



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CARTOGRÁFICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E  
TECNOLOGIAS DE GEOINFORMAÇÃO

SANDERLLAN DAWILLIN DE SOUZA COSTA

**MUDANÇAS GEOMORFOLÓGICAS NA DESEMBOCADURA DO RIO  
MARACÁIPE-PE INDUZIDAS POR INTERFERÊNCIAS ANTRÓPICAS**

RECIFE-PE

2024

SANDERLLAN DAWILLIN DE SOUZA COSTA

**MUDANÇAS GEOMORFOLÓGICAS NA DESEMBOCADURA DO RIO  
MARACÁIPE-PE INDUZIDAS POR INTERFERÊNCIAS ANTRÓPICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientadora– Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Mirella Borba Santos Ferreira Costa

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

RECIFE-PE

2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Costa, Sanderllan.

Mudanças geomorfológicas na desembocadura do rio Maracaípe-PE induzidas por interferências antrópicas / Sanderllan Dawillin de Souza Costa. - Recife, 2024.

93f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2024.

Orientação: Mirella Borba Santos Ferreira Costa.

Coorientação: Paulo Henrique Gomes de Oliveira Sousa.

1. Dinâmica desembocadura; 2. Intervenções antrópicas; 3. DSAS; 4. Erosão costeira; 5. Pernambuco; 6. Maracaípe. I. Costa, Mirella Borba Santos Ferreira. II. Sousa, Paulo Henrique Gomes de Oliveira. III. Título.

UFPE-Biblioteca Central



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**

Ata da defesa/apresentação do Trabalho de Conclusão de Curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - CTG da Universidade Federal de Pernambuco, no dia 30 de agosto de 2024.

**ATA Nº 224**

Aos 30 (trinta) dias do mês de agosto de 2024, às 16:00 horas, em sessão pública realizada de forma remota, teve início a defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **MUDANÇAS GEOMORFOLÓGICAS NA DESEMBOCADURA DO RIO MARACAÍPE-PE INDUZIDAS POR INTERFERÊNCIAS ANTRÓPICAS** do mestrando Sanderllan Dawillin de Souza Costa, na área de concentração Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, sob a orientação da Profa. Mirella Borba Santos Ferreira Costa. A Comissão Examinadora foi aprovada pelo colegiado do programa de pós-graduação em 21/8/2024, sendo composta pelos examinadores: Profa. Dra. Mirella Borba Santos Ferreira Costa da Universidade Federal de Pernambuco, Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves da Universidade Federal de Pernambuco e Prof. Dr. Antonio Vicente Ferreira Junior da Universidade Federal de Pernambuco. Após cumpridas as formalidades conduzidas pela presidente da comissão, a professora Mirella Borba Santos Ferreira Costa, o candidato ao grau de Mestre foi convidado a discorrer sobre o conteúdo do Trabalho. Concluída a explanação, o candidato foi arguido pela Comissão Examinadora que, em seguida, reuniu-se para deliberar e conceder ao mesmo a menção **APROVADO**. Para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, o concluinte deverá ter atendido todas às demais exigências estabelecidas no Regimento Interno e Normativas Internas do Programa, nas Resoluções e Portarias dos Órgãos Deliberativos Superiores, assim como no Estatuto e no Regimento Geral da Universidade, observando os prazos e procedimentos vigentes nas normas.

**Dr. ANTONIO VICENTE FERREIRA JUNIOR, UFPE**

Examinador Externo ao Programa

**Dr. RODRIGO MIKOSZ GONCALVES, UFPE**

Examinador Interno

**Dra. MIRELLA BORBA SANTOS FERREIRA COSTA, UFPE**

Presidente

**SANDERLLAN DAWILLIN DE SOUZA COSTA**

Mestrando(a)

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Mirella Costa, pela orientação paciente, apoio constante e contribuições valiosas ao longo deste percurso acadêmico. Agradeço também ao meu coorientador, Prof. Paulo Sousa, pela colaboração e por compartilhar seu vasto conhecimento, que foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À empresa TPF Engenharia, por todo o apoio e incentivo ao aperfeiçoamento profissional de seus colaboradores, proporcionando-me a oportunidade de crescer tanto pessoal quanto profissionalmente.

Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando nos momentos mais desafiadores. Agradeço também aos amigos da Universidade e do Trabalho, cujas trocas de experiências e companheirismo tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora.

Por fim, e com especial carinho, agradeço à minha querida esposa, Laysla Pessoa, pelo amor, paciência e incentivo incondicional durante todo este processo. Sua presença foi fundamental para que eu pudesse concluir mais esta etapa da minha vida.

## RESUMO

O estudo concentra-se em analisar as transformações geomorfológicas e ambientais induzidas por atividades antrópicas na desembocadura do Rio Maracaípe, em Pernambuco. Empregando uma combinação de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas SIG para vetorização e delimitação das áreas, utilizando multifontes de informação espaciais com imagens de alta e baixa resolução para documentar as mudanças ocorridas entre 1980 e 2023, além de análises realizadas com o Digital Shoreline Analysis System (DSAS) e o método End Point Rate (EPR). A análise com imagens de satélite de baixa resolução de frequência aproximadamente anual, permitiu identificar o crescimento dos esporões ao longo das décadas. Entre 1980 e 1996, o esporão norte localizado na margem da praia de Maracaípe, experimentou um crescimento de aproximadamente 22%, enquanto o esporão sul localizado na margem da praia de Serrambi, cresceu aproximadamente 30%. Durante este período, também foi possível observar a variação na desembocadura do Rio Maracaípe, que, antes de 1996, variava entre as direções norte e leste. A partir de 1996, essa desembocadura se estabilizou na direção leste, em grande parte devido à fixação antrópica do esporão sul, iniciada em 1987. Com o uso de imagens de alta resolução espacial, o estudo aprofundou a análise das transformações costeiras, documentando alterações na cobertura e uso e ocupação dos esporões ao longo dos anos. Houve uma mudança do padrão de deposição dos sedimentos com erosão progressiva no setor da praia e acresção na área estuarina, o que acarretou um aumento significativo na área de manguezais no esporão norte, com um crescimento de cerca de 34%, atribuído ao acúmulo de sedimentos no interior do esporão. Paralelamente, a presença de edificações nos esporões aumentou exponencialmente, saindo de 0,002 ha de área ocupada para 2,48 ha ao longo das últimas décadas. A fixação do esporão sul foi consolidada com a construção de enrocamentos, que contribuíram para a supressão da praia e estabilização artificial da linha de costa. O uso do DSAS foi fundamental para as análises da linha de costa, permitindo a quantificação da taxa média de erosão na linha de beira mar do esporão norte, que foi de 0,38 centímetros por ano, atingindo até 15 m de avanço da linha de costa em direção ao continente. E no setor dos coqueirais na ponta do esporão atingiu 215 m de avanço. Este dado é particularmente relevante, pois a erosão no esporão norte está diretamente relacionada à mudança na deposição de sedimentos, agora direcionada para o leste, após a estabilização da desembocadura. Além disso, a análise revelou o descobrimento de recifes de corais que emergiram devido à migração dos sedimentos acumulados para o leste, em função do deslocamento da desembocadura. Os resultados mostraram que intervenções antrópicas significativas, como a fixação do esporão sul e outras, alteraram a dinâmica sedimentar da região e promoveram variações substanciais da linha de costa ao longo do tempo. Este estudo oferece uma compreensão abrangente das mudanças geomorfológicas na região de Maracaípe, destacando a interação complexa entre processos naturais e intervenções humanas. As descobertas fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de gestão costeira que visam mitigar os impactos negativos e promover a sustentabilidade dos ecossistemas costeiros e das infraestruturas urbanas locais.

**Palavras-Chave:** dinâmica desembocadura, intervenções antrópicas, DSAS, erosão costeira, Pernambuco, Maracaípe, Brasil.

## ABSTRACT

The study focuses on analyzing the geomorphological and environmental transformations induced by human activities at the mouth of the Maracaípe River, in Pernambuco. Employing a combination of remote sensing techniques and GIS systems for vectorization and delimitation of areas, using multiple sources of spatial information with high- and low-resolution images to document the changes that occurred between 1980 and 2023, in addition to analyses carried out with the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) and the End Point Rate (EPR) method. The analysis with low resolution satellite images of approximately annual frequency allowed identifying the growth of the spurs over the decades. Between 1980 and 1996, the northern spur located on the shore of Maracaípe beach experienced a growth of approximately 22%, while the southern spur located on the shore of Serrambi beach grew approximately 30%. During this period, it was also possible to observe the variation in the mouth of the Maracaípe River, which, before 1996, varied between the north and east directions. From 1996 onwards, this mouth stabilized in the east direction, largely due to the anthropogenic fixation of the southern spur, which began in 1987. Using high spatial resolution images, the study deepened the analysis of coastal transformations, documenting changes in the coverage and use and occupation of the spurs over the years. There was a significant increase around mangroves on the northern spur, with a growth of approximately 34%, attributed to the accumulation of sediments inside the spur. At the same time, the presence of buildings on the spurs increased exponentially, going from 0.002 ha of occupied area to 2.48 ha over the last decades. The fixation of the southern spur was consolidated with the construction of riprap, which contributed to the suppression of the beach and artificial stabilization of the coastline. The use of DSAS was essential for the analysis of the coastline, allowing the quantification of the average erosion rate on the seashore line of the northern spur, which was 0.38 centimeters per year, reaching up to 15 m of advance of the coastline towards the continent. And in the coconut groves sector at the tip of the spur, it reached 215 m of advance. This data is particularly relevant, since erosion on the northern spur is directly related to the change in sediment deposition, now directed to the east, after the stabilization of the mouth. In addition, the analysis revealed the discovery of coral reefs that emerged due to the migration of accumulated sediments to the east. These reefs play a crucial role in the stabilization of submerged banks, absorbing wave energy and, thus, protecting the coast from erosion and maintaining the morphological stability of the region. The results showed that significant anthropogenic interventions, such as the fixation of the southern spur and others, have altered the sedimentary dynamics of the region and promoted substantial variations of the coastline over time. This study provides a comprehensive understanding of the geomorphological changes in the Maracaípe region, highlighting the complex interaction between natural processes and human interventions. The findings provide a solid basis for the development of coastal management strategies that aim to mitigate negative impacts and promote the sustainability of coastal ecosystems and local urban infrastructures.

**Keywords–** estuary dynamics, human interventions, DSAS, coastal erosion, Pernambuco, Maracaípe, Brazil.

## Lista de Figuras

Figura 1– Localização da área de estudo no Brasil; localização do município de Ipojuca, Litoral sul de Pernambuco. ....	27
Figura 2– Processo de georreferenciamento da Imagem de 1980, disponibilizada pela CONDEPE/FIDEM.....	31
Figura 3– Processo de georreferenciamento da Imagem de 1996 disponibilizada pela CONDEPE/FIDEM. A metodologia adotou 10 pontos de controle. ....	32
Figura 4– Coleta de dados topográficos. A) do dia 03/08/2023 e B) do dia 01/09/2023. ....	33
Figura 5– Erro quadrático médio dos pontos de controle. ....	34
Figura 6– Ortomosaico gerado pelo DroneDeploy. A) ortomosaico do dia 03 de agosto de 2023 e B) ortomosaico do dia 01 de setembro de 2023. ....	34
Figura 7– Imagem Landsat 5 de 1984.....	40
Figura 8– Imagem Landsat 8 de 2023.....	41
Figura 9– Estabilização do curso principal do rio. ....	42
Figura 10– Gráfico das áreas dos esporões de 1984 até 2023.....	43
Figura 11– Gráfico da vegetação dos esporões de 1984 até 2023. ....	43
Figura 12– Imagens dos esporões na foz do rio Maracaípe em diferentes morfologias.....	45
Figura 13– Mapa com informações de 1980. ....	46
Figura 14– Mapa com informações de 1996. ....	47
Figura 15– Mapa com informações de 2015. ....	48
Figura 16– Gráfico da altura significativa da onda. ....	48
Figura 17– Gráfico da altura da maré.....	49
Figura 18– Mapa com informações de 08/2023. ....	50
Figura 19– Mapa com informações de 09/2023. ....	50
Figura 20– Gráfico de área dos esporões nas imagens de alta resolução.....	51
Figura 21– Gráfico de vegetação predominante - coqueiral.....	51
Figura 22– Gráfico de vegetação predominante – manguezal.....	52
Figura 23– Gráfico de edificações nas imagens de alta resolução. ....	52
Figura 24– Evolução da linha de costa. ....	53
Figura 25– Mapa com transecto do esporão norte e sul. ....	55
Figura 26– Características da evolução dos esporões de 1980 a 2023.....	56
Figura 27– Mapa com transectos dos corais expostos. ....	57
Figura 28– Mapa comparativo do curso principal do rio de 1980 x 2023. ....	59
Figura 29– Mapa de erosão e acreção comparativa com 1980.....	62
Figura 30– Mapa linha de beira-mar de 1980 e 2023.....	63
Figura 31– Migração dos bancos submersos ao longo dos anos.....	64
Figura 32– Indicação das erosões e acresção nos esporões.....	66
Figura 33– Linha do tempo dos principais acontecimentos.....	67

## Lista de Tabelas

Tabela 1– Dados das imagens do satélite Landsat, respectivos anos/data/hora e dados monitorados das marés, com respectivas data/hora/altura– ..... 37

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
3.1 Dinâmicas de Desembocaduras de Rios.....	16
3.2 Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Ocupação Urbana em Zonas Costeiras.....	18
3.3 Migração de Bancos Submersos– Conceitos e Processos.....	22
3.4 Estudos Anteriores sobre a Região de Maracaípe.....	24
<b>4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	27
4.1 Caracterização da Área de Estudo.....	27
4.2 Aquisição e Processamento de Imagens.....	29
4.2.1 Imagens de alta resolução.....	29
4.2.1.1 Imagens aéreas.....	30
4.2.1.2 Imagens de RPA.....	32
4.2.1.3 Variação da linha de costa.....	35
4.2.2 Imagens de baixa resolução espacial.....	36
4.3 Séries temporais de ondas e marés.....	38
<b>5. RESULTADOS</b> .....	39
5.1 Evolução anual da posição da desembocadura e dos esporões.....	39
5.2 Modificações temporais na ocupação urbana e elementos costeiros.....	44
5.3 Taxas de variações dos esporões e recifes de corais expostos.....	53
<b>6. DISCUSSÃO</b> .....	58
<b>7. CONCLUSÃO</b> .....	68
<b>8. REFERÊNCIAS</b> .....	70
<b>APÊNDICE A – IMAGENS DE SATÉLITES DE 1984 A 2023, A POLIGONAL AZUL REPRESENTA A ÁREA DO ESPORÃO DELIMITADA</b> .....	<b>76</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira compõe o espaço de convergência entre os processos continentais e oceânicos. Para envolver essa interação, é crucial considerar a dinâmica costeira, que engloba as transformações na forma da costa provocadas por correntes, marés, ventos e ondas ao longo de um período determinado (COSTANZA et al., 2008).

Os corpos sedimentares nas desembocaduras, como deltas formados durante as marés enchentes e vazantes, são importantes reservatórios de sedimentos, sejam temporários ou permanentes. Além disso, os deltas formados durante as marés vazantes impactam significativamente a distribuição da energia das ondas. Assim, essas formações ajudam a proteger a linha da costa. A migração das desembocaduras é um processo contínuo, impulsionado pela interação entre os sedimentos e as forças das marés e das ondas (CASSIANO; SIEGLE, 2010). Nestes ambientes dinâmicos podem apresentar mudanças em curto espaço, modificando outros ambientes associados a desembocadura, como os esporões (*spits*), pois envolvem o aporte sedimentar da deriva litorânea e rios, ocasionando em rápidas taxas de migração (NAGARAJAN et al., 2015).

Geomorfologia é o estudo da forma da terra. Os geomorfologistas costeiros estudam a maneira como zona costeira, uma das zonas mais dinâmicas e partes mutáveis da Terra, evolui (WOODROFFE, 2001).

A dinâmica de desembocaduras de rios são processos responsáveis por moldar as características geomorfológicas das regiões onde os rios encontram o mar. As desembocaduras, também conhecidas como estuários, são áreas de transição dinâmica onde as influências de correntes fluviais, marés, ondas e sedimentos convergem, resultando em uma variabilidade espacial e temporal significativa (WRIGHT; COLEMAN, 1973).

Um dos fenômenos geomorfológicos associados às desembocaduras é a formação de "*spits*", que são barreiras arenosas alongadas que se projetam a partir da costa devido à deposição de sedimentos transportados pelas correntes litorâneas. A migração dessas estruturas pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo a variação na vazão dos rios, a ação das ondas e a dinâmica das marés. Estudos

mostram que os esporões podem se formar e migrar ao longo do tempo, contribuindo para a migração das desembocaduras (COOPER, 2001).

Além dos processos naturais, as atividades antrópicas têm um impacto significativo na dinâmica das desembocaduras. A construção de obras de engenharia, como barragens, diques e canais de navegação, pode alterar drasticamente o regime hidrossedimentológico dos rios, afetando a quantidade e o padrão de distribuição de sedimentos que chegam à costa (SYVITSKI et al., 2005).

Por exemplo, na foz do Rio São Francisco, as modificações no curso do rio devido à construção de barragens têm resultado em uma redução significativa no transporte de sedimentos para a costa, provocando erosão severa e impactos negativos nos ecossistemas costeiros (BANDEIRA et al., 2013; CORREIA, 2020). Similarmente, pesquisas no delta do Rio Doce, em Linhares (ES), mostraram que a reconfiguração do curso do rio após eventos de cheia, combinada com a urbanização, alterou drasticamente a dinâmica sedimentar da região, exacerbando problemas de erosão (POLIZEL; ROSSETTI, 2014).

Esses estudos destacam a importância de um monitoramento contínuo e detalhado das mudanças costeiras para entender a influência das atividades humanas e das variações naturais sobre a morfologia e a hidrodinâmica das desembocaduras. Métodos como a análise de séries temporais de imagens de satélite e o uso de modelos digitais de terreno têm sido fundamentais para documentar e quantificar essas mudanças ao longo do tempo, fornecendo dados essenciais para a formulação de estratégias de gestão costeira eficazes (FENSTER; DOLAN; ELDER, 1993; LU; WENG, 2007).

Além da utilização de softwares GIS (Geographic information system), para delimitação das feições, e técnicas avançadas de geoprocessamento para tratamento e análise das informações. A ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS) permite calcular estatísticas de taxa de variação da linha de costa a partir de múltiplas linhas de costa georreferenciadas, proporcionando uma medida clara da velocidade e direção das mudanças costeiras (THIELER et al., 2009).

No caso do Rio Maracaípe, em Pernambuco, a urbanização crescente e a construção de infraestrutura turística têm modificado a dinâmica natural da desembocadura, levando a problemas como a erosão costeira e a perda de habitats críticos para a biodiversidade local (BARLETTA; COSTA, 2009).

Neste contexto, a interação entre processos fluviais, sedimentares, oceânicos e meteorológicos está intrinsecamente ligada à dinâmica da desembocadura de um rio. Essa complexa interação entre a hidrodinâmica fluvial e as dinâmicas oceânicas, incluindo variações sazonais do volume de água dos rios, sedimentação, correntes e marés, são fundamentais para entender as mudanças na morfologia costeira. Essas dinâmicas podem causar alterações significativas na geometria e na posição das fozes dos rios, impactando profundamente a estabilidade dos ecossistemas costeiros (NICHOLLS; CAZENAVE, 2010). Com isso, a dinâmica das desembocaduras fluviais é um aspecto crucial para compreender os processos naturais e antropogênicos que moldam as zonas costeiras. O Rio Maracaípe, localizado no estado de Pernambuco, apresenta uma desembocadura que sofreu interferência antrópica ao longo do tempo, impactando sua dinâmica e ecossistemas associados. Este estudo visa investigar os efeitos dessa interferência em longo prazo, analisando suas consequências sobre o ambiente costeiro e os processos naturais que o conduzem.

Na região onde há captação de água, não existe infraestrutura de tratamento de esgoto e abastecimento de água. Com isso, essa região sofre com vulnerabilidade ambiental por poluição causada por esgotos, fossas sépticas e resíduos sólidos, facilitando a contaminação (CPRM, 2019).

As áreas de desembocadura representam sistemas costeiros de alta dinâmica. A configuração do canal principal e dos depósitos sedimentares relacionados a esse sistema é influenciada pela amplitude das marés, pela entrada de sedimentos, pela influência das ondas, pelo fluxo de água doce, pelas correntes e pela topografia do leito (WRIGHT; COLEMAN, 1978).

A interferência antrópica na desembocadura do Rio Maracaípe tem sido objeto de estudo e preocupação com as atividades humanas, como urbanização desordenada, desmatamento e construção de infraestrutura, têm alterado significativamente a morfologia e hidrodinâmica das desembocaduras fluviais, resultando em mudanças ambientais de grande escala. Além disso, a interferência antrópica pode levar à degradação dos ecossistemas costeiros, afetando a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos fornecidos por essas áreas (SOBRAL et al., 1998).

No tocante, a interferência antrópica na desembocadura do Rio Macaraípe, ao longo do tempo, altera significativamente a dinâmica sedimentar e hidrológica da área,

resultando em mudanças na morfologia costeira, degradação da qualidade da água e redução da biodiversidade local (SOBRAL et al., 1998).

Referente a interferência antrópica o esporão sul teve em 1988 seu primeiro protocolo referente a sua fixação, e o esporão norte atualmente tem protocolo aberto no Tribunal Jurídico de Pernambuco (TJPE), referente ao cercamento da área ocorrido em 2022.

Compreender a evolução morfológica das desembocaduras e avaliar o impacto de fatores naturais e da interferência humana é de grande valor, que pode ajudar consideravelmente na previsão de comportamentos futuros destes ambientes depositáveis do ponto de vista científico, e facilitar estratégias de gestão e restauração estuarinas do ponto de vista da engenharia.

