, The beaches of Ceará: Brazilian Beach Systems, Springer, 175–199.
- Steffen, C. A., E. C. Moraes, e F. F. Gama, 1996, Radiometria óptica espectral: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, **8**, 1–1.
- Thieler, E. R., E. A. Himmelstoss, J. L. Zichichi, e A. Ergul, 2009, The digital shoreline analysis system (DSAS) version 4.0 - an ArcGIS extension for

calculating shoreline change: Technical report, US Geological Survey.
Young, H. D., e R. A. Freedman, 2009, Física IV: Ótica e física moderna:
Rio de Janeiro: LTC, 4.