Neste contexto, torna-se fundamental compreender não apenas os impactos imediatos da interferência antrópica na desembocadura do Rio Maracaípe, mas também suas consequências a longo prazo para o equilíbrio ecológico e a sustentabilidade dos sistemas costeiros. Portanto, este estudo visa contribuir para o conhecimento científico sobre os efeitos da interferência humana nas dinâmicas costeiras, fornecendo subsídios para a gestão e conservação desses importantes ambientes naturais.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Realizar estudo na dinâmica da desembocadura no Rio Maracaípe observando os efeitos da interferência antrópica a longo prazo na evolução dos esporões (1980 a 2023) e nas consequentes modificações na cobertura vegetal, edificações, linha de costa, bancos submersos e recifes de coral, utilizando multifontes de informações espaciais.

### 2.2 Objetivos específicos

- Analisar a evolução anual dos esporões e posição da desembocadura do Rio Maracaípe no período entre 1984 e 2023, a partir de sensores satelital com baixa resolução espacial;
- Analisar as modificações na ocupação urbana e elementos costeiros como vegetação, bancos submersos, linha de costa e recifes de coral a partir de imagens de fotogrametria analógica (1980 e 1996), fotogrametria digital (2015) e RPAs em agosto e setembro de (2023), com alta resolução espacial.;
- Levantar informações sobre as principais interferências antrópicas ocorridas na desembocadura do Rio Maracaípe.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Dinâmicas de Desembocaduras de Rios

A região costeira é uma área de transição entre continente e mar. A linha de costa é uma área de influência de processos naturais que causam alterações sazonais nesta região. Assim, a zona costeira é a área onde os processos continentais e oceânicos se encontram. Para isso, entende-se que a dinâmica costeira é um conjunto de mudanças na forma de costa ocasionada por correntes, marés, ventos e ondas ao longo de um período específico. Estas interações causam processos de avanço e recuo da linha da costa, originando sua constante remodelação. É importante reconhecer que a constante alteração desses espaços é influenciada por ações tanto naturais quanto pelo impacto das atividades humanas (FRANÇA, 2003).

No entanto, ao longo do tempo, as alterações provocadas pelo aumento do nível do mar ou mudanças na geometria dos recifes, podem levar ao incremento da energia das ondas em diversas áreas protegidas, resultando em erosão (COSTA; MACEDO; SIEGLE, 2019).

A perda de habitat, muitas vezes vinculada a uma intensa ocupação urbana nas áreas costeiras, é identificada como uma das principais causas da diminuição da biodiversidade marinha (AIROLDI; BALATA; BECK, 2008).

De modo geral, a superfície terrestre experimenta tanto crescimento quanto erosão natural, influenciada pelas mudanças nos pontos onde os rios depositam seus sedimentos ao entrar no oceano, bem como pelas variações nos níveis marítimos ao longo de períodos extensos. A ação de tempestades e enchentes fluviais também impacta esses processos em escalas temporais mais breves. Contudo, ao longo das últimas décadas, tem-se observado uma deterioração acentuada em diversas formações geográficas localizadas nas desembocaduras dos rios. Esse fenômeno deve-se, em grande parte, à redução na quantidade de sedimentos que alcançam o oceano, provocada pelo represamento dos grandes rios (FAGHERAZZI et al., 2015).

Isso caracteriza um sistema com variação espacial e áreas que são denominadas pela maré enchentes e outras pela vazante. Assim, os estuários são sistemas caracterizados pelas correntes de maré, nas quais a direção dos fluxos se altera de forma regular. Frequentemente, os padrões de circulação associados às marés de enchente e vazante não se alinham (DE MIRANDA, 2002).

Em estuários onde predominam as ondas, estas têm um papel importante na boca do estuário, erodindo sedimentos da linha costeira e transportando-os ao longo da costa para criar bancos de areia. Por outro lado, nos estuários dominados pelas marés, as correntes marítimas têm um impacto significativo em comparação com o das ondas. Nessas áreas, é comum encontrar bancos de areia alinhados com o fluxo da corrente marítima, formando padrões pelos quais os sedimentos se movem e se depositam. À medida que nos afastamos para o interior do estuário, a influência das marés diminui e o movimento do rio passa a ser o fator dominante (REID, 2020).

Considerando a relevância da energia das marés, a barreira na desembocadura do estuário pode ser atravessada por um ou mais canais, conhecidos como inlets, que mantêm a conexão entre o estuário e as áreas marinhas adjacentes. Isso favorece a formação de deltas de maré cheia e de maré vazante (DE MIRANDA, 2002).

A complexidade da dinâmica da desembocadura de rios é influenciada por diversos fatores, incluindo o padrão de precipitações, a profundidade do canal, entre outros elementos que podem modificá-la (LEANDRO; NASCIMENTO; SOUZA, 2017).

Outro fator sobre a dinâmica da desembocadura, onde o estuário profundamente estratificado caracteriza-se por ser um estuário profundo onde a salinidade da camada superficial aumenta progressivamente da cabeceira até a foz, aproximando-se dos níveis de salinidade encontrados no mar aberto. A salinidade da água nas camadas mais profundas é consistentemente similar à do oceano, independente da profundidade ao longo de todo o estuário. Este tipo de estuário apresenta um padrão de circulação bem definido, onde a interação entre as águas superficiais e as profundas gera um fluxo contínuo das águas de fundo em direção à superfície. Em contraste, nos estuários levemente estratificados ou parcialmente misturados, ocorre uma mistura mais homogênea entre as águas doce e salgada em todas as profundidades, ainda que as camadas mais próximas ao fundo permaneçam tipicamente mais salinas que as superficiais (REID, 2020).

Estudos têm sido conduzidos com o objetivo de aprimorar a compreensão sobre a evolução desses sistemas intrincados, dado que as alterações morfológicas em esporões resultam em impactos, seja diretamente ou indiretamente, sobre as comunidades locais e a ecologia da zona costeira. Isso ocorre por influenciarem a localização e a dinâmica do intercâmbio hídrico entre os ambientes marinho e

estuarino, além de desempenharem um papel crucial na preservação do equilíbrio sedimentar da região costeira (DE MIRANDA, 2002).

As condições inerciais refletem um jato ilimitado desembocando em uma bacia profunda (em relação ao canal do rio) que resulta em barras lunares ou um delta clássico do “tipo Gilbert”. Em fluxos dominados pelo atrito, a hidrodinâmica da foz do rio é caracterizada pelo atrito do leito, espalhamento rápido e rápida divergência do dique em torno de uma barra central da foz (FAGHERAZZI et al., 2015).

A formação de esporões em uma desembocadura ocorre em um ou ambos os lados, dependendo da magnitude e direção do transporte longitudinal resultante. As ondas, responsáveis por gerar esse transporte, atuam em conjunto com as marés, exercendo considerável influência sobre os esporões. Quando esses esporões surgem em locais de baixa hidrodinâmica, caracterizados por poucas ondas, correntes fracas e um transporte incapaz de compensar o equilíbrio de sedimentos depositados, eles têm uma propensão a obstruir o canal ao qual estão associados (HOAN et al., 2011).

Os estuários desempenham um papel fundamental no transporte de sedimentos do continente para a plataforma continental, exercendo uma influência direta na dinâmica costeira. A quantificação das trocas de água e materiais nas desembocaduras fluviais é uma tarefa desafiadora, mas de importância crucial para compreender o funcionamento tanto dos estuários quanto da zona costeira (DYER; GONG; ONG, 1992).

Neste sentido, nas costas fortemente influenciadas pela ação das ondas, as regiões próximas à foz do estuário, localizadas na parte mais externa (desembocadura), recebem uma quantidade considerável de sedimentos. Esses sedimentos se acumulam, originando um complexo de ilhas-barreira que atuam como um escudo, reduzindo a energia das ondas e das correntes marítimas. Dessa forma, a parte interna do estuário é mantida protegida, o que beneficia a deposição de sedimentos mais finos transportados em suspensão (DE MIRANDA, 2002).

### 3.2 Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Ocupação Urbana em Zonas Costeiras

De acordo com a Lei 7.661/1988, as zonas costeiras são definidas como o espaço de interação entre o ar, o mar e a terra, englobando recursos renováveis e não renováveis tanto marítimos quanto terrestres. Isso abrange uma extensão marítima e terrestre e compreende a fronteira entre os continentes e grandes ilhas, onde os processos marinhos e terrestres atuam em conjunto, resultando em ambientes com características específicas e uma identidade única (BRASIL, 2006).

A região costeira é conhecida por oferecer uma variedade de recursos naturais e usos para seus espaços, abrangendo diferentes formas de ocupação e o desenvolvimento de diversas atividades humanas. Concentração populacional global causa sérios danos à dinâmica e frágil ecologia costeira-marinha sistemas, muitas vezes levando a grandes problemas e conflitos sociais (BELTRÁN, 2014).

A zona costeira exerce sobre a sociedade uma atratividade que resultou em ocupação e exploração intensas de seus recursos. Consequentemente, essa região tornou-se cada vez mais disputada, evidenciando a necessidade de estabelecer um processo de mediação de interesses entre diversos atores sociais atuantes nesse espaço. Além disso, é crucial adotar medidas para proteger as unidades geoambientais, as quais devem orientar a ordenação espacial desses interesses (Pitombeira & ALEME ROMCY, 2023)..

Historicamente, o chamado período aurífero nos séculos XVII e XVIII, houve uma significativa movimentação em direção ao interior. No entanto, após a exaustão das minas por extração de minérios, áreas que foram abandonadas. Diante dessa realidade e com preocupações sobre a ocupação territorial, o governo promoveu estímulos para o povoamento, destacando-se o ciclo do café, a expansão das ferrovias, o fomento da indústria e a construção de rodovias, visando redistribuir a população (MARQUES CARRIÇO; MENDES LOMBA PINHO, 2023).

As zonas costeiras da América Latina e do Caribe satisfazem o modelo descrito para as cidades e a degradação dos ecossistemas costeiros e marinhos. Para tanto, o desenvolvimento urbano nesta região está concentrado nas áreas costeiras (BELTRÁN, 2014).

Para tanto, é importante destacar, que nas zonas costeiras, frequentemente são implementadas ações e políticas de diversas naturezas, muitas vezes desprovidas de uma orientação cooperativa, resultando em ocupações conflituosas e processos de degradação ambiental. Entre as causas desses problemas estão o

desconhecimento dos bens públicos e de seus recursos ambientais, assim como a falta de integração entre os diferentes setores governamentais e a sociedade. Esse cenário tem como consequência a alteração dos espaços costeiros em grande parte do território brasileiro, enquanto as populações locais costeiras acabam por perder cada vez mais o contato com o meio ambiente (PITOMBEIRA; ALEME ROMCY, 2023).

Os habitantes das regiões costeiras estão cada vez mais expostos a desafios decorrentes da dinâmica costeira, como os prejuízos materiais causados pela erosão costeira. Por outro lado, a presença e conservação de ecossistemas naturais desempenham um papel crucial na defesa dessas áreas, fortalecendo sua capacidade de resistir aos processos erosivos e, conseqüentemente, mitigando os riscos ambientais associados (GUANNEL GREG AND ARKEMA, 2016).

Frente aos desafios emergentes decorrentes das alterações climáticas e à urgência de planejamento e administração eficazes das áreas costeiras e marítimas do Brasil, foi estabelecido, sob a égide da Secretaria Nacional de Mudança do Clima, o Departamento de Oceano e Gestão Costeira (DOceano). A missão primordial do DOceano consiste na gestão integrada e contínua das regiões costeiras e marítimas, incorporando-as de maneira abrangente e duradoura na política climática do país (BRASIL, 2023).

É relevante ressaltar que, conforme dados de 2018 do Ministério do Meio Ambiente (MMA), o Brasil conta com 274 municípios costeiros, distribuídos por 17 estados, abrangendo uma extensão litorânea de 8.500 km, os quais estão altamente urbanizados. Conseqüentemente, as zonas costeiras foram significativamente impactadas pelo processo de urbanização, sofrendo os efeitos negativos decorrentes da ocupação territorial. Além disso, as mudanças climáticas têm exercido uma pressão considerável sobre as cidades litorâneas, gerando sérias preocupações quanto ao seu futuro (MARQUES CARRIÇO; MENDES LOMBA PINHO, 2023).

Diante desta relevância envolvendo a maioria dos estados do país, compreender a zona costeira demanda a análise dos diversos elementos que a tornam um ambiente singular tanto do ponto de vista ambiental quanto social. Um aspecto fundamental das áreas costeiras é a transição entre os ambientes terrestre e aquático, conhecida como ecótono, o que proporciona a essa região condições e características particulares (KNOPPERS et al., 2009).

Contudo, em toda a extensão da costa litorânea do Brasil, é evidente a presença de edificações que desencadearam o deslocamento de areia e a impermeabilização do solo, resultando em impactos ambientais significativos e perturbando a dinâmica dos ecossistemas. Em alguns casos, essa intervenção contribui para o mau funcionamento desses ambientes. Além das construções, foram desenvolvidas infraestruturas como estradas de acesso, calçadões, parques e outras obras que também afetaram o ambiente natural. Em resumo, praias, dunas, manguezais e costões são ecossistemas altamente pressionados ao longo de nossa costa (MARQUES CARRIÇO; MENDES LOMBA PINHO, 2023).

Cabe ressaltar, que a cada ano, registros de aumentos de temperatura sem precedentes, elevação dos níveis dos oceanos, escassez de água e ocorrências mais frequentes de eventos climáticos extremos, como enchentes, furacões, tornados e ciclones, estão se tornando cada vez mais comuns (IPCC, 2023).

A alta concentração de cidades e população urbana no litoral define esta unidade como uma área em que os processos de gestão costeira devem estar intimamente relacionados com o desenvolvimento urbano e o desenvolvimento de atividades econômicas (DE ANDRÉS; BARRAGÁN; SCHERER, 2018).

O que já discutido sobre a zona costeira, surge a preocupação do gestor em salvaguardar as florestas e outras formas de vegetação devido à sua importância ambiental, denominando-as como áreas de preservação permanente. A Resolução CONAMA 303/2002 estabeleceu parâmetros, definições e limites para essas áreas sujeitas à proteção legal (Áreas de Preservação Permanente). Reconhece-se que a ausência ou redução da vegetação em certas áreas costeiras é uma característica natural comum de um ecossistema local, independentemente de ser atribuída à expansão da ocupação humana (MONTEIRO PIRAJÁ JÚNIOR, 2015).

O debate internacional sobre o Gerenciamento Integrado da Zona Costeira (GIZC) remonta a antes de 1992, quando foi inicialmente proposto pela Resolução do Conselho Europeu em 25 de fevereiro daquele ano. Além disso, a Agenda 21, em seu parágrafo 17.5, abordou essa questão ao tratar de processos integrados para a definição de políticas e tomada de decisões relacionadas em vários aspectos das zonas costeiras. O objetivo era reequilibrá-las por meio de monitoramento, medidas preventivas e de precaução, promovendo assim o desenvolvimento sustentável (CAVALCANTI, 2022).

Nas zonas costeiras, em particular, as áreas de preservação permanente (APPs) desempenham um papel crucial na proteção do litoral. Entre suas funções destacam-se– i) salvaguardar a faixa de praia contra processos de erosão costeira; ii) prevenir inundações provocadas por ressacas e tempestades; iii) evitar a intrusão de água salgada nos lençóis freáticos e aquíferos; e iv) servir como importantes reservatórios na retenção de água doce (CONAMA nº 303, 2002).

No Brasil, as Áreas de Preservação Permanente (APPs) são regulamentadas pelo Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), que estabelece critérios específicos para a delimitação dessas áreas com o objetivo de proteger recursos hídricos, a estabilidade do solo e a biodiversidade. Segundo a lei, as APPs incluem as faixas marginais de cursos d'água naturais, cujo tamanho varia de acordo com a largura do rio. Para rios com até 10 metros de largura, a faixa mínima é de 30 metros; para rios entre 10 e 50 metros, a faixa é de 50 metros; para rios entre 50 e 200 metros, a faixa é de 100 metros; para rios entre 200 e 600 metros, a faixa é de 200 metros; e para rios com mais de 600 metros, a faixa mínima é de 500 metros (Brasil, 2012).

O estudo sobre Áreas de Preservação Permanente (APPs) em Pernambuco, realizado no período de 1995 a 2011, (MOSTAERT, 2013), destaca a importância dessas áreas na conservação dos recursos naturais e na proteção da biodiversidade, especialmente em zonas costeiras como Maracaípe. As APPs na região costeira são cruciais para a manutenção da estabilidade geológica, proteção dos recursos hídricos, preservação da biodiversidade marinha e costeira, e mitigação dos impactos das mudanças climáticas, como aumento do nível do mar e intensificação de eventos extremos. O estudo sugere que as políticas públicas devem fortalecer os mecanismos de gestão dessas áreas, garantindo a eficácia das medidas de proteção ambiental para enfrentar desafios como a pressão do desenvolvimento turístico e urbano, que ameaçam a integridade ecológica e a sustentabilidade desses ecossistemas vulneráveis.

### 3.3 Migração de Bancos Submersos– Conceitos e Processos

Para entendermos a migração de bancos submersos nos ambientes costeiros, antes, precisamos compreender sua evolução costeira. Para (OLDFIELD, 1977), afirmam que a evolução costeira é um produto de processos morfodinâmicos que

acontece em resposta as modificações nas condições externas, ou seja, a morfodinâmica costeira se define como à interação contínua entre a forma do terreno (topografia) e os movimentos dos fluidos (como água ou vento) que carregam e depositam sedimentos.

Em ambientes marinhos, bancos de areia são estruturas arenosas costeiras que se formam como elevações no fundo do mar, caracterizadas por um contorno batimétrico fechado. Eles são comumente encontrados em estuários e áreas costeiras onde há uma abundância de areia e um regime hidrodinâmico (movimento da água) capaz de transportá-la. Esses bancos de areia desempenham um papel crucial na dinâmica costeira, influenciando a circulação das correntes e a distribuição dos sedimentos (SILVA, 2011).

Quanto às formações de bancos em estuários de foz estreita, as correntes de maré viva (fluxo e refluxo de maré) são suficientemente fortes para transportar sedimentos, enquanto as ondas dominam a dinâmica costeira. Nesses locais, formam-se bancos de areia próximos à foz, conhecidos como deltas de vazante (na saída do estuário) e de enchente (na entrada). Quando a linha costeira está recuando, o delta de vazante serve como uma fonte primária de areia para a região próxima à costa. Este sedimento pode ser redistribuído por tempestades, formando bancos de areia conectados à costa (KENYON; COOPER, 2005).

Bancos de areia são encontrados em estuários e áreas costeiras onde há abundância de areia e um regime hidrodinâmico que permite o transporte desses sedimentos. Isso significa que as correntes, ondas e marés nessas áreas são fortes o suficiente para mover a areia e formar essas elevações submersas no fundo do corpo d'água (SILVA, 2011).

Para isso, a migração de bancos de submersos quando sofre influência das ondas que aumenta, a estabilidade da desembocadura de um rio diminui. Com isso, o canal se torna menos estável e tende a migrar na direção da corrente de deriva litorânea predominante. Portanto, com a predominância das ondas, a desembocadura pode ser considerada instável (BARROSO, 2009).

Dessa forma, a interação entre a migração de sedimentos e uma desembocadura é descrita por (OERTEL, 1988), da seguinte forma, durante períodos de estufa, sedimentos se acumulam no canal, podendo causar assoreamento. Em maré cheia, os sedimentos são levados para o canal, o que pode aumentar o esporão

arenoso e reduzir a largura do canal. Em maré baixa, os sedimentos do canal e da deriva litorânea são transportados e acumulados no delta.

O estudo da estabilidade de desembocaduras tem sido de grande importância uma vez que estes ambientes estão relacionados com canais de navegação, marinas e portos, atividades estas tanto recepcionais quanto econômicas que necessitam de um ambiente estável (BARROSO, 2009).

Para tanto, a morfologia da desembocadura e do delta de maré vazante influencia a dinâmica costeira, a navegação e a ocupação urbana. Alterações na forma do canal e do fundo marinho podem modificar as correntes costeiras e de fundo, afetar a passagem de embarcações e mudar a configuração das praias, que são áreas ocupadas por humanos (AMBROSIO, 2017).

### 3.4 Estudos Anteriores sobre a Região de Maracaípe

Estudos anteriores sobre a região de Maracaípe fornecem uma visão aprofundada das dinâmicas ecológicas e das mudanças ambientais ocorridas ao longo do tempo. Essa área, caracterizada por sua complexa interação entre recifes, bancos arenosos e uma intensa dinâmica de estuário, tem sido objeto de várias investigações que analisam tanto suas características naturais quanto os impactos das intervenções antrópicas.

A zona de praia do estuário do Rio Maracaípe é notável por sua intensa dinâmica, marcada pela presença de recifes e bancos arenosos, que conferem características particulares à região. No final da década de 1980, diversas intervenções antrópicas foram identificadas a partir de uma denúncia protocolada na CPRH em 25 de janeiro de 1988. Essas intervenções foram as seguintes:

A margem direita da foz do rio Maracaípe foi deslocada para o norte e fixada com enrocamentos dispostos no sentido leste-oeste, dentro do leito do rio. Esta modificação também avançou em direção ao mar, resultando em um recuo significativo da margem esquerda em comparação à nova posição da margem direita. A nova margem direita foi criada por meio de um processo de desmatamento que envolveu a remoção de 19,4 hectares de mangue, seguido de aterro hidráulico. Este aterro foi complementado pelo plantio de coqueiros na antiga foz do estuário,

transformando de forma substancial a configuração original da área (SOBRAL et al., 1998).

Em um estudo realizado por (DE MACÊDO, 2011), que objetivou identificar o processo erosivo recorrente na praia de Maracaípe, analisando sua caracterização morfodinâmica e geoambiental. O método adotado houve uma divisão da orla em quatro setores com base em aspectos naturais e antrópicos. A pesquisa concentrou-se entre dezembro de 2009 e dezembro de 2010, foi realizado um monitoramento mensal que incluiu levantamento de perfis topográficos, coletas de sedimentos e aquisição de dados de ondas.

Os resultados indicaram variações sazonais na linha de costa dos setores ao norte e central, alternando entre retrogradação e progradação. O setor 1 recuou até 5,2 metros, enquanto o setor 4 sofreu um recuo de aproximadamente 156 metros. Apesar dessas variações, a costa apresenta equilíbrio estático, exceto no extremo sul do setor 4. A análise sedimentológica revelou que os setores 1 e 4 têm areias finas e de baixa permeabilidade, enquanto os setores 2 e 3 possuem areias médias e de baixa permeabilidade. A análise morfodinâmica dos perfis topográficos mostrou que o perfil 1 teve uma tendência de acréscimo com aumento de volume de 11,46 m<sup>3</sup>/m, o perfil 2 permaneceu estável, o perfil 3 apresentou um aumento significativo de 26,43 m<sup>3</sup>/m, e o perfil 4, classificado como dissipativo, mostrou uma tendência erosiva com perda de volume de 19,70 m<sup>3</sup>/m (DE MACÊDO, 2011).

Em outro estudo são discutidas as condições ambientais e as transformações ocorridas no estuário do Rio Maracaípe, destacando a significativa pressão antropogênica que tem contribuído para a degradação da área. A pesquisa se concentra em uma análise multitemporal do uso e ocupação das terras desde 1989 até 2011, utilizando imagens de satélite LANDSAT 5 e técnicas de classificação supervisionada. (Nova1 & Torres, 2012).

O estudo identificou um intenso declínio na cobertura vegetal de mangue e restinga, correlacionando diretamente este fenômeno ao crescimento descontrolado das atividades urbanas e turísticas. Além disso, a pesquisa aponta para o agravamento dos processos erosivos e de degradação ambiental devido à expansão urbana e a falta de cumprimento das normas ambientais, (Nova1 & Torres, 2012).



## 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para atingir os objetivos estabelecidos na pesquisa, a metodologia empregada envolve a integração de ferramentas de geotecnologias, que incluem a análise de imagens orbitais e aéreas e séries temporais de ondas e marés ao longo de 43 anos (1980-2023)

### 4.1 Caracterização da Área de Estudo

O estudo se desenvolveu no Pontal de Maracaípe, localizado na desembocadura do Rio Maracaípe, entre as praias de Maracaípe e Serrambi, no município de Ipojuca, no litoral sul de Pernambuco. A área possui uma orla de aproximadamente 3,8 km de extensão (FIGURA 1). Sendo representada pela delimitação do esporão norte localizado na praia de Maracaípe e o esporão sul na praia de Serrambi.



Fonte– O autor (2024).

O Rio Maracaípe está a 1.300 m da costa, com área de drenagem de 128,25 Km<sup>2</sup> em Ipojuca (8°31'00" S e 34°59'30" W) (CPRH, 2020). Apresenta características morfodinâmicas de praias intermediárias embarreiradas a dissipativas embarreiradas.

Possui em seus extremos recifes dispostos paralelamente à linha de costa e o centro exposto ao mar aberto (DE MACEDO et al., 2012).

Considerando os diversos aspectos da morfologia e a distribuição dos diferentes tipos de sedimentos na plataforma continental do nordeste brasileiro, propôs-se dividi-la em três segmentos claramente identificáveis— a plataforma interna (até a isóbata de -20m), a plataforma média (de -20 a -40m) e a plataforma externa (de -40 a -60m) (COUTINHO, 1976).

Na costa pernambucana as marés que predominam são classificadas como mesomaré fraca (1 a 2 m) e mesomaré forte (2 a 4 m). Assim, essas marés são semidiurnas, com um período de aproximadamente 750 minutos, resultando em duas premares e duas baixa-mares a cada dia lunar. Existem apenas dois pontos de monitoramento das marés em Pernambuco, um no Porto do Recife e outro no Porto de Suape (DE MACÊDO, 2011).

Quanto aos regimes de ondas na costa pernambucana, é crucial destacar a forte sazonalidade observada nos parâmetros das ondas, que variam significativamente ao longo do ano. A série histórica dos parâmetros das ondas, analisada no período de 1992 a 2014, revelou que a altura significativa das ondas ( $H_s$ ) variou entre 0,87 metros em setembro de 1997 e 4,10 metros em setembro de 2007, com uma média anual em torno de 1,8 metros  $\pm$ 0,2 metros. As alturas mais frequentes variaram entre 1,5 e 2 metros, predominando especialmente durante o período seco. O período das ondas ( $T_p$ ) ao longo da série mostrou-se distribuído entre 5 e 20 segundos, com uma média anual próxima a 10 segundos  $\pm$ 0,4 segundos, destacando-se ondas com períodos entre 6 e 10 segundos, predominantemente nos primeiros meses do ano. (PEREIRA et al., 2015).

A direção de incidência das ondas também apresentou variabilidade sazonal significativa, variando entre NE e SSE, com uma direção média anual de LSE. Durante os meses de junho a agosto, predominam ondas de direção SE, período em que ocorrem as ondas mais altas, com valores de  $H_s$  superiores a 2 metros, especialmente entre julho e setembro, quando o mês de agosto se destaca como o mais energético. Em contrapartida, os menores valores de  $H_s$  foram observados entre novembro e abril, com o mês de fevereiro sendo o menos energético. (Pereira et al., 2015).

Durante o verão, as ondas predominantes têm direção E, com alturas de  $H_s$  entre 1,5 e 2 metros e períodos de 6 a 10 segundos. Já no outono, a direção

predominante muda para ESE, mantendo-se as ondas com Hs até 2 metros e períodos entre 8 e 10 segundos, com algumas ondas de SE apresentando períodos acima de 10 segundos. O inverno, estação mais energética, registra ondas de SE com Hs entre 2 e 2,5 metros e períodos entre 8 e 10 segundos, mantendo-se esse padrão também para as ondas de ESE. Na primavera, ocorre uma diminuição nos valores de Hs, que variam entre 1,5 e 2 metros, com a direção principal das ondas mudando para ESSE e períodos de até 10 segundos, e as ondas de E voltando a predominar à medida que o verão se aproxima (PEREIRA et al., 2015).

Na costa da praia de Ipojuca, os dados estatísticos do mesmo período citado anteriormente, indicam que os ventos dominantes são aqueles de direção E-SE. Durante o verão, predominam os ventos alísios de leste, com velocidades médias de 5,6 m/s. No inverno, velocidades médias dos ventos predominam na faixa de 5,74 a 6,58 m/ velocidades médias na faixa de 5,74 a 6,58 m/s, (de Macêdo, 2011).

De acordo com os dados do Censo de 2022 divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a cidade de Ipojuca, localizada no estado de Pernambuco, apresentou um crescimento populacional significativo. Em 2010, a população era de 80.637 habitantes e aumentou para 98.932 em 2022. Esse crescimento é particularmente notável em uma região que desempenha um papel crucial, tanto em termos de biodiversidade quanto de desenvolvimento econômico, devido à sua proximidade com áreas costeiras e a presença de importantes infraestruturas como o Porto de Suape.

## 4.2 Aquisição e Processamento de Imagens

### 4.2.1 Imagens de alta resolução

Foram utilizadas imagens de alta resolução pretéritas disponíveis para a área de estudo bem como a aquisição de novas imagens recentes. Tais imagens permitem analisar alterações temporais em alvos menores, presentes ou adjacentes aos esporões, como edificações, tipos de vegetação, praias, bancos submersos e recifes de coral.

No contexto da análise de desembocaduras, as imagens de alta resolução são essenciais para capturar mudanças na morfologia costeira e na distribuição de sedimentos, aspectos críticos para entender como as atividades antrópicas, como a

construção de infraestruturas e a urbanização, afetam esses ambientes sensíveis (LU; WENG, 2007). No caso da desembocadura do Rio Maracaípe, por exemplo, essas imagens permitem identificar tipos de vegetação, edificações, indicadores de linha de costa entre outros elementos que não seriam possíveis de distinguir com imagens de baixa resolução.

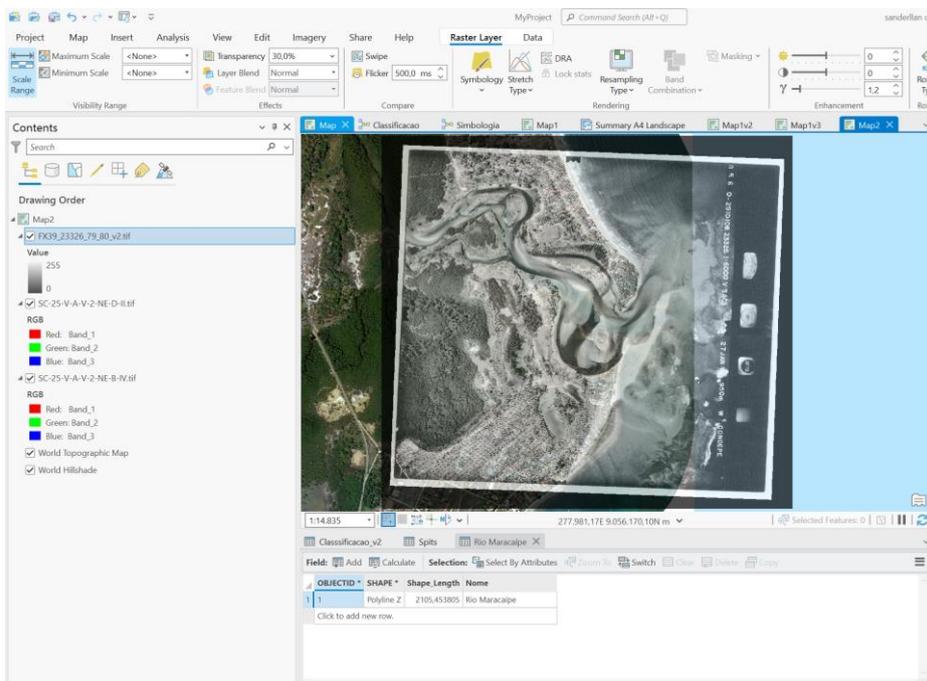
#### 4.2.1.1 Imagens aéreas

Para a área de estudo, foram obtidas informações de ortofotocartas digitais em preto e branco dos anos de 1980 e 1998, fornecidas pela Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco (CONDEPE/FIDEM). Esta agência possui um amplo acervo cartográfico com diversos produtos que auxiliam no planejamento e gestão do desenvolvimento estadual, disponível para o público em geral.

As imagens disponibilizadas pela FIDEM não estavam georreferenciadas. Sendo assim foi necessário relacionar as coordenadas da imagem com as coordenadas reais do local, O processo foi realizado com o Sistema de Informação Geográfica ArcGis PRO 3.3, através das ferramentas “*Georeferencing tools*”.

O processo necessita de uma base de referência georreferenciada, então foi adotado a Ortofoto do PE3D, disponibilizado pelo Governo de Pernambuco, desenvolvido com o propósito de mapear todo o estado na escala de 1:5000 de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica classe A, Para a imagem de 1980 como praticamente não existia pontos em comum, foi a dotado o método de mover e rotacionar, sendo assim a imagem foi encaixada perfeitamente sendo observado elementos em comum entre as duas imagens como observado na Figura 02.

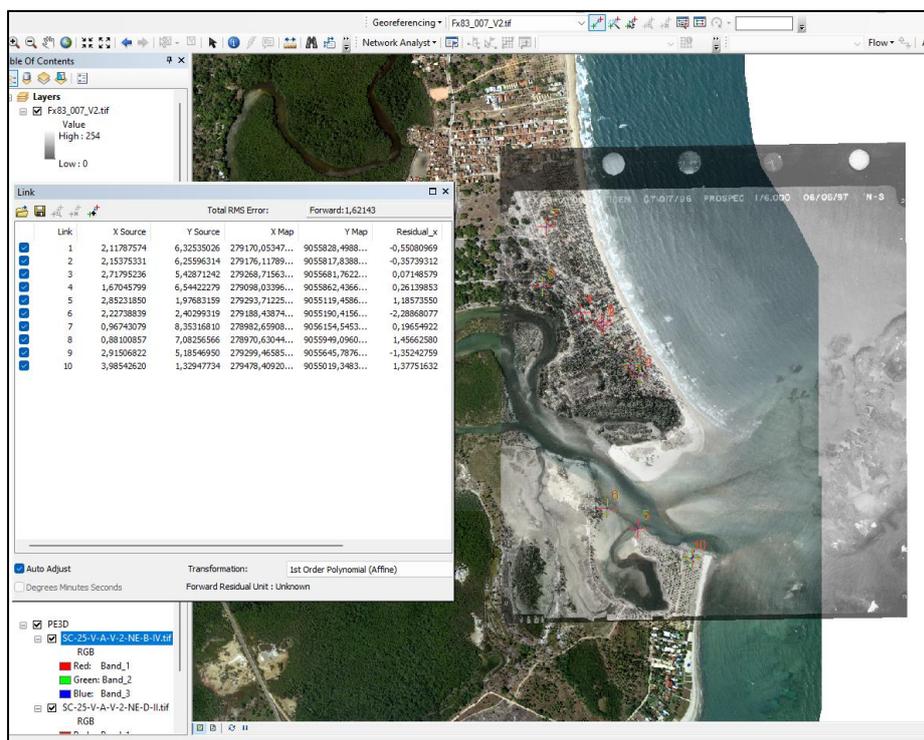
Figura 2– Processo de georreferenciamento da Imagem de 1980, disponibilizada pela CONDEPE/FIDEM.



Fonte– O autor (2024).

A Figura 3 apresenta o resultado do georreferenciamento da imagem de 1996, foi possível utilizar o método de marcação de pontos de controle já que as imagens apresentavam mais pontos em comum. Foram encontrados 10 pontos em comum com erro total médio de 1,6m.

Figura 3– Processo de georreferenciamento da Imagem de 1996 disponibilizada pela CONDEPE/FIDEM. A metodologia adotou 10 pontos de controle.



Fonte– O autor (2024).

Outra imagem utilizada foi das ortofotos do Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), com referência ao ano de 2015. Que foi disponibilizada pelo Governo de Pernambuco na escala para a área de estudo de 1:5000 com padrão cartográfico na classe A. Este recurso está disponível gratuitamente na plataforma [www.pe3d.pe.gov.br](http://www.pe3d.pe.gov.br).

#### 4.2.1.2 Imagens de RPA

A coleta de dados se deu principalmente durante a baixa maré de sizígia (detectar a posição da desembocadura, os bancos submersos e a área dos esporões). Sendo assim, a primeira coleta foi realizada no dia 03 de agosto de 2023, com maré marcando 0.1 às 11:08h. A segunda coleta foi feita no dia 01 de setembro de 2023, com a maré marcando 0.0 às 10:47h. A altura da maré do dia foi vista através da tábua de maré da marinha do Brasil para o porto de Suape, que é o ponto mais próximo do local de coleta.

Os modelos digitais de terreno (MDT) representam a superfície topográfica de uma região específica do planeta. Eles são importantes fontes de dados, sendo utilizados de forma eficiente para mapeamentos e análises das características hidrológicas de bacias hidrográficas, como a declividade do terreno e as redes de drenagem, (GARCÍA-ALÉN et al., 2022).

A utilização de drones para a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDTs) oferece uma abordagem eficiente e precisa para monitorar e analisar essas mudanças ao longo do tempo.

Tendo em vista a coleta temporal com drone foi necessário levantar alguns pontos de controle para amarração das imagens, para isso foi utilizado alvos de madeira e um par de GNSS (Global Navigation Satellite System) Leica GS15 (Figura 4), utilizando o método de pós processamento foi possível levantar todos os pontos de controle no mesmo dia do voo.

O método pós processado, os dados que são coletados pelo receptor GNSS são comparados com os dados de uma estação de referência fixa, cujas coordenadas são conhecidas com alta precisão. A correção diferencial é então aplicada para minimizar os erros causados por fatores como a ionosfera, troposfera, e erros de relógio do satélite. Este processo, conhecido como Pós-Processamento Cinético (PPK) ou Pós-Processamento Estático, é amplamente utilizado em levantamentos topográficos e geodésicos devido à sua capacidade de proporcionar alta precisão nas medições, (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2007).

Figura 4– Coleta de dados topográficos. A) do dia 03/08/2023 e B) do dia 01/09/2023.



Fonte– O autor (2024).

Para garantir a precisão dos modelos gerados, pontos de controle terrestre (GCPs) são essenciais. Esses pontos, cujas coordenadas são conhecidas com alta precisão, são identificados no solo e nas imagens capturadas pelo drone. Durante o processamento, os GCPs são usados para ajustar e corrigir as posições das imagens, minimizando distorções e erros. Esta técnica melhora significativamente a precisão dos modelos tridimensionais e ortofotos, permitindo que sejam usados em análises detalhadas e decisões críticas (REMONDINO et al., 2012).

O resultado do processamento ficou dentro do esperado, na casa dos 2 cm, conforme observado na Figura 5.

Figura 5– Erro quadrático médio dos pontos de controle.

GCP Label		X Error (cm)	Y Error (cm)	Z Error (cm)
GP0001		-0.4200	-0.6300	1.0400
GP0002		-1.3200	1.4300	-0.3600
GP0003		-2.1800	-0.7200	-1.4600
GP0005		-0.2500	0.1600	0.6000
GP0006		-0.5300	-1.1300	-0.1300
GP0007		0.6400	-0.7900	0.4600
GP0008		2.3200	0.4300	-0.4000
GP0009		2.0700	0.9600	1.3400
GP0010		0.0900	2.7800	-0.1300
GP0012		-0.4400	-2.5100	-0.9800
Total (RMSE) Excludes Outliers		1.3150	1.4150	0.8285

Fonte– O autor (2024).

Para a coleta das imagens, foi utilizada um RPA multirrotor da Marca DJI modelo *Mavic 2 pro* da DJI, composto por câmera com sensor CMOS de 1 polegada e resolução de 20MP (5.472 x 3.648 pixels), o voo foi realizado a 120m.

As imagens obtidas com o drone foram processadas pelo DRONEDEPLOY, gerando alguns produtos como as ortofotos (Figura 6) e modelos digitais de elevação, processados e ajustados com pontos de controle obtidos pelo GNSS no sistema de coordenadas UTM, SIRGAS 2000 zona 25s.

Figura 6– Ortomosaico gerado pelo DroneDeploy. A) ortomosaico do dia 03 de agosto de 2023 e B) ortomosaico do dia 01 de setembro de 2023.



Fonte– O autor (2024).

#### 4.2.1.3 Variação da linha de costa

O Digital Shoreline Analysis System (DSAS) é uma ferramenta amplamente utilizada para a análise e monitoramento de mudanças costeiras ao longo do tempo. Desenvolvido pelo U.S. Geological Survey (USGS), o DSAS permite calcular estatísticas de taxa de variação da linha de costa a partir de múltiplas linhas de costa georreferenciadas obtidas em diferentes períodos. Utilizando técnicas como o End Point Rate (EPR), o DSAS facilita a análise temporal ao calcular a taxa de mudança linear entre duas linhas de costa específicas, fornecendo uma medida clara da velocidade e direção da mudança costeira (THIELER et al., 2009).

O EPR é particularmente útil para análises temporais devido à sua simplicidade e eficácia na quantificação de mudanças lineares ao longo de períodos definidos. Essa técnica considera apenas a posição inicial e final da linha de costa, dividindo a distância entre essas posições pelo intervalo de tempo, o que fornece uma taxa média de variação. Essa abordagem é ideal para estudos onde se busca entender tendências gerais de erosão ou acreção, especialmente em contextos em que dados de longo prazo são disponíveis (FENSTER; DOLAN; ELDER, 1993).

A aplicação do DSAS com o EPR permite não apenas a visualização clara das mudanças, mas também a comparação quantitativa dessas mudanças ao longo do

tempo, proporcionando uma base sólida para a gestão e planejamento costeiro (HIMMELSTOSS et al., 2021).

Utilizando softwares GIS é delimitado as linhas na região de análise, no estudo as áreas de análise são os esporões norte e sul e os corais expostos. Com isso tem-se as regiões de erosão e acreção.

#### 4.2.2 Imagens de baixa resolução espacial

Imagens de baixa resolução espacial, como as fornecidas pelos satélites Landsat, oferecem uma alta resolução temporal, o que é extremamente valioso para o monitoramento contínuo e a análise de mudanças ambientais ao longo do tempo. Essa alta frequência de aquisição de dados permite a detecção de tendências sazonais e anuais, crucial para o estudo de fenômenos como a dinâmica da vegetação, mudanças no uso do solo e impactos de eventos climáticos extremos (ZHU; WANG; WOODCOCK, 2015). Embora a resolução espacial de 30 metros do Landsat possa não capturar detalhes finos, a capacidade de gerar imagens com intervalos frequentes (a cada 16 dias) compensa essa limitação ao permitir a observação de padrões e mudanças de larga escala de forma consistente e abrangente (WULDER et al., 2012).

As imagens do Landsat, foram combinadas e extraídas do GEE (Google Earth Engine), todas no mesmo retângulo envolvente. Sendo 38 imagens uma por ano, com marés baixa e o mínimo de nuvem possível. Permitindo uma análise anual das alterações da região entre 1984 e 2023.

No anexo A, são apresentados todos os mapas com as imagens de todos os anos, na apresentação dos resultados é importante apresentar algumas figuras chaves para o resultado sendo a primeira e a última imagem relevantes para afirmações das mudanças ocorridas no tempo.

As imagens obtidas pelo satélite LANDSAT, capturadas anualmente de 1984 a 2023 (uma imagem por ano), foram utilizadas para detectar, com frequência aproximadamente anual, a posição da desembocadura, a vegetação e a área dos esporões. As bandas utilizadas na composição das imagens foram infravermelho,

verde e vermelho, sendo gerado a composição falsa cor, onde o para o Landsat 5 se utiliza as bandas (4, 3, 2) e o Landsat 8 ( 5, 4, 3). Esta composição funciona bem quando analisado áreas próximas a corpos hídricos, sendo possível separar o que é vegetação, água e terra. A maioria das imagens selecionadas foi capturada durante maré baixa. As imagens LANDSAT 5 e 8, com as respectivas datas/hora e data/hora/maré (dados históricos das marés servem para identificar padrões e variações ao longo dos dias, meses e anos) utilizadas neste trabalho estão listadas na Tabela 1. Essa análise ajuda a prever comportamentos futuros das marés:

Tabela 1– Dados das imagens do satélite Landsat, respectivos anos/data/hora e dados monitorados das marés, com respectivas data/hora/altura–

Satélite	Ano	Hora/Imagem	Data/Hora/Maré	Altura	Data/Hora/Maré	Altura
Landsat 5	1984	11:59:36	19/12/1984 07:23	0,3	19/12/1984 13:38	2,1
Landsat 5	1985	11:59:35	28/05/1985 10:53	2	28/05/1985 17:15	0,4
Landsat 5	1986	11:50:57	19/08/1986 09:41	0,2	19/08/1986 15:54	2,2
Landsat 5	1987	11:56:07	07/09/1987 09:34	0,1	07/09/1987 15:47	2,3
Landsat 5	1988	12:00:02	11/10/1988 09:53	0,3	11/10/1988 15:58	2,2
Landsat 5	1989	11:55:25	12/09/1989 07:36	0,4	12/09/1989 13:49	2,1
Landsat 5	1990	11:49:38	11/06/1990 11:38	0,4	11/06/1990 17:49	1,9
Landsat 5	1991	11:53:37	20/10/1991 07:45	0,3	20/10/1991 13:54	2,1
Landsat 5	1992	11:50:54	22/10/1992 06:54	0,3	22/10/1992 13:08	2,2
Landsat 5	1993	11:51:17	12/12/1993 08:54	0,3	12/12/1993 15:04	2,3
Landsat 5	1994	11:43:35	29/11/1994 06:34	0,3	29/11/1994 12:49	2,2
Landsat 5	1995	11:38:06	22/04/1995 09:56	1,9	22/04/1995 16:23	0,6
Landsat 5	1996	11:48:53	17/10/1996 06:38	2	17/10/1996 12:47	0,5
Landsat 5	1997	12:01:01	17/08/1997 08:56	0,1	17/08/1997 15:06	2,3
Landsat 5	1998	12:08:09	05/09/1998 09:00	0,1	05/09/1998 15:08	2,3
Landsat 5	1999	12:05:20	11/11/1999 11:19	0,5	11/11/1999 17:26	2
Landsat 5	2000	12:07:58	12/10/2000 09:08	0,1	12/10/2000 15:17	2,3
Landsat 5	2001	12:09:42	24/05/2001 10:38	0,2	24/05/2001 16:49	2,2
Landsat 5	2002	12:07:52	20/02/2002 09:15	1,7	20/02/2002 15:38	0,8
Landsat 5	2003	12:07:31	06/11/2003 08:24	0,3	06/11/2003 14:36	2,1
Landsat 5	2004	12:15:20	26/12/2004 09:49	0,5	26/12/2004 15:56	2,1
Landsat 5	2005	12:17:06	06/07/2005 10:02	0,4	06/07/2005 16:11	2
Landsat 5	2006	12:23:01	26/08/2006 11:11	0,3	26/08/2006 17:19	2,1
Landsat 5	2007	12:23:01	28/07/2007 08:56	0,4	28/07/2007 15:06	2
Landsat 5	2008	12:20:13	21/02/2008 10:13	0,3	21/02/2008 16:19	2,3
Landsat 5	2010	12:19:42	06/09/2010 08:08	0,2	06/09/2010 14:21	2,3
Landsat 5	2011	12:18:03	09/09/2011 08:11	0,4	09/09/2011 14:24	2
Landsat 8	2013	12:31:05	03/12/2013 09:47	0,1	03/12/2013 15:58	2,4
Landsat 8	2014	12:29:35	22/12/2014 09:51	0,2	22/12/2014 16:00	2,4

Landsat 8	2015	12:29:35	07/11/2015 07:21	0,5	07/11/2015 13:36	2
Landsat 8	2016	12:29:26	20/07/2016 10:08	0,2	20/07/2016 16:17	2,2
Landsat 8	2017	12:29:28	08/08/2017 10:17	0,2	08/08/2017 16:24	2,2
Landsat 8	2018	12:28:59	27/08/2018 10:24	0,2	27/08/2018 16:32	2,2
Landsat 8	2019	12:29:44	15/09/2019 10:30	0,2	15/09/2019 16:38	2,2
Landsat 8	2020	12:29:37	01/09/2020 09:38	0,3	01/09/2020 15:47	2,1
Landsat 8	2021	12:29:42	04/09/2021 08:21	0,4	04/09/2021 14:32	2,1
Landsat 8	2022	12:30:04	10/11/2022 10:43	0,4	10/11/2022 16:51	2,1
Landsat 8	2023	12:29:38	13/11/2023 09:30	0,3	13/11/2023 15:39	2,3

Fonte– O autor (2024).

No catálogo de imagens disponíveis no GEE, todas as imagens de 2009 apresentavam grande cobertura de nuvens na área de interesse. Para 2012, as imagens do Landsat 7 apresentavam falhas significativas, localizadas diretamente sobre a área de interesse.

#### 4.3 Séries temporais de ondas e marés

Séries temporais de ondas e marés foram obtidas para o ano de 2023 no sentido de caracterizar as condições energéticas de curto-prazo referente a mobilidade dos bancos submersos e alterações morfológicas entre os levantamentos de RPAS. Em complemento séries temporais de marés foram obtidas para o período de abrangência das imagens de satélite Landsat (1984 a 2023), a fim de verificar as condições da altura da maré no momento de registros dessas imagens.

A série temporal horárias de ondas (altura, período e direção) para 2023 foram medidos por um ondógrafo direcional instalado na plataforma continental do Porto de SUAPE. Os dados são mantidos por SUAPE (Complexo Industrial Portuário Governador Eraldo Gueiros, vinculada à Secretaria de Desenvolvimento Econômico de Pernambuco) através do Projeto SISMO e podem ser consultados em tempo real pelo link: <http://www.sismowater.com.br/sismo/suape/pier/>.

A série temporal da altura da maré entre 1980 e 2023 foram previstas pela Divisão de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) para a localidade do Porto de SUAPE.

## 5. RESULTADOS

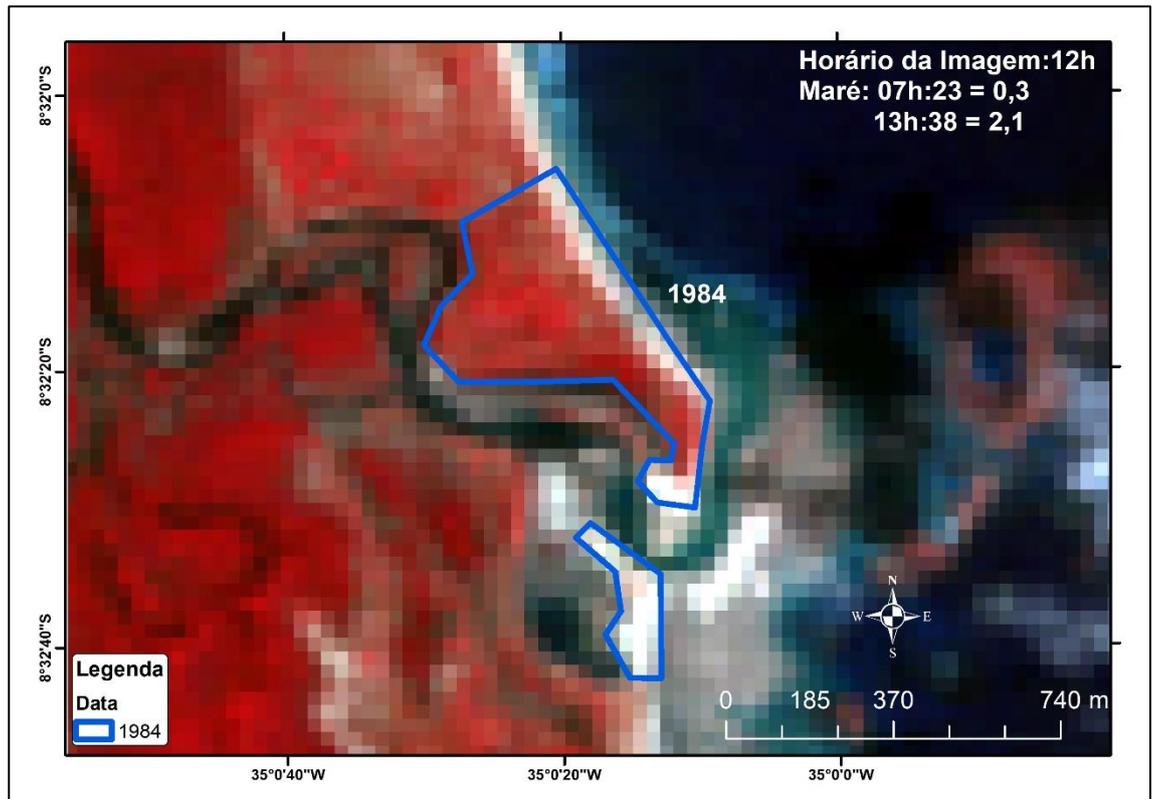
Os resultados são apresentados em três seções. Na primeira, tem-se os resultados da evolução anual da desembocadura e morfologia dos esporões obtidas a partir da análise das imagens de baixa resolução espacial, na segunda, é realizado uma análise mais detalhada já que os dados são de imagens de alta resolução espacial e na terceira é analisada a taxa de variação anual dos esporões e sedimentos nos corais.

### 5.1 Evolução anual da posição da desembocadura e dos esporões

Os resultados obtidos com a análise da série temporal das imagens Landsats mostraram grande variações da posição da desembocadura, curso principal do rio, alterações nas áreas e morfologia dos esporões norte e sul, além do aumento de áreas com vegetação em ambos os esporões.

Na Figura 7, trata-se da imagem de 1984 capturada por volta das 12h00 com maré baixa. Resultados indicam que no esporão norte a maior parte dele é de vegetação com algumas partes arenosas. No esporão sul nota-se uma separação, parte do esporão sendo separada, além de não haver nenhuma presença de vegetação na área.

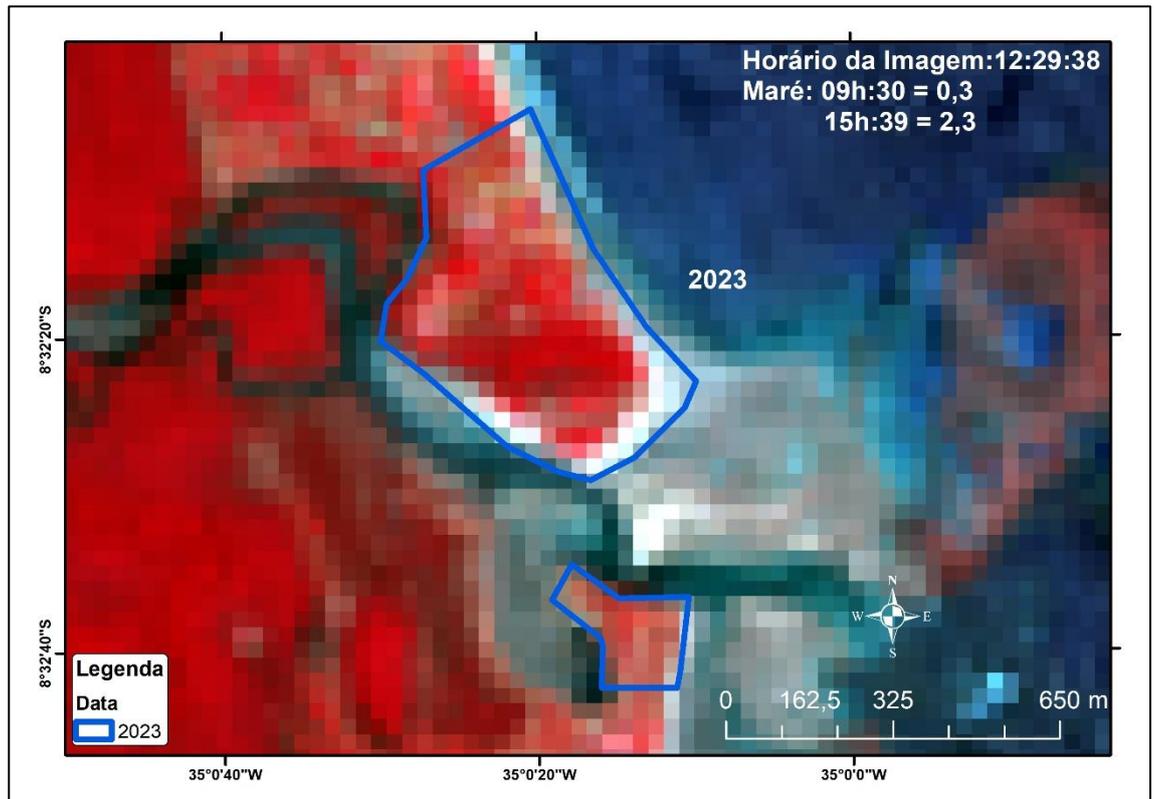
Figura 7– Imagem Landsat 5 de 1984.



Fonte– O autor (2024).

A Figura 8, trata-se da imagem de 2023 quase 40 anos depois, capturada por volta das 12h29 com maré baixa. No esporão norte observa-se que existe pixels com coloração diferente do vermelho próximo a áreas de vegetação, indicando edificações e áreas urbanas, além da diminuição no comprimento do esporão seguido de um alargamento para o interior do rio. No esporão sul nota-se uma diminuição com um comportamento mais retilíneo indicando uma possível ação antrópica, além de grande presença de vegetação na área.

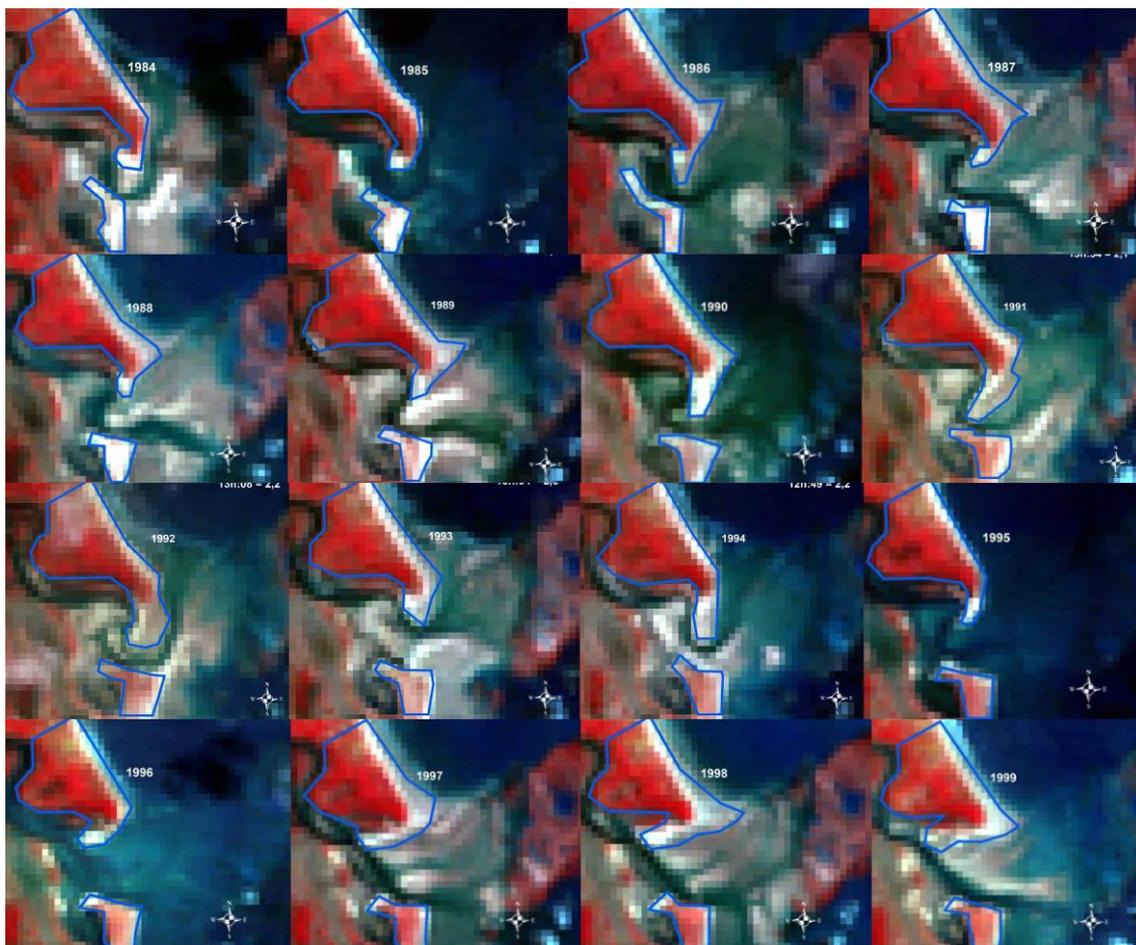
Figura 8– Imagem Landsat 8 de 2023.



Fonte– O autor (2024).

Além das mudanças nos esporões os resultados indicam, mudança na desembocadura do rio, antes localizado ao norte agora localizado ao sul próximo do esporão sul. Além da fixação na forma do esporão sul em 1987, e dois anos depois o aparecimento de vegetação, A **Figura 9**, observa-se a fixação da forma em 1987, o padrão cíclico da desembocadura ao longo dos anos e a estabilização do rio após 1996.

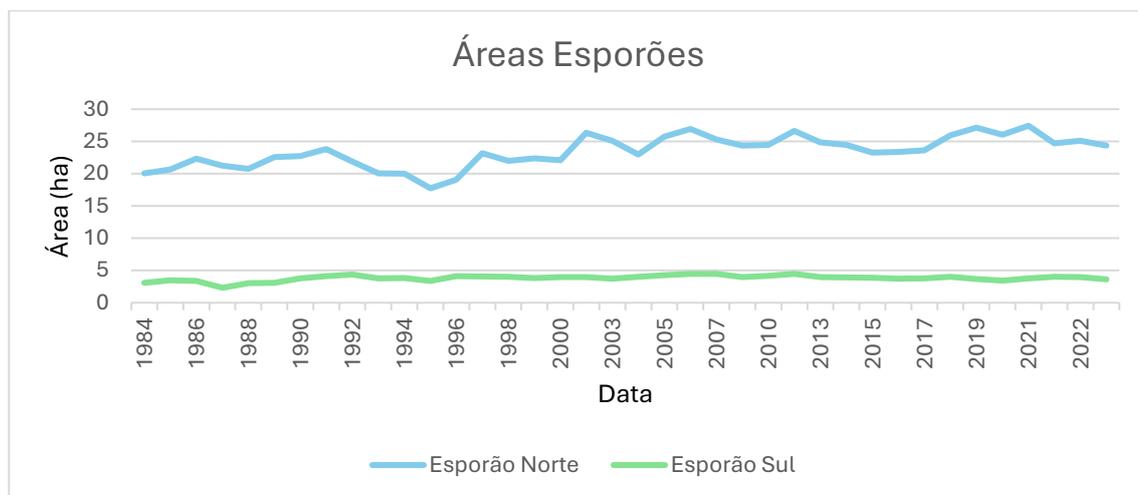
Figura 9– Estabilização do curso principal do rio.



Fonte– O autor (2024).

Através das vetorizações das áreas foi possível delimitar as áreas e vegetação dos esporões, a Figura 10, trata-se das áreas identificadas ao longo dos anos, o esporão norte apresenta variações apresentando crescimento de 21,56% com área de 20,04 ha em 1984 para 24,36 ha em 2023, com evento de máxima em 2021 quando atingiu 27,42 ha e de mínima em 1995, atingindo 17,73 ha, já o esporão sul a partir de 1996 apresenta uma estabilização mas em seu histórico apresenta crescimento de 29,87%, com área de 3,08 ha em 1984 e 4,00 ha em 2023, ocorrendo em 2007 a máxima de 4,47 ha e em 1987 a mínima de 2,31 ha. Nota-se que as variações no esporão norte permanecem variando com o tempo, enquanto no esporão sul as variações de mínima ocorreram antes da estabilização da desembocadura.

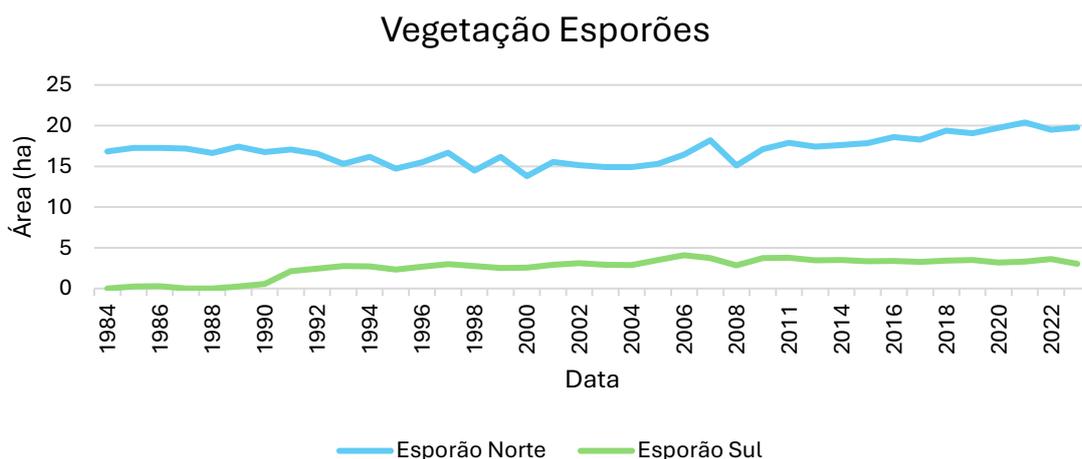
Figura 10– Gráfico das áreas dos esporões de 1984 até 2023.



Fonte– O autor (2024).

Os dados de vegetação apresentados na Figura 11, confirma as análises dos mapas, indicando aumento de 16,85 ha para 19,02 ha no esporão norte e 0,00 ha para 3,47 ha no esporão sul, de vegetação. O esporão norte com algumas variações, mas apresentando crescimento, e o esporão norte saindo do zero para um crescimento que depois se manteve estável.

Figura 11– Gráfico da vegetação dos esporões de 1984 até 2023.



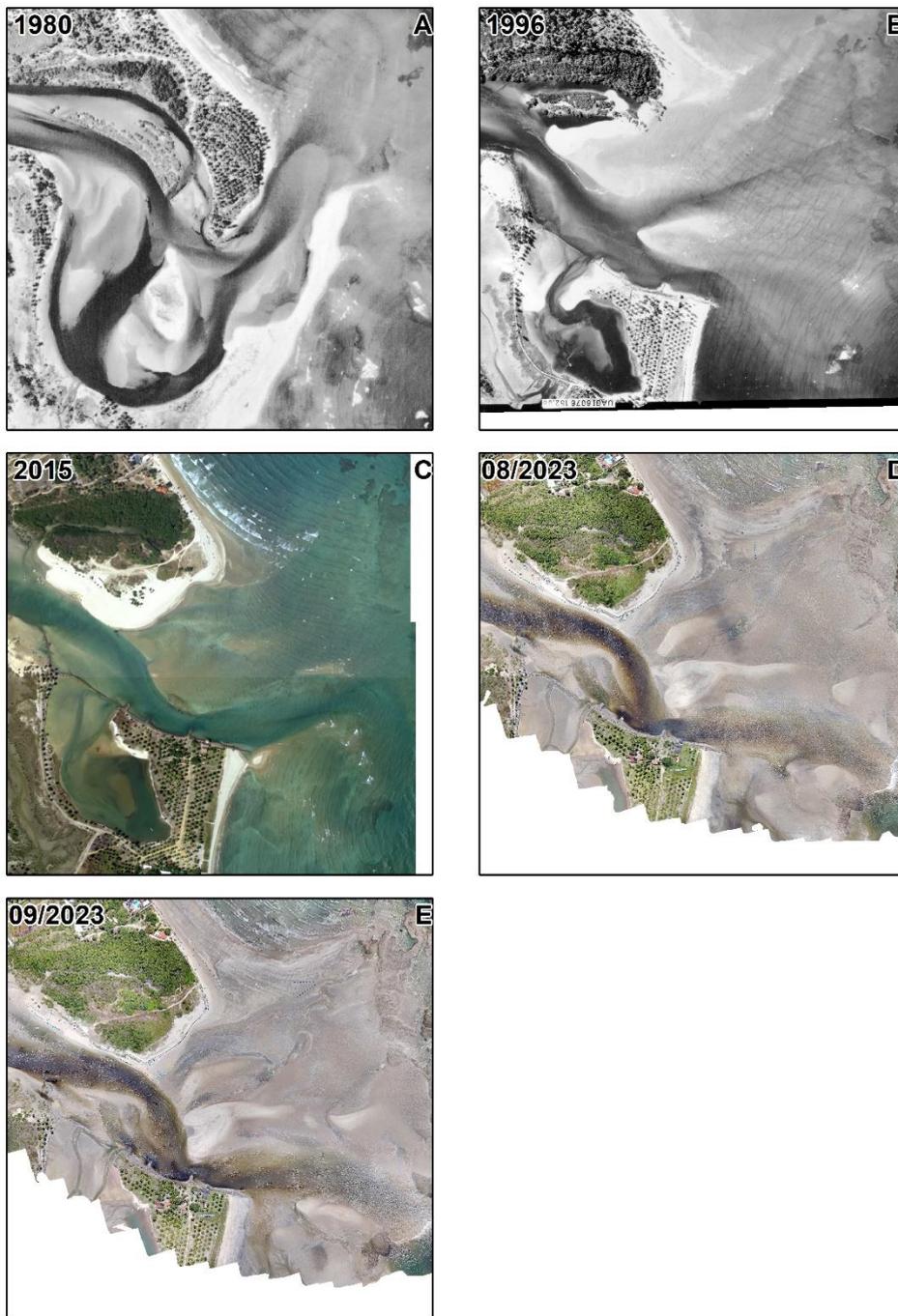
Fonte– O autor (2024).

## 5.2 Modificações temporais na ocupação urbana e elementos costeiros

Imagens de alta resolução espacial, como as fornecidas pela fotogrametria analógica da CONDEPE/FIDEM, pela aerofotogrametria digital do PE3D e pela aerofotogrametria com drones, são ferramentas cruciais para a delimitação de alvos menores presentes ou adjacentes aos esporões, permitindo uma compreensão detalhada da dinâmica das desembocaduras e das interferências antrópicas.

Observou-se intensa evolução morfológica na área de estudo durante o período de 43 anos, 1980 a 2023, Figura 12. No início, o estuário se abria para o norte com bancos submersos inseridos no interior, e sua margem sul alongada do sul para o norte, Figura 12 A. Em 1996, Figura 12 B, o estuário foi modificado deixando uma saída estreita orientada para o leste, havendo uma modificação no esporão sul causado pela fixação da área com espigões de proteção, Em 2015, Figura 12 C, o estuário se assemelha ao anterior, a margem sul permanece com a mesma forma, mas nota-se um alargamento do esporão norte, os resultados indicam acúmulo de sedimentos e agrupamento dos bancos submersos, Desde 2015, até agora 2023, Figura 12 D, e, Figura 12 E, a foz do rio permanece fixa com saída para o leste, a margem sul permanece fixada, e o esporão norte continua acumulando sedimentos, apresentado aumento de sua área.

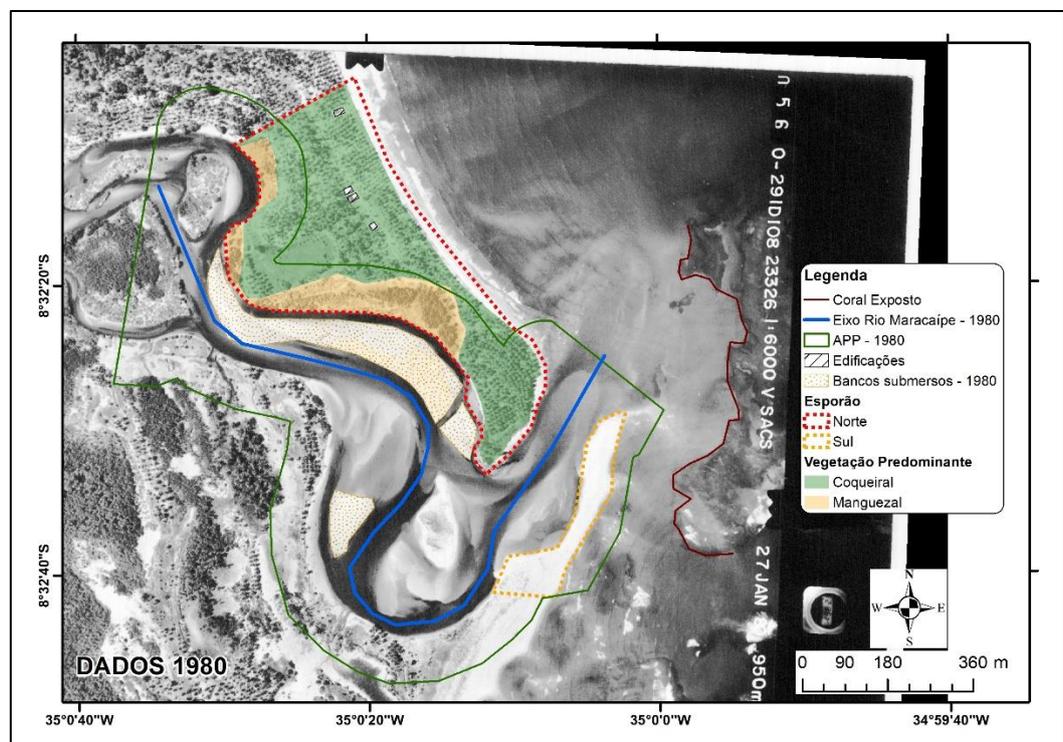
Figura 12– Imagens dos esporões na foz do rio Maracaípe em diferentes morfologias.



Fonte– O autor (2024).

A Figura 13, é a imagem com qualidade mais antiga encontrada, uma ortofotocarta disponibilizada pela CONDEPE/FIDEM de 1980. Os resultados indicam pouca ou quase nenhuma presença de edificações nas áreas, a sinuosidade do rio Maracaípe e sua desembocadura apontada para o norte, a presença de bancos submersos no interior do rio, a linha delimitando os recifes de corais expostos, o esporão norte com predomínio de vegetação em sua maioria coqueiral e o esporão sul mais alongado para o norte, sem presença de vegetação.

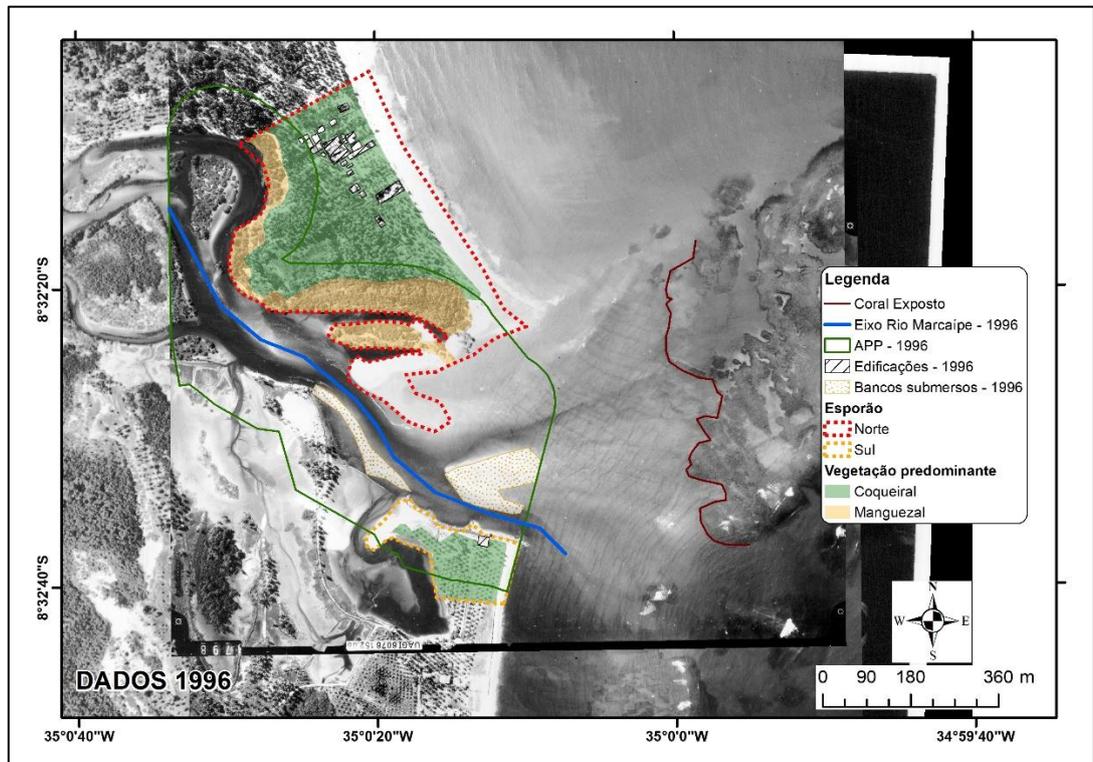
Figura 13– Mapa com informações de 1980.



Fonte– O autor (2024).

Os resultados para 1996 na Figura 14, indicam, mudanças na região, o crescimento na presença de áreas edificadas, o rio Maracaípe mais retilíneo com desembocadura apontada para o leste encostado ao esporão sul, bancos submersos mais próximos a desembocadura, a linha delimitando os recifes de corais sem cobertura de sedimentos apresenta mudanças devido ao aparecimento de corais mais ao norte e desaparecimento mais ao sul próximo a desembocadura, esporão norte menos alongado e mais largo indicando um aumento de área, área edificada no esporão sul, nova conformidade do esporão, presença de espigões no entorno e presença de vegetação com predomínio de coqueiral.

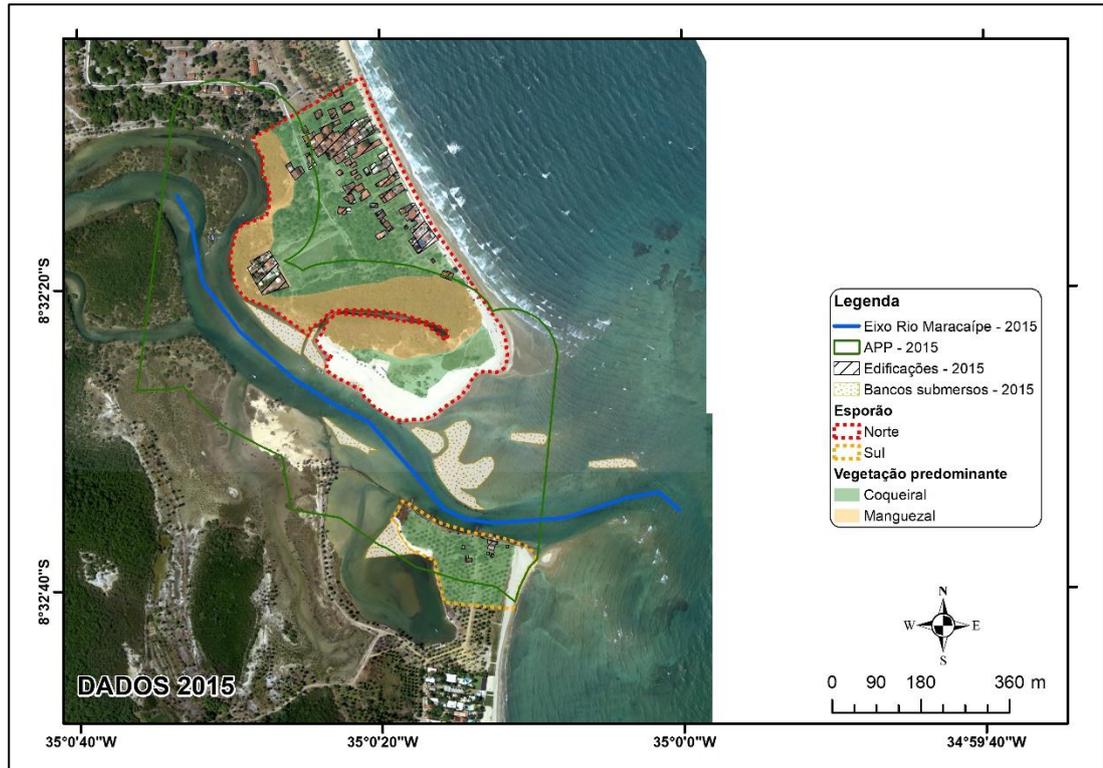
Figura 14– Mapa com informações de 1996.



Fonte– O autor (2024).

A partir de 2015 tem-se imagens coloridas e com qualidade superior, nota-se na Figura 15, o rio continua mais retilíneo com desembocadura apontando para o leste, o aumento da ocupação humana os esporões principalmente na linha de beira-mar, presença de bancos submersos mais próximo da desembocadura, para 2015 não foi possível delimitar a linha dos recifes de corais expostos devido ao não recobrimento da imagem na região, a área de APP delimitada a partir da margem com 100 metros para cada lado identificou edificações em seu interior, o esporão norte apresentando formado mais largo, com diminuição nas áreas de vegetação predominante coqueiral devido ao crescimento de ocupação presente, enquanto as áreas com predomínio de manguezal aumentou 20,32% com relação a 1996, o esporão sul apresenta um formato parecido com 1996, indicando crescimento na área de vegetação e edificações.

Figura 15– Mapa com informações de 2015.

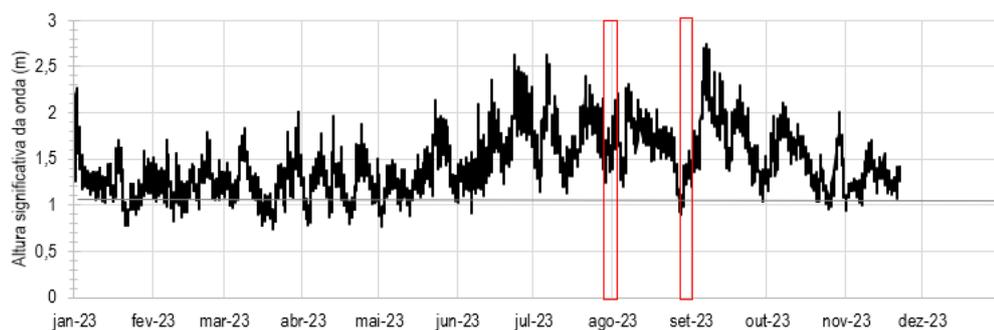


Fonte– O autor (2024).

### *Modificações a curto prazo em 2023*

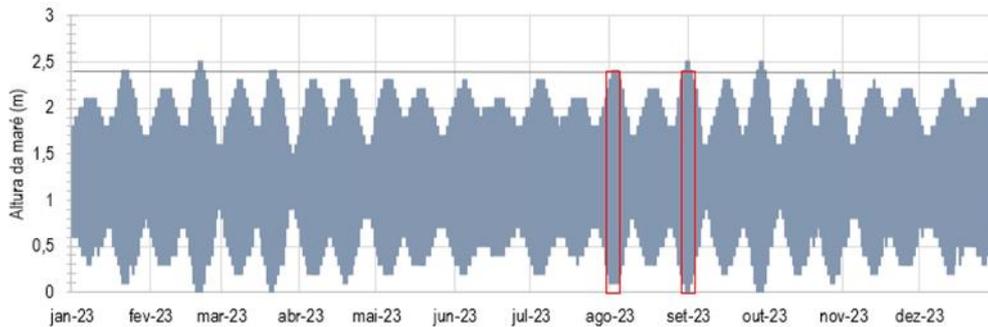
Para identificar mudanças a curto prazo é necessário que as condições de ondas e marés sejam mais próximas possíveis, os gráficos das Figura 16 e Figura 17, retratam as alturas de onda e maré para os dias que foram realizados os voos de drone, para o dia 03/08/2023 a altura da onda foi de 1,91m às 12h:00 e altura da maré foi de 0.1 às 11h:08, para o dia 01/09/2023 foi o segundo voo realizado, a altura da onda foi de 1,31 e altura da maré foi de 0.0 às 10h:47.

Figura 16– Gráfico da altura significativa da onda.



Fonte– O autor (2024).

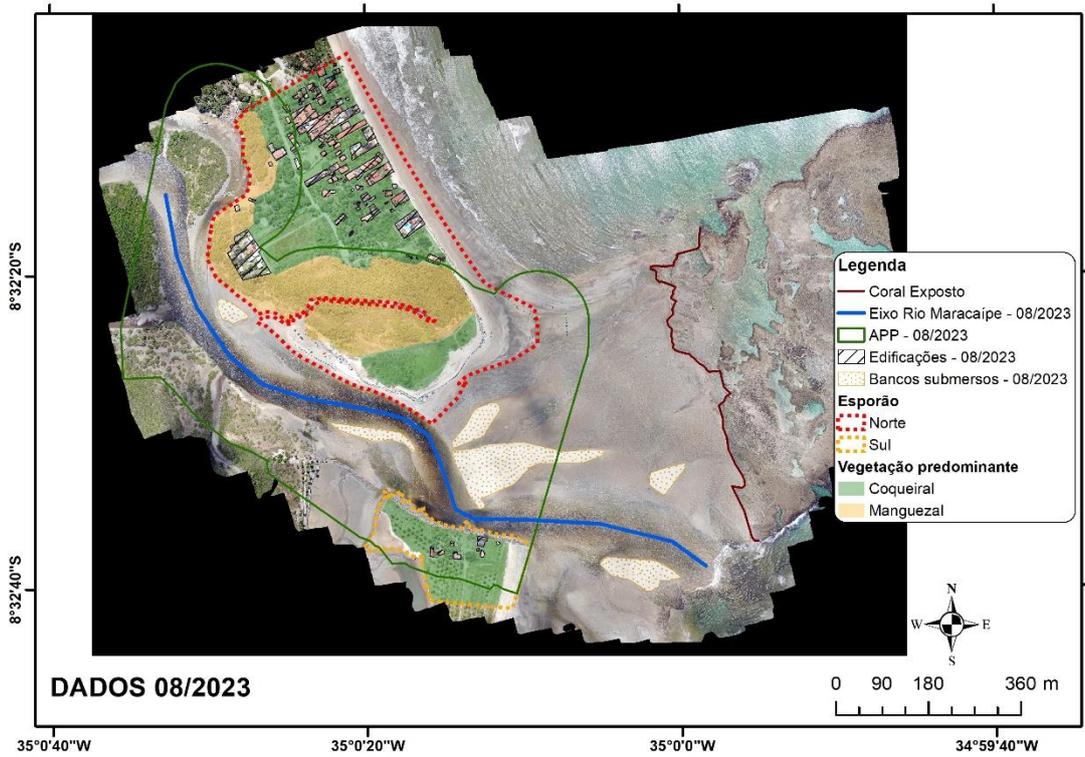
Figura 17– Gráfico da altura da maré.



Fonte– O autor (2024).

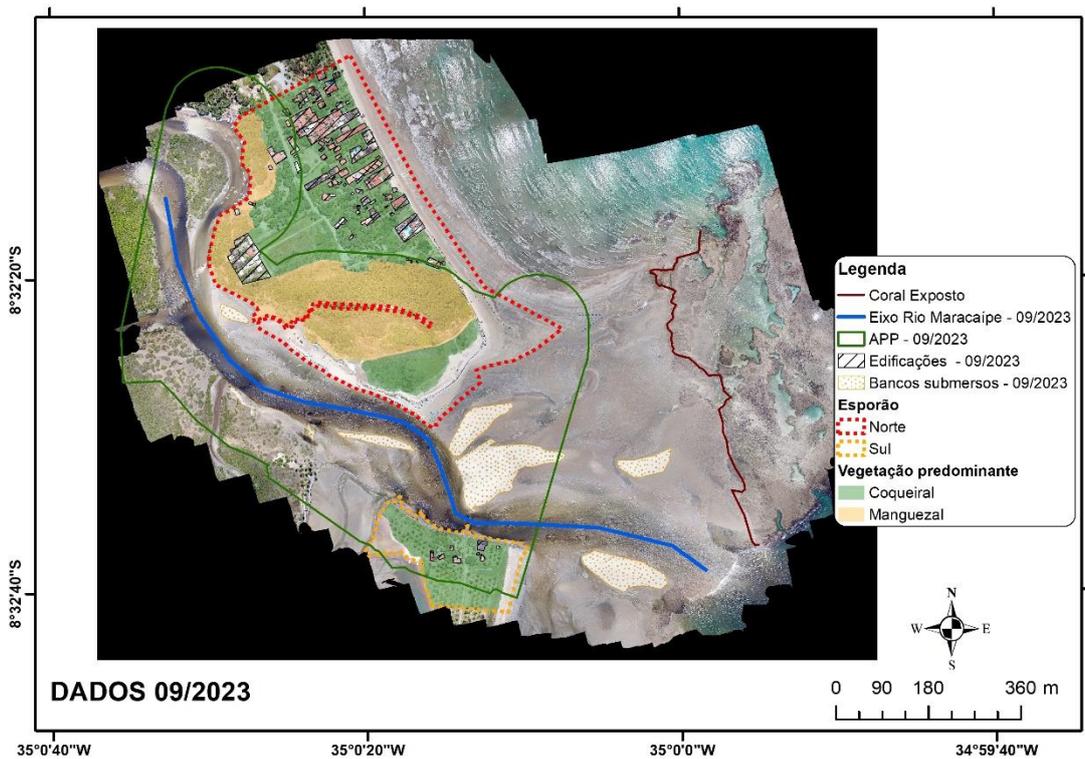
As **Figura 18 e Figura 19**, são duas imagens de drone executadas em 2023 com diferença de um mês a primeira realizada no mês de agosto e a segunda em setembro, os resultados indicam rio semelhante ao de 2015 com desembocadura para o leste, a linha de delimitação dos corais expostos apresenta um recuo próximo da área de desembocadura e um avanço mais ao norte, um grande aumento nas ocupações apresentando um crescimento de edificações no esporão norte, bancos submersos do lado direito e esquerdo da desembocadura, a área de APP com algumas edificações em seu interior, o esporões apresentam estrutura semelhante em ambos os meses, o esporão norte visualmente apresenta crescimento de vegetação próximo a praia, eventualmente causado pelo cercamento da área ocasionando a diminuição do fluxo, já o esporão sul apresenta um assoreamento devido ao acúmulo de sedimentos ocasionado pela hidrodinâmica ou seja com o quase fechamento da área os sedimentos entram e se acumulam.

Figura 18– Mapa com informações de 08/2023.



Fonte– O autor (2024).

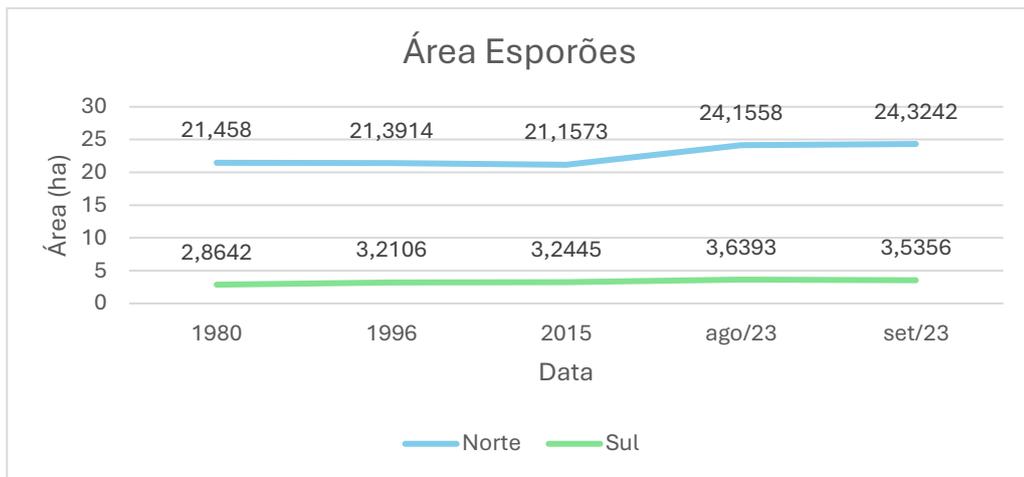
Figura 19– Mapa com informações de 09/2023.



Fonte– O autor (2024).

Os números apresentados na Figura 20, realçam o comportamento dos esporões ao longo dos anos, para o esporão norte é observado uma baixa de 1,40% em 2015 e um crescimento de 13,36%, em 2023. O esporão sul apresentou um crescimento de 23,45% em 2023 quando comparado com 1980.

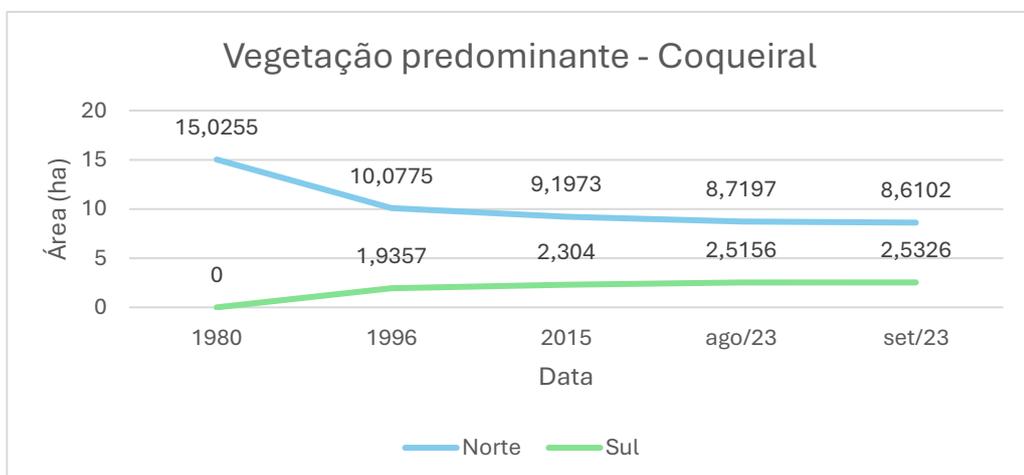
Figura 20– Gráfico de área dos esporões nas imagens de alta resolução.



Fonte– O autor (2024).

Como observado nos mapas a área de vegetação predominante – coqueiral diminuindo no esporão norte e crescendo no esporão sul, é observada na Figura 21, perdendo 42,68% do total, saindo de 15 hectares para 8,6 hectares em 40 anos, já no esporão sul saiu de 0 para 2,5 hectares.

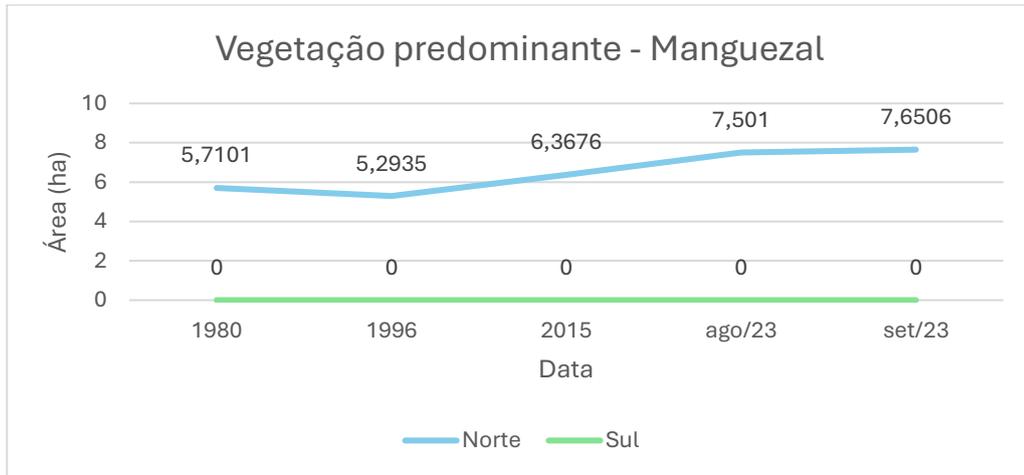
Figura 21– Gráfico de vegetação predominante - coqueiral.



Fonte– O autor (2024).

A vegetação predominante – manguezal passou por um aumento significativo de 33,97%, no esporão norte saindo de 5,71 ha para 7,65 ha, observado na Figura 22.

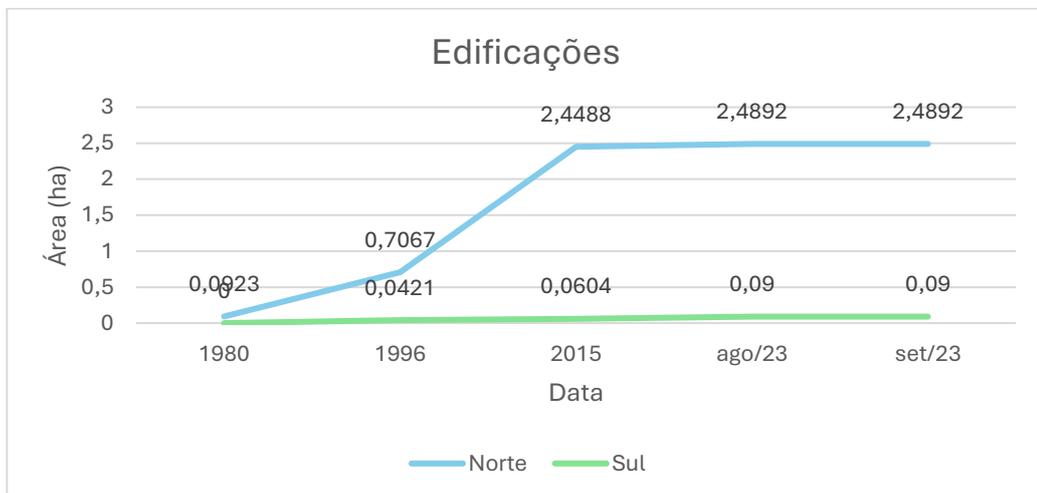
Figura 22– Gráfico de vegetação predominante – manguezal.



Fonte– O autor (2024).

A edificações tiveram crescimento de mais de 2000% no esporão norte, como observado na Figura 23, saindo de 0,09 ha no esporão norte para 2,48 ha, e no Sul de 0 ha para 0,09 ha.

Figura 23– Gráfico de edificações nas imagens de alta resolução.



Fonte– O autor (2024).

### 5.3 Taxas de variações dos esporões e recifes de corais expostos

A linhas costeiras foram extraídas das imagens de alta resolução, através da vetorização da linha de vegetação e edificações dos esporões, o esporão norte foi delimitado dos anos de 1980, 1996, 2015 e 2023, o esporão sul em 1980 não tinha vegetação ou edificação, então foi vetorizado as de 1996, 2015 e 2023, observado na, Figura 24.

O principal processo ocorreu de 1980 a 1996, a fixação do esporão sul, acarretou a diminuição da crista do esporão norte, fazendo com que a linha de costa diminuísse no sentido Sul – Norte, mas aumentasse no sentido Este – Oeste.

Figura 24– Evolução da linha de costa.



Fonte– O autor (2024).

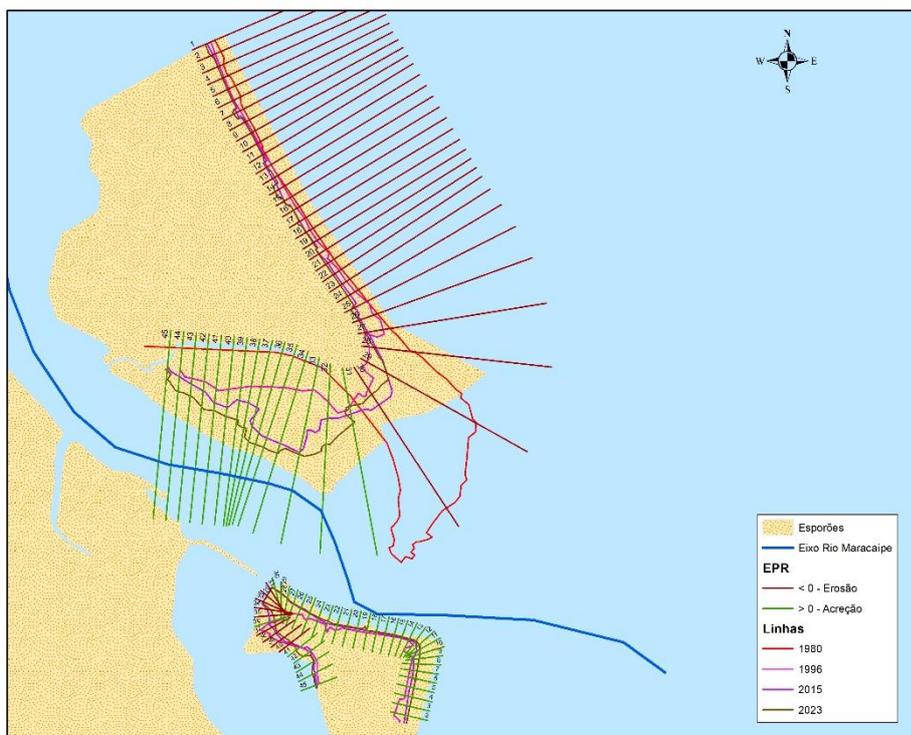
(CHI et al., 2023), em seu estudo realiza a medição das taxas de erosão e acreção utilizando a técnica EPR, que calcula a mudança linear média entre pontos de referência ao longo da linha de costa entre duas datas. Esta abordagem é essencial para compreender como a linha de costa responde a influências naturais e antrópicas, incluindo a construção de infraestruturas, alterações no uso da terra e eventos climáticos extremos. A habilidade de DSAS para integrar e analisar dados espaciais e temporais permite aos pesquisadores identificarem padrões de mudança e prever tendências futuras, facilitando a gestão eficaz das zonas costeiras e a implementação de medidas de proteção. (CHI et al., 2023).

O uso do *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) para analisar a variação de *spits* costeiros, utilizando o método *End Point Rate* (EPR), é uma abordagem eficaz para quantificar mudanças na morfologia de áreas costeiras ao longo do tempo. O DSAS permite calcular a taxa de variação da linha de costa, proporcionando uma medida precisa da migração de esporões (THIELER et al., 2009).

A análise com EPR pode revelar padrões de sedimentação, na variação da linha de costa, observa-se as mudanças ocorridas no esporão norte ao longo do tempo, identificando os locais com erosão em vermelho e os locais com acreção de área em verde, os resultados indicam recuo na linha de costa da beira mar e na ponta do esporão um forte recuo indicando erosões, já na parte que fica interna ao rio Maracáipe apresentou aumento na linha, indicando acreção.

Em 1980, o esporão Sul não apresentava vegetação ou edificação bem como possuía uma forma no sentido contrário, logo foi analisado a linha de costa a partir de 1996, os resultados indicam maior acreção resultante da implantação dos espigões.

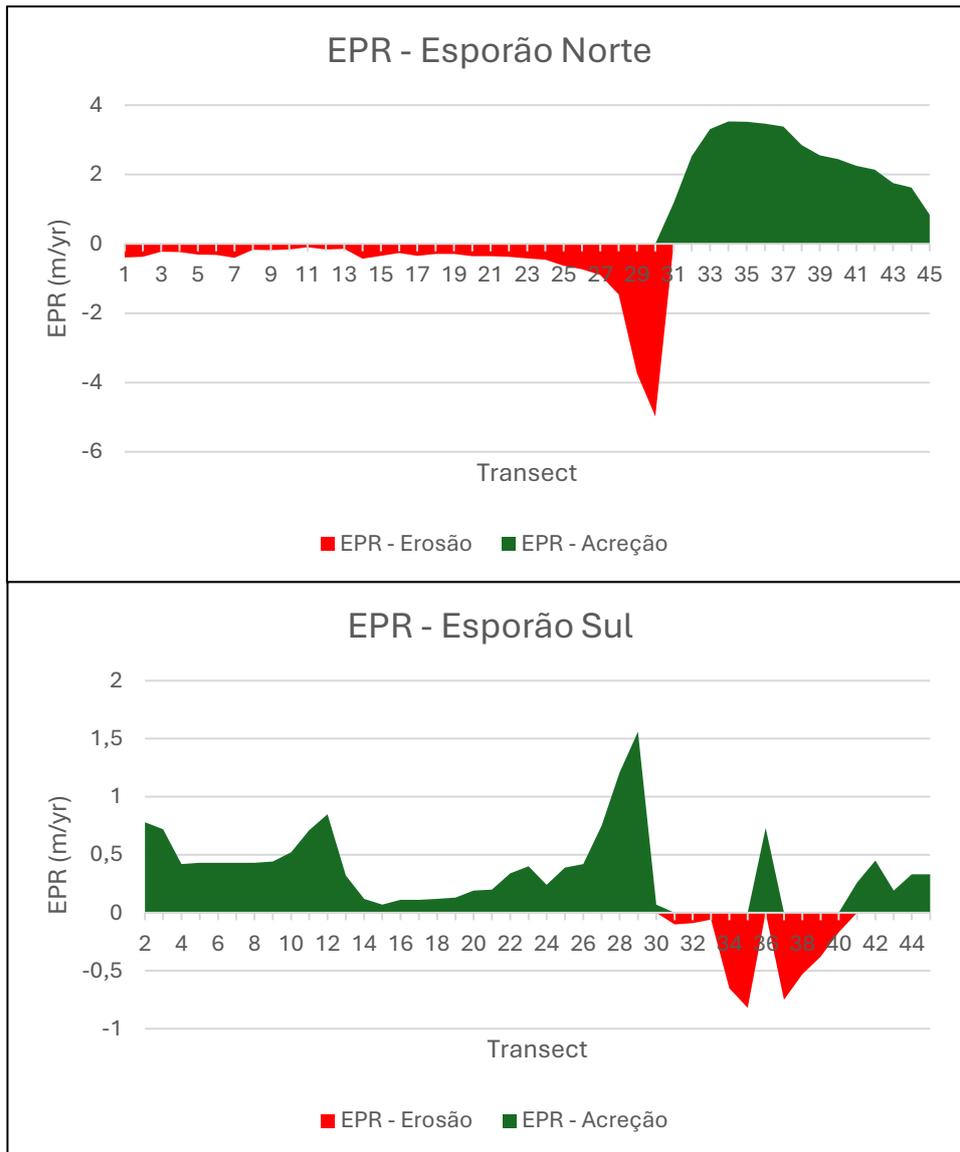
Figura 25– Mapa com transecto do esporão norte e sul.



Fonte– O autor (2024).

Os resultados do DSAS, apresentou 45 transectos para o esporão norte e 44 para o esporão sul, no esporão norte a erosão percorreu até o transecto 30 onde identificou a máxima de erosão com  $-4,98\text{m/yr}$ , e até o 45 houve acreção, chegando à máxima de acreção no 34 com  $3,53\text{ m/yr}$ . O esporão sul apresentou maior parte dos transecto dados positivos, indicando acreção, atingindo máxima no 29 com  $1,56\text{ m/yr}$ , do transecto 31 a 40 apresentou erosão, atingindo máxima de  $-0,82\text{m/yr}$ , observado na Figura 26.

Figura 26– Características da evolução dos esporões de 1980 a 2023.



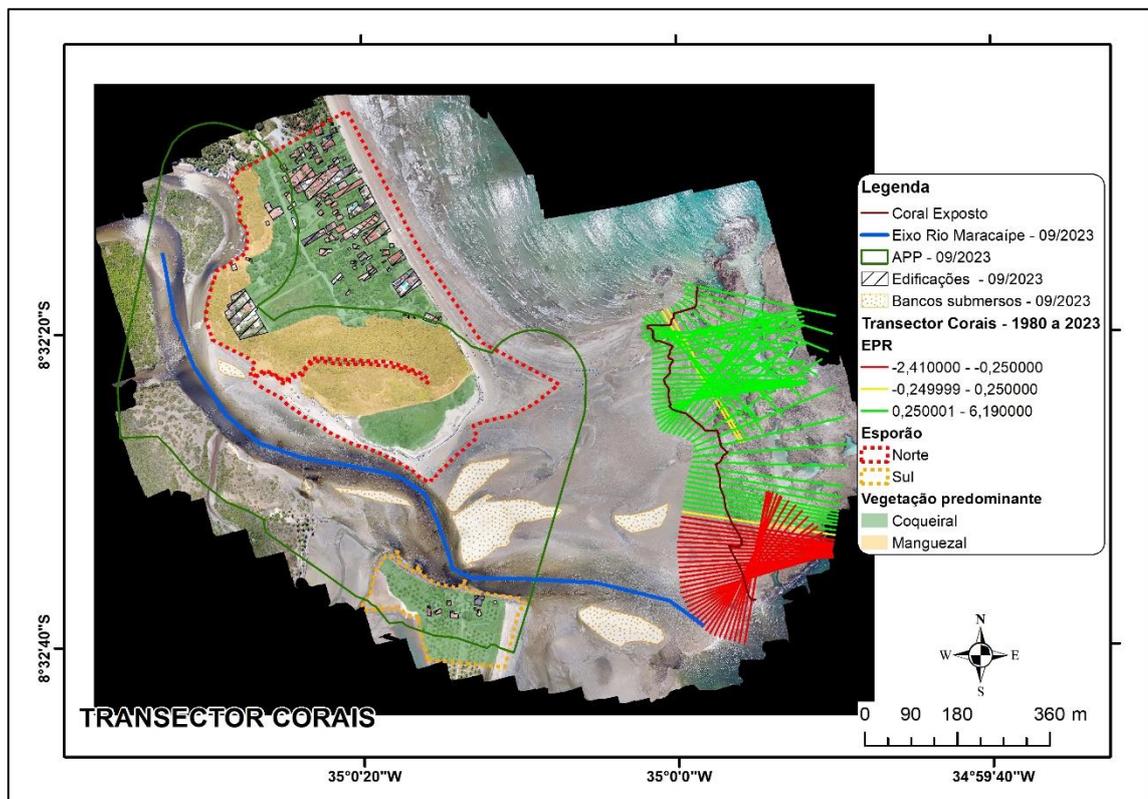
Fonte– O autor (2024).

(CÂMARA; HOLANDA; COSTA, 2023), explora a dinâmica da linha de costa em áreas protegidas e expostas ao longo do litoral sul de Pernambuco, utilizando o programa *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)* para avaliar as variações espaciais e temporais entre 2003 e 2020. As regiões estudadas demonstraram taxas distintas de erosão e acreção, influenciadas pela presença de recifes costeiros e a dinâmica fluvial da região. Por exemplo, a área ao sul protegida mostrou uma taxa de erosão significativa, enquanto a Baía de Tamandaré apresentou um balanço entre erosão e acreção em suas extremidades,(CÂMARA; HOLANDA; COSTA, 2023).

Além disso, o estudo identifica que a acumulação de sedimentos é sensivelmente afetada nas "zonas de sombra" criadas pelos recifes, que atenuam a energia das ondas e alteram a distribuição de sedimentos ao longo da costa. Estas zonas são cruciais para a estabilidade da linha de costa, pois contribuem para a formação de saliências que protegem áreas específicas da erosão, enquanto outras áreas podem experimentar acumulação de sedimento devido à difração e refração das ondas ao redor dos recifes. Essa dinâmica complexa ressalta a importância dos recifes como elementos naturais de proteção costeira e a necessidade de considerar sua preservação e o impacto das atividades humanas na gestão costeira e na política ambiental, (CÂMARA; HOLANDA; COSTA, 2023).

Na Figura 27, os resultados indicam depósito de sedimentos nos corais, as linhas identificadas a partir de 1980 foi traçada delimitando os recifes de corais expostos, observando então que ao longo dos anos o acúmulo de sedimentos nos recifes de corais foi seguindo a desembocadura do rio, os transectos verde mostram a diminuição de sedimentos na área e os vermelhos o assoreamento.

Figura 27– Mapa com transectos dos corais expostos.



Fonte– O autor (2024).

## 6. DISCUSSÃO

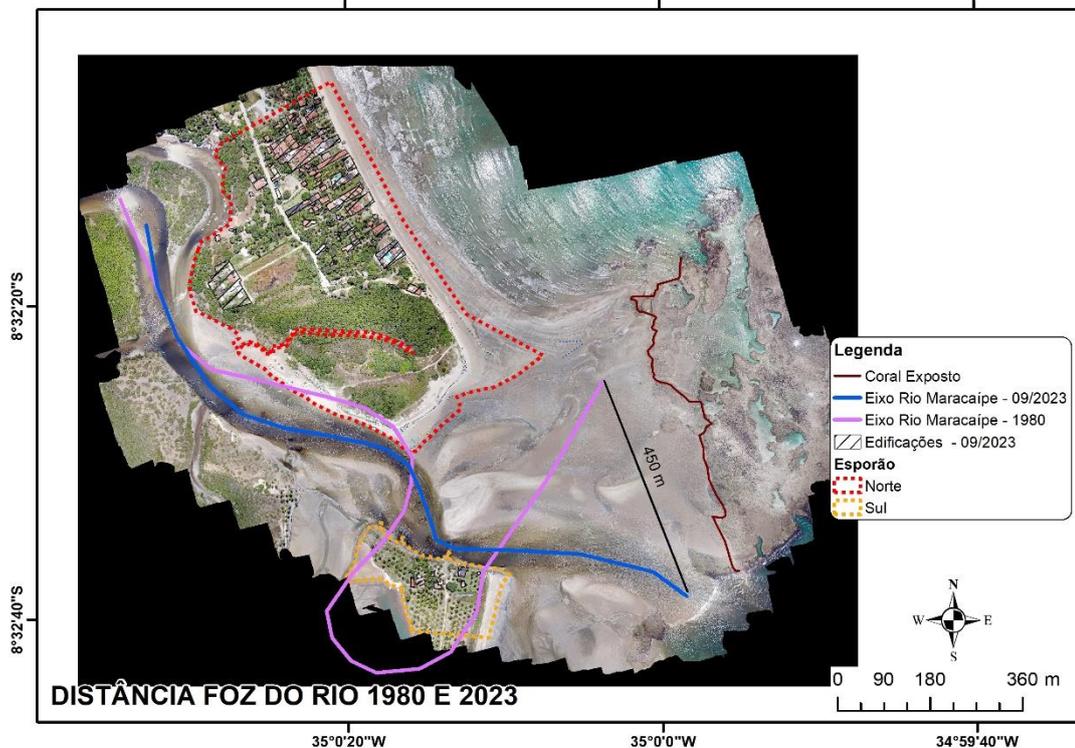
Alguns estudos anteriores na praia de Maracaípe são relevantes para discussão dos resultados apresentados, o estudo de erosão marinha desenvolvido pela CPRH em 1998, apresentou alguns acontecimentos, no final da década de 1980 a CPRH protocolou denúncias referentes as intervenções antrópicas no esporão sul, com a fixação da margem através de espigões, o estudo também fez um avaliação dos perfis praias no período de junho/96 a fevereiro de 1997, apresentando tendencias erosivas com insuficiência de sedimentos (SOBRAL et al., 1998).

Análises mais recentes foram realizadas, identificando que a linha de costa próxima ao pontal de Maracaípe encontra-se instável com redução na fonte de suprimentos (DE MACÊDO, 2011).

A alteração na dinâmica costeira causada por mudanças no curso de rios é um fenômeno significativo que pode impactar diversos aspectos ambientais e sociais. No Brasil, há estudos que destacam como essas mudanças podem acelerar processos erosivos e afetar a sedimentação costeira. Por exemplo, na foz do rio São Francisco, as modificações no curso do rio, devido a barragens e outras intervenções, têm resultado em uma diminuição significativa da quantidade de sedimentos transportados para a costa. Isso tem provocado erosão severa em praias e deltas, além de comprometer a estabilidade de ecossistemas costeiros (BANDEIRA et al., 2013; CORREIA, 2020).

Outro estudo realizado no delta do rio Doce, em Linhares (ES), revela que a reconfiguração do curso do rio após eventos de cheia, combinada com a urbanização, alterou significativamente a dinâmica sedimentar da região. Essas mudanças resultaram em variações na linha de costa e afetaram diretamente a morfologia costeira, exacerbando problemas de erosão (POLIZEL; ROSSETTI, 2014). Essas dinâmicas são complexas e influenciadas por múltiplos fatores, incluindo a ação humana, que pode intensificar ou mitigar os impactos das alterações no curso dos rios sobre as áreas costeiras. Sendo assim através da interferência antrópica direta e indireta, os resultados apresentados indicaram modificações e deslocamento no curso principal do rio, Figura 28, o deslocamento chegou a 450 metros desde 1980, até 2023. Os estudos demonstram que variações como essa, são consequências de múltiplos fatores e afeta diretamente a morfologia costeira.

Figura 28– Mapa comparativo do curso principal do rio de 1980 x 2023.



Fonte– O autor (2024).

As alterações no eixo dos rios e suas consequências sobre a morfologia costeira foram exploradas em um estudo que destacou o impacto da deposição de bancos de lama e do acúmulo de sedimentos na deflexão da desembocadura de rios. Essas mudanças podem ser exacerbadas por atividades humanas, como a construção de barragens e dragagens, que alteram o fluxo natural dos sedimentos e resultam em novas formas de erosão e deposição ao longo da costa (OYEDOTUN; NEDD, 2023).

Um estudo focado na morfodinâmica de desembocaduras de rios demonstrou que as mudanças na posição da boca do rio podem resultar em uma redistribuição significativa dos sedimentos, o que influencia diretamente o crescimento de espigões e a dinâmica dos manguezais. Esse processo é governado por uma interação complexa entre os processos fluviais e marinhos, que resultam em mudanças morfológicas ao longo da costa, com áreas de acreção e erosão surgindo de acordo com a nova distribuição sedimentar (BILAL; XIE; ZHAI, 2020).

As imagens de satélite com alta resolução temporal além de mostrar a diferença das áreas dos esporões e vegetação presente, é possível identificar que o rio tinha um padrão cíclico de alteração após a interferência antrópica em momentos com a foz direcionada para o norte e em outros momentos apontando para o leste, identificando uma estabilização a partir de 1996, onde permanece até hoje direcionado para o leste. (CHI et al., 2023), analisa as mudanças morfológicas em *spits* de areia localizados na foz do rio Fudu, destacando os impactos combinados dos efeitos das ondas e das interferências antrópicas ao longo de 36 anos. Os *spits*, situados em flancos opostos da foz do rio, mostraram padrões distintos de evolução devido à dinâmica hidrodinâmica e morfodinâmica variável. O estudo utilizou dados de imagens de satélite e análises de ondas costeiras para quantificar essas mudanças, revelando que a erosão e a acreção são processos influenciados tanto por fenômenos naturais como por atividades humanas, como a construção de infraestruturas costeiras e a gestão inadequada dos recursos hídricos, que alteram o transporte de sedimentos e a resiliência dos esporões, (CHI et al., 2023).

Os resultados em Fudu indicam que enquanto o *spit* ao norte manteve uma certa resiliência, suportando as ondas de tempestade e os impactos antrópicos graças à formação de bancos intertidais que fornecem sedimentos, o *spit* ao sul sofreu uma degradação acentuada devido à diminuição da oferta de sedimentos e ao bloqueio do transporte de sedimentos, resultante das atividades humanas. O estudo sugere que a gestão das zonas costeiras deve considerar plenamente a resiliência dos sistemas geomórficos para evitar perturbações excessivas e garantir a manutenção da funcionalidade e dos serviços ecossistêmicos fornecidos por essas formações, (CHI et al., 2023).

Os resultados demonstram que houve processos antrópicos que resultaram em uma nova dinâmica costeira, assim como os estudos retrataram as modificações e suas causas, o mesmo ocorreu na dinâmica local, com alteração no fornecimento de sedimentos algumas áreas foram modificadas passando por diversos processos.

A partir da mudança na foz do rio algumas áreas foram afetadas, dentre elas as formas dos esporões, a Figura **29**, retrata a diferença nas áreas de 1980 até 2023, com áreas em amarelo representando erosão e em verde acreção, o esporão norte possui atualmente 24,3242 hectares, quando comparado com 1980, teve 3,2265 ha de erosão e 6,0928 ha de acreção, correspondendo a um crescimento de 13,47 % de

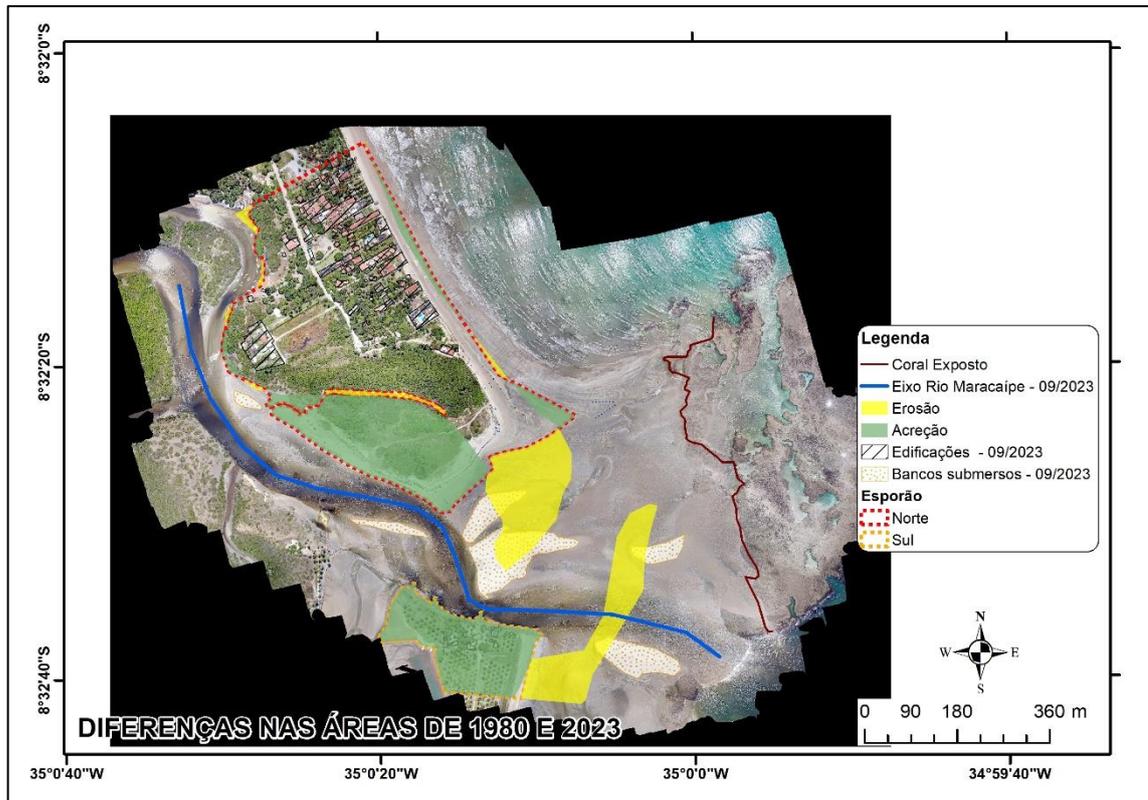
área. O esporão sul atualmente tem 3,5356 hectares, quando comparado com 1980, teve 2,8196 ha de erosão e 3,491 de acreção, correspondendo a um crescimento de 23,45% de área. Apesar de haver crescimento na área ocupada por edificações e fixação do esporão sul, intensificando a dinâmica na margem oposta, a área do esporão norte aumentou bem como a área do manguezal havendo uma expansão.

O estudo de (OYEDOTUN; NEDD, 2023), investiga a morfodinâmica das fozes dos rios na Guiana e o papel significativo da deposição de sedimentos no crescimento dos manguezais. A pesquisa demonstra que a deflexão do curso dos rios, muitas vezes impulsionada por atividades humanas como a construção de barragens e alterações no fluxo fluvial, resulta em um aumento substancial na deposição de sedimentos nas áreas costeiras, facilitando a expansão dos manguezais. Esta deposição não apenas modifica a morfologia local, mas também fornece os nutrientes necessários para o crescimento dos manguezais, demonstrando como as mudanças induzidas pelas ações humanas podem inadvertidamente criar condições favoráveis para a expansão dos manguezais(OYEDOTUN; NEDD, 2023).

Jupin et al. (2023), explora as dinâmicas antrópicas que contribuem para o acúmulo de sedimentos em ecossistemas de manguezais mexicanos, revelando como as atividades humanas influenciam indiretamente a expansão desses manguezais. A análise de núcleos de sedimento datados com chumbo-210 em duas lagoas costeiras mexicanas mostrou que as taxas de acumulação de sedimentos são consistentes com as médias globais, apesar das diferenças locais marcantes em termos de características meteorológicas, demográficas e de uso do solo. Ele ainda destaca que a erosão continental, impulsionada por mudanças no uso do solo e crescimento populacional desde a década de 1950, tem acelerado a deposição de sedimentos nos manguezais, facilitando sua expansão. (JUPIN et al., 2023)

Além das variações das áreas de acreção e erosão, a dinâmica sedimentar que passou a ser acumulada na parte interna do esporão norte, é bastante rica em minerais, fornecendo nutrientes necessários para crescimento de manguezais, na Figura 29, é notório as variações de áreas, mas observa-se que na parte interna ao rio do esporão norte encontra-se a área de acreção com predomínio de manguezal.

Figura 29– Mapa de erosão e acreção comparativa com 1980.



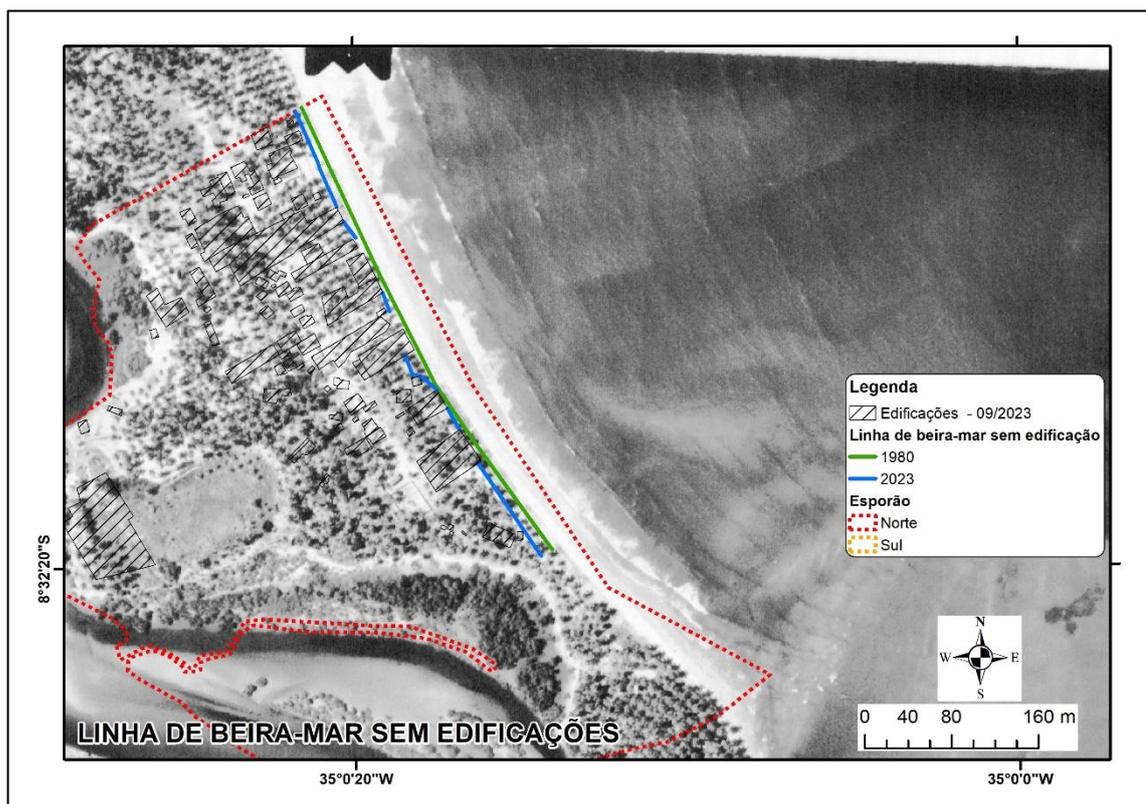
A ocupação de edificações na linha de beira-mar tem alterado significativamente a dinâmica costeira em várias regiões do Brasil, exacerbando processos de erosão e comprometendo a estabilidade dos ecossistemas costeiros. Estudos realizados em diferentes regiões do país, como a Praia do Futuro, em Fortaleza (CE), e a Praia de Ponta Negra, em Natal (RN), demonstram que a construção desordenada de edificações próximas à linha de costa interfere no transporte natural de sedimentos, crucial para a manutenção das praias (Barros Eduardo Lacerdaand de Paula, 2021; Maciel et al., 2012).

As intervenções humanas na linha costeira, particularmente através da construção de infraestruturas como muros de contenção, muitas vezes perturbam os processos naturais de dissipação de energia das ondas. Essas alterações podem acelerar a erosão costeira e exigir ainda mais intervenções artificiais, complicando a gestão costeira e exacerbando problemas em áreas adjacentes (BIRD, 1985). Além disso, a urbanização costeira impede a migração natural da linha de costa, um processo essencial para a adaptação das praias às mudanças climáticas e à elevação

do nível do mar (MEIRELES, 2008). Esse cenário é evidente em várias praias brasileiras, onde a erosão acelerada e a perda de sedimentos têm comprometido a infraestrutura urbana e os habitats naturais, destacando a necessidade urgente de medidas de gestão costeira (MUEHE, 2006).

É evidente que o número de edificações cresceu ao longo dos anos, afetando as áreas de APP e a dinâmica na beira-mar, sobre a linha de beira-mar observada na Figura 30, houve um grande avanço nas áreas ocupadas, saindo de 0% em 1980 para 35% da ocupação na linha de beira-mar. Essas crescentes ocupações afetam diretamente a linha costeira impedindo a migração natural da linha de costa além de acelerar os processos de erosão costeira.

Figura 30– Mapa linha de beira-mar de 1980 e 2023.

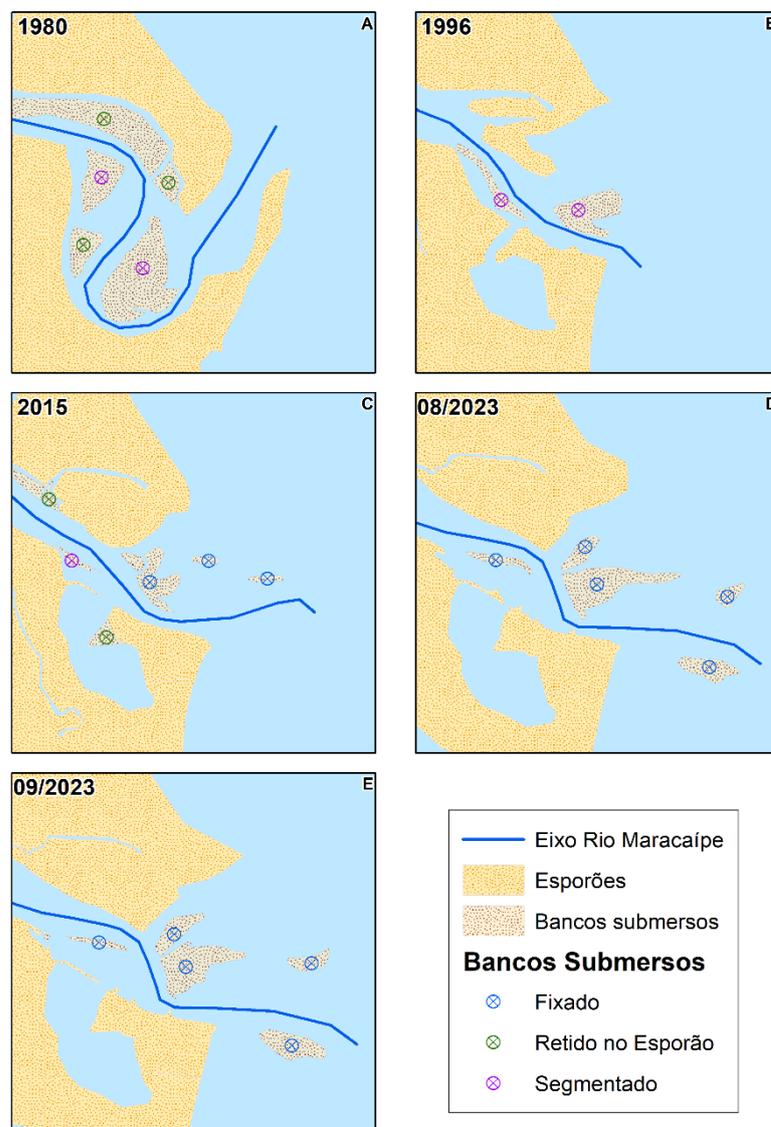


Fonte– O autor (2024).

Os bancos submersos apresentaram características notáveis ao longo dos anos, em 1980 a **Figura 31 A**, vários bancos internalizado no rio, próximos aos esporões, com o passar dos anos alguns bancos submersos ficaram retidos no

esporão, outros foram segmentados se tornando parte do esporão e parte movimentado sentido desembocadura, em 1996, **Figura 31 B**, houve grande mudança nos esporões e na desembocadura, o esporão sul acabou fixado e parte dele ficou retido como banco submerso, em 2015, **Figura 31 C**, nota-se que dois ficaram retidos nos esporões, e os outros acabaram fixando, em 2023, **Figura 31 D e Figura 31 E**, só possuem bancos fixados, apresentando pequenas variações.

Figura 31– Migração dos bancos submersos ao longo dos anos.



Fonte– O autor (2024).

As pequenas variações dos bancos estão ligadas diretamente a zona de sombra proporcionada pelos recifes de corais na saída da desembocadura, que

atenuam a energia das ondas e alteram a distribuição de sedimentos ao longo da costa. Estas zonas são cruciais para a estabilidade da linha de costa, pois contribuem para a formação de saliências que protegem áreas específicas da erosão, (CÂMARA; HOLANDA; COSTA, 2023).

A implantação de módulos de recifes artificial na Índia, estudado por (ASIR et al., 2022), foi conduzido de dezembro de 2015 a dezembro de 2020, investigou as mudanças no esporão de areia que surgiram após a implantação de módulos de recife artificial com o objetivo de restaurar a ilha que estava afundando. A pesquisa destacou que os recifes artificiais ajudaram a moderar a ação das ondas, o que favoreceu a acumulação de sedimentos e a formação do esporão de areia no lado de barlavento da ilha, (ASIR et al., 2022).

Além disso, as variações sazonais e as mudanças morfológicas sofridas pelo esporão de areia estão associadas ao clima de ondas local. As variações de batimetria e a configuração da linha de costa também estão relacionadas. Ao mover-se para contornos mais profundos, o esporão se divide em duas ou mais partes, enquanto ao mover-se para contornos rasos e planos, a área de exposição acima do nível do mar aumenta durante a oscilação sazonal regular. Essas mudanças cíclicas indicam que o esporão é pouco perturbado e sugerem que o suprimento de sedimentos da área de recife próxima continuará a aumentar a área do esporão e da ilha no futuro, (ASIR et al., 2022).

A mudança na posição da desembocadura de rios pode levar a uma redistribuição significativa dos sedimentos, resultando em padrões complexos de erosão e acreção ao longo da costa. Estudo sobre a foz do rio Yangtze demonstrou que a variabilidade nas condições hidrodinâmicas, como tempestades e alterações na descarga de sedimentos, pode induzir mudanças morfológicas substanciais nas margens intertidais, com áreas de erosão e acreção surgindo em diferentes locais conforme a dinâmica de deposição é alterada (LIU et al., 2023).

Da mesma forma, a pesquisa sobre a foz do rio Mangala na costa de Puri observou que a redistribuição dos sedimentos, desencadeada pela mudança na posição da desembocadura, resultou no crescimento de novos espigões e na erosão em outras partes da costa. Esses padrões de mudança são indicativos das interações complexas entre os fluxos fluviais e as condições costeiras, que podem ser tanto naturais quanto amplificadas por atividades humanas (MISHRA; KAR, 2023).

Enquanto aos avanços das erosões e acresção ao longo dos anos identificados por DSAS, a **Figura 32**, aponta em vermelho as regiões de erosões a linha de beira mar do esporão norte teve um recuo médio anual de 0,38 m/yr, atingindo em média 15 m de avanço da linha de costa em direção ao continente enquanto no setor dos coqueirais na ponta do esporão atingiu no transecto máximo a erosão de 4,98m/yr, remetendo a um avanço total médio de 215 m, já no interior do esporão os valores de avanço da área médio foi de 2,49 m/yr, o esporão sul apresentou valor de acresção médio de 0,34m/yr.

Os resultados indicam que após a mudança na foz do rio acarretou mudanças nas deposições de sedimentos, saindo do Norte para o Sul, sendo um dos fatores principais para as erosões apontadas no esporão norte e acresção ocorrida no esporão sul.

Figura 32– Indicação das erosões e acresção nos esporões.



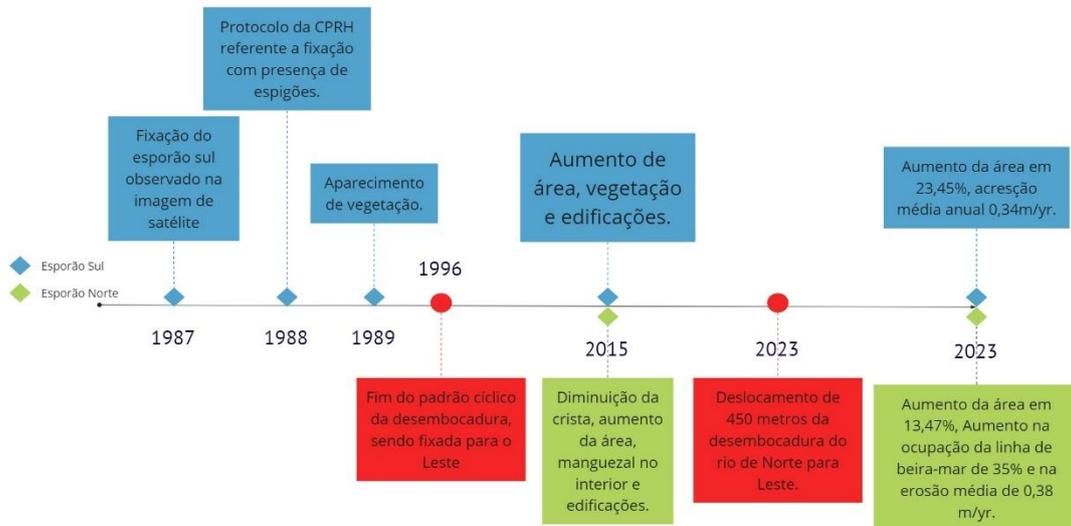
Fonte– O autor (2024).

Vários processos naturais foram afetados após a interferência antrópica, os estudos comprovam que qualquer modificação mesmo que indireta, afetam diretamente as características da região. A linha do tempo apresentada na Figura 33,

representa os principais acontecimentos ocorridos , iniciada em 1987 com a fixação do esporão sul acarretou em mudanças nos padrões do rio, na deposição dos sedimentos e nas erosões do esporão norte, cerca de 40 anos foram analisado com diferentes metodologias, provando que as modificações continuam ocorrendo e indicando que ainda ocorrerá mudanças significativas ao longo dos próximos anos.

Figura 33– Linha do tempo dos principais acontecimentos.

## Linha do Tempo



Fonte– O autor (2024).

## 7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a ocupação desordenada e a expansão da infraestrutura turística têm provocado alterações significativas na morfologia e na dinâmica sedimentar da região, acarretando erosão costeira acentuada e perda de biodiversidade. O uso de uma abordagem metodológica avançada que integrou o uso de imagens de satélite baixa resolução e imagens de alta resolução espacial, bem como análises detalhadas utilizando o *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), para investigar as mudanças geomorfológicas na desembocadura do Rio Maracaípe. Esta análise multifacetada foi essencial para entender as complexas dinâmicas costeiras induzidas por intervenções humanas e processos naturais. Os resultados levam às seguintes conclusões:

1. A fixação do esporão sul e outras interferências antrópicas foram identificadas como fatores chave que alteraram o transporte e a deposição de sedimentos na área. Essa intervenção antrópica impediu a mobilidade cíclica natural da desembocadura, fixando-a na posição leste, o que acarretou alterações substanciais na geomorfologia local.
2. As adaptações às novas condições geomorfológicas incluíram a erosão progressiva da praia do esporão norte, aumento de sedimentos da área estuarina, redução de coqueirais e o aumento dos manguezais, a reorientação e fixação da desembocadura do rio para o leste, e o descobrimento de porções soterradas dos recifes de corais. Estas mudanças não apenas exemplificam a resposta dos sistemas naturais às alterações induzidas, mas também destacam a complexa interação entre alterações físicas e respostas ecológicas.
3. A erosão intensificada da praia no esporão norte foi parcialmente atribuída à mudança na dinâmica da desembocadura, que anteriormente em 1980, depositava sedimentos neste esporão e agora favorece o esporão sul. Esta alteração nos padrões de deposição é uma das principais causas da erosão acelerada, ameaçando as infraestruturas costeiras e exigindo monitoramento e gestão proativos para prevenir danos futuros e garantir a segurança da área.

Os resultados demonstram os efeitos sistemáticos em ambientes costeiros dinâmicos, como desembocaduras e esporões, devido as interferências antrópicas. Isso reforça a necessidade de implementar estratégias de gestão costeira informadas e adaptativas, capazes de responder às dinâmicas costeiras em constante mudança e de mitigar os impactos das atividades humanas sobre esses frágeis ambientes.

Por mais que as imagens de baixa resolução forneça informações preciosas, elas possuem algumas limitação desde a sua baixa resolução espacial, dificultando a identificação de objetos ou detalhamento de área, além da presença de nuvem e diferenças de maré, porém são disponibilizadas mensalmente na maioria dos casos, sendo de grande utilidade para tomada de decisão rápida.

## 8. REFERÊNCIAS

AIROLDI, L.; BALATA, D.; BECK, M. W. The gray zone: relationships between habitat loss and marine diversity and their applications in conservation. **Journal of experimental marine biology and ecology**, v. 366, n. 1–2, p. 8–15, 2008.

AMBROSIO, B. G. **Dinâmica da desembocadura lagunar de Cananéia, litoral sul do estado de São Paulo**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 21 fev. 2017.

ASIR, N. G. G. et al. The formation and spatio-temporal variations of a new sand spit in Vaan Island, India—An influence of the multipurpose artificial reefs deployed to restore the sinking island. **Regional Studies in Marine Science**, v. 51, p. 102173, 2022.

BANDEIRA, J. V. et al. Resposta morfológica da foz do rio São Francisco, devido à retenção de sedimentos nos reservatórios. **VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias**, v. 23, n. 1, p. 5–17, 2013.

BARLETTA, M.; COSTA, M. F. Living and Non-living Resources Exploitation in a Tropical Semi-arid Estuary. **Journal of Coastal Research**, p. 371–375, 2009.

BARROS EDUARDO LACERDA AND DE PAULA, D. P. AND G. R. G. P. AND DE O. S. J. Erosion and Coastal Structures in Brazilian Metropolises: The Case of Fortaleza and Its Inequalities. Em: SINGH R. B. AND CHATTERJEE, S. AND M. M. AND DE L. A. J. (Ed.). **Practices in Regional Science and Sustainable Regional Development: Experiences from the Global South**. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 127–150.

BARROSO, C. P. **Dinâmica de bancos e pontais arenosos associados à desembocadura do estuário de Caravelas, BA**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 15 dez. 2009.

BELTRÁN, V. J. Política, gestión y litoral una nueva visión de la gestión integrada de áreas litorales: Párrafos Geográficos N° 21. **Párrafos Geográficos**, v. 13, n. 1, p. 71–77, 2014.

BILAL, A.; XIE, Q.; ZHAI, Y. Flow, Sediment, and Morpho-Dynamics of River Confluence in Tidal and Non-Tidal Environments. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 8, p. 591, 7 ago. 2020.

BIRD, E. C. F. **Coastline changes. A global review**. United States: John Wiley and Sons Inc., New York, NY, 1985.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Cidade: Ipojuca - Pernambuco**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/ipojuca.html>. Acesso em: 24 jul. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm?itid=lk\\_inline\\_enhanced-template](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm?itid=lk_inline_enhanced-template). Acesso: 21 jul. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Projeto Orla**: fundamentos para gestão integrada. Brasília: MMA, 2006. 74p.

BRASIL. Ministério da Economia. Secretaria de Coordenação e Governança do Patrimônio da União. **Manual Projeto Orla**. Brasília: Ministério da Economia, 2022. 324 p. ISBN 978-65-997520-0-1.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Departamento de Oceano e Gestão Costeira**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/composicao/smc/doceano>. Acesso: 02 mar. 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002**. Estabelece diretrizes para o gerenciamento dos resíduos sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 mar. 2002. Seção 1, p. 11.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 369, de 28 de março de 2006** – Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente-APP. 2006.

CÂMARA, I. F. DA; HOLANDA, T. F. DE; COSTA, M. B. Erosão e gestão costeira em praias protegidas por recifes no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 1, 16 jan. 2023.

CASSIANO, G. F.; SIEGLE, E. Migração lateral da desembocadura do Rio Itapocú, SC, Brasil: evolução morfológica e condicionantes físicas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 4, p. 537–549, dez. 2010.

CAVALCANTI, L. B. M. A proteção da zona costeira e a conservação da biodiversidade marinha no contexto de planejamento integrado urbano sustentável. **Revista do Ministério Público de Contas do Estado do Paraná**, v. 9, n. 16, p. 125–137, 2022.

CHI, S. et al. Morphological evolution of paired sand spits at the Fudu river mouth: Wave effects and anthropogenic factors. **Marine Geology**, v. 456, p. 106991, 2023.

COOPER, J. A. G. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. **Geomorphology**, v. 40, n. 1, p. 99–122, 2001.

CORREIA, I. O. **Faixas de proteção à erosão costeira no delta do Rio São Francisco**. [s.l.] Universidade Federal de Sergipe, 16 mar. 2020.

COSTA, M. B.; MACEDO, E. C.; SIEGLE, E. Wave refraction and reef island stability under rising sea level. **Global and Planetary Change**, v. 172, p. 256–267, 2019.

COSTANZA, R. et al. The Value of Coastal Wetlands for Hurricane Protection. **Ambio**, v. 37, n. 4, p. 241–248, 2008.

COUTINHO, P. DA N. Geologia marinha da plataforma continental Alagoas-Sergipe. **T. Livre Docência, UFPE, Recife**, 1976.

CPRH, A. E. DE M. AMBIENTE. R. DE MONITORAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS DO E. DE P.-2019. **Relatório de monitoramento de bacias hidrográficas do Estado de Pernambuco–2007**. CPRH, , 2020.

CPRM, A. E. D. M. A. **Atividades Impactantes sobre o Meio Ambiente da Região Metropolitana do Recife**. RecifeCPRM, , 2019.

DE ANDRÉS, M.; BARRAGÁN, J. M.; SCHERER, M. Urban centres and coastal zone definition: Which area should we manage? **Land Use Policy**, v. 71, p. 121–128, fev. 2018.

DE MACÊDO, R. **Caracterização morfodinâmica e geoambiental da praia de Maracaípe, Ipojuca-PE**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 31 jan. 2011.

DE MACEDO, R. J. A. et al. Transporte de sedimentos e variação da linha de costa em curto prazo na praia de Maracaípe (PE), Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada-Journal of Integrated Coastal Zone Management**, v. 12, n. 3, p. 343–355, 2012.

DE MIRANDA, L. B. **Princípios de Oceanografia Física de Estuários Vol. 42**. São Paulo: Edusp, 2002.

DYER, K. R.; GONG, W. K.; ONG, J. E. The cross sectional salt balance in a tropical estuary during a lunar tide and a discharge event. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 34, n. 6, p. 579–591, 1992.

FAGHERAZZI, S. et al. Dynamics of river mouth deposits. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 3, p. 642–672, 2015.

FENSTER, M. S.; DOLAN, R.; ELDER, J. F. A New Method for Predicting Shoreline Positions from Historical Data. **Journal of Coastal Research**, v. 9, n. 1, p. 147–171, 1993.

FRANÇA, C. F. DE. **Morfologia e mudanças costeiras da margem leste da Ilha de Marajó-(PA)**. Pará: Universidade Federal do Pará, 27 fev. 2003.

GARCÍA-ALÉN, G. et al. Analysis of two sources of variability of basin outflow hydrographs computed with the 2D shallow water model Iber: Digital Terrain Model and unstructured mesh size. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128182, 2022.

GUANNEL GREG AND ARKEMA, K. A. N. D. R. P. A. N. D. V. G. The Power of Three: Coral Reefs, Seagrasses and Mangroves Protect Coastal Regions and Increase Their Resilience. **PLOS ONE**, v. 11, n. 7, p. 1–22, set. 2016.

HIMMELSTOSS, E. A. et al. **Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide** **Open-File Report**. Reston, VA: [s.n.]. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20211091>>.

HOAN, L. X. et al. A mathematical model of spit growth and barrier elongation: Application to Fire Island Inlet (USA) and Badreveln Spit (Sweden). **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 93, n. 4, p. 468–477, 2011.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2007.

IPCC, I. P. ON C. C. Technical Summary. Em: (IPCC), I. P. ON C. C. (Ed.). **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. p. 35–144.

JUPIN, J. L. J. et al. Anthropogenic drivers of increasing sediment accumulation in contrasting Mexican mangrove ecosystems. **CATENA**, v. 226, p. 107037, 2023.

KENYON, N.; COOPER, B. **Sand banks, sand transport and offshore wind farms**. [s.l.: s.n.].

KNOPPERS, B. A. et al. A interface terra-mar do Brasil. **Biologia marinha. Interciência, Rio de Janeiro**, p. 529–553, 2009.

LEANDRO, G. R. DOS S.; NASCIMENTO, F. R. DO; SOUZA, C. A. DE. Dinâmica das águas no sistema rio-planície de inundação do rio Paraguai em Cáceres – Mato Grosso. Em: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. [s.l.] INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 5979–5990.

LIU, X. et al. Erosion and accretion patterns on intertidal mudflats of the Yangtze River Estuary in response to storm conditions. **Anthropocene Coasts**, v. 6, n. 1, p. 6, 2023.

LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 823–870, 1 mar. 2007.

MACIEL, A. B. C.; LIMA, Z. M. C.; LIMA, J. S. D. DE. Paisagem costeira: as modificações da praia de ponta negra na cidade de Natal/RN, da década de 1970 a 2010. **Sociedade e Território**, v. 22, n. 2, p. 2–18, 3 fev. 2012.

MARQUES CARRIÇO, J.; MENDES LOMBA PINHO, R. A urbanização na zona costeira e os impactos ambientais – o caso da RMBS no estado de São Paulo. **LEOPOLDIANUM**, v. 47, n. 131, p. 20, 15 maio 2023.

MEIRELES, A. J. DE A. Impactos ambientais decorrentes da ocupação de áreas reguladoras do aporte de areia: a planície Costeira da Caponga, município de Cascavel, litoral leste cearense. **Confins**, v. 2, 2008.

MISHRA, D.; KAR, A. K. River mouth shifting and shoreline change analysis of Mangala river mouth at Puri coastline. **Natural Hazards**, v. 118, n. 3, p. 2019–2036, 2023.

MONTEIRO PIRAJÁ JÚNIOR, C. A zona costeira brasileira como área de proteção às tartarugas marinhas. **Revista Eletrônica Direito e Política**, v. 2, n. 3, p. 291–309, 4 ago. 2015.

MOSTAERT, M. S. **As áreas de preservação permanente em Pernambuco: uma perspectiva política (1995-2011)**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2013.

MUEHE, D. Erosão e progradação do litoral brasileiro. **Brasília: Ministério do Meio Ambiente**, v. 1, p. 475, 2006.

NAGARAJAN, R. et al. Decadal evolution of a spit in the Baram river mouth in eastern Malaysia. **Continental Shelf Research**, v. 105, p. 18–25, 2015.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. **Science**, v. 328, n. 5985, p. 1517–1520, 2010.

NOVA<sup>1</sup>, F. V. P. V.; TORRES, M. F. A. Avaliação ambiental em Unidades de Conservação: estuário do rio Maracaípe, Ipojuca-PE, Brasil. **Revista de Geografia (UFPE)**, v. 29, n. 3, 2012.

OERTEL, G. F. **Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands**. Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets. **Anais...Springer**, 1988.

OLDFIELD, F. Lakes and their drainage basins as units of sediment-based ecological study. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 1, n. 3, p. 460–504, 1 out. 1977.

OYEDOTUN, T. D. T.; NEDD, G. A. River mouth morphodynamics and deflection over the short term: effects on spit growth and mangrove dynamics. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, 2023.

PEREIRA, P. S. et al. Atlas de vulnerabilidade à erosão costeira e mudanças climáticas em Pernambuco. **Recife: Editora Universitária UFPE**, 2015.

PITOMBEIRA, S. C.; ALEME ROMCY, C. M. Ocupação do território em áreas costeiras: proposta de gestão e ordenamento de zona costeira - uma oportunidade para o planejamento urbano. **Revista de Direito da Cidade**, v. 15, n. 3, 23 dez. 2023.

POLIZEL, S. P.; ROSSETTI, D. DE F. Caracterização morfológica do delta do rio doce (ES) com base em análise multissensor. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 2, 18 ago. 2014.

REID, J. **Evolução temporal da dinâmica do sistema estuarino de Santos (SP): efeitos das alterações morfológicas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 13 fev. 2020.

REMONDINO, F. et al. **Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview**. (M. Ioannides et al., Eds.)Progress in Cultural Heritage Preservation. **Anais...**Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.

SILVA, A. F. **Características Hidrográficas do Estuário da Beira, Moçambique**. [s.l.] UFRJ, 2011.

SOBRAL, A. et al. Estudo da erosão marinha na região de Maracaípe Ipojuca. **Recife: CPRH**, p. 99, 1998.

SYVITSKI, J. P. M. et al. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. **Science**, v. 308, n. 5720, p. 376–380, 2005.

THIELER, E. R. et al. **The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline changeOpen-File Report**. Reston, VA: [s.n.]. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/publication/ofr20081278>>.

WOODROFFE, C. Wollongong, NSW, Australia. 2001.

WRIGHT, L. D.; COLEMAN, J. M. Variations in morphology of major river deltas as functions of ocean wave and river discharge regimes. **AAPG Bulletin**, v. 57, n. 2, p. 370–398, 1973.

WRIGHT, L. D.; COLEMAN, J. M. River delta morphology: wave climate and the role of subaqueous profile. **Coastal Sedimentation. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson & Ross**, p. 87–89, 1978.

WULDER, M. A. et al. Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. **Remote Sensing of Environment**, v. 122, p. 2–10, 2012.

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.

**APÊNDICE A – IMAGENS DE SATÉLITES DE 1984 A 2023, A POLIGONAL AZUL REPRESENTA A ÁREA DO ESPORÃO DELIMITADA**

