

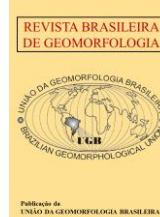


<https://rbgeomorfologia.org.br/>
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 25, nº 4 (2024)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbgeomorfologia.v25i4.2604>



Artigo de Pesquisa

Mudança na Linha de Costa e Erosão Costeira: Uma Análise das Alterações a Longo e Curto Prazo e Estratégias de Mitigação no Litoral de Icapuí, Nordeste do Brasil

Shoreline Change and Coastal Erosion: An Analysis of Long and Short-Term Alterations and Mitigation Strategies on the Coast of Icapuí, Northeast Brazil

Eduardo Lacerda Barros¹, Lidriana de Souza Pinheiro², Renan Gonçalves Pinheiro Guerra³, Francisco José Maciel de Moura⁴, Davis Pereira de Paula⁵, Antônio Rodrigues Ximenes Neto⁶, Melvin Moura Leisner⁷, Jáder Onofre de Morais⁸

- ¹ Universidade Estadual do Ceará (UECE), Campus do Itaperi, Programa de Pós-Graduação em Geografia (ProPGeo), Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO)/Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais (PPGCMT), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: eduardolacerdad@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5975-5817>
- ² Universidade Federal do Ceará (UFC), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: lidriana@ufc.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-0771>
- ³ Secretaria Municipal de Educação (SME), Prefeitura de Fortaleza, Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO/PROPGeo/UECE), Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais (PPGCMT), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: renan.lgco@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5961-3117>
- ⁴ Universidade Estadual Vale do Acaraú (UVA), Curso de Graduação em Geografia, Laboratório de Estudos Ambientais e Climáticos (LEAC), Sobral, Ceará / Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO/PROPGeo/UECE) / Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais (PPGCMT), Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: maciel_francisco@uvanet.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7281-1991>
- ⁵ Universidade Estadual do Ceará (UECE), Campus do Itaperi, Programa de Pós-Graduação em Geografia (ProPGeo), Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: davis.paula@uece.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8298-7720>
- ⁶ Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Departamento de Geografia/LAGESA/GEOCERES, Caicó, Rio Grande do Norte, Brasil. E-mail: antonio.ximenes@ufrn.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3246-7022>
- ⁷ Universidade Estadual do Ceará (UECE), Campus do Itaperi, Programa de Pós-Graduação em Geografia (ProPGeo), Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: melvin.leisner@aluno.uece.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-6924>
- ⁸ Universidade Estadual do Ceará (UECE), Campus do Itaperi, Programa de Pós-Graduação em Geografia (ProPGeo), Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: jader.morais@uece.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3856-1287>

Recebido: 01/08/2024; Aceito: 04/11/2024; Publicado: 28/12/2024

Resumo: As praias arenosas desempenham um papel crucial como barreiras naturais contra as mudanças climáticas e possuem um valor socioeconômico significativo. No município de Icapuí, Litoral Leste do Ceará, a erosão tem afetado parte de suas praias desde os anos 2000, impactando construções próximas à Linha de Costa (LC), como escolas, pousadas e residências. Este artigo analisou a dinâmica da LC nas praias de Barreiras de Baixo, Barreiras de Cima e Barrinha, localizadas

no município em questão, utilizando duas escalas de análise: em curto prazo, com levantamento in situ usando receptores geodésicos entre 2015 e 2023, e em longo prazo, com imagens orbitais de 2002 a 2024. Para a análise estatística, foram aplicados os métodos End Point Rate (EPR) e Linear Regression Rate (LRR) no software ArcGIS utilizando a extensão Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versão 5.1. A análise de curto prazo revelou uma média de EPR de 0,0 m/ano, com progradação máxima de 7,1 m/ano e erosão máxima de 6,4 m/ano. O LRR apresentou uma média de -0,2 m/ano, com progradação máxima de 7 m/ano e erosão máxima de 6,7 m/ano. A análise de longo prazo mostrou uma média de EPR de -1,1 m/ano, com progradação máxima de 0,5 m/ano e erosão mínima de 3,9 m/ano, enquanto o LRR indicou uma média de -0,7 m/ano, com erosão máxima de 3,6 m/ano e progradação máxima de 1,6 m/ano. Esses resultados indicam um recuo mais acentuado da LC ao longo do tempo. A análise também revelou que estruturas de contenção, como enrocamentos, substituíram estacas de madeira e sacos de areia anteriormente utilizados pelas comunidades locais, estabilizando 63,2% da LC. Os prognósticos obtidos por meio deste estudo para os anos de 2034 e 2044 indicam recuo da LC em áreas ainda sem contenção, ressaltando a necessidade urgente de um planejamento participativo eficaz. É essencial alinhar esse planejamento com o Plano Municipal de Adaptação à Mudança do Clima e o Plano de Gerenciamento Costeiro Integrado (PGI). Manter as estruturas de proteção e realizar monitoramento contínuo é fundamental para adaptar as estratégias de gestão costeira, protegendo comunidades e ecossistemas vulneráveis.

Palavras-chave: Dinâmica do Litoral; Monitoramento Costeiro; Mudanças Climáticas; Planejamento Urbano.

Abstract: Sandy beaches play a crucial role as natural barriers against climate change and hold significant socioeconomic value. In the municipality of Icapuí, on the eastern coast of Ceará, erosion has affected some of its beaches since the 2000s, impacting structures near the Shoreline (SL), such as schools, inns, and residences. This article analyzed the SL dynamics on the beaches of Barreiras de Baixo, Barreiras de Cima, and Barrinha, located in the mentioned municipality, using two scales of analysis: in the short term, with in situ surveys using geodetic receivers between 2015 and 2023, and in the long term, with orbital images from 2002 to 2024. For statistical analysis, the End Point Rate (EPR) and Linear Regression Rate (LRR) methods were applied in ArcGIS software using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 extension. The short-term analysis revealed an average EPR of 0.0 m/year, with a maximum progradation of 7.1 m/year and maximum erosion of 6.4 m/year. The LRR showed an average of -0.2 m/year, with a maximum progradation of 7 m/year and maximum erosion of 6.7 m/year. The long-term analysis showed an average EPR of -1.1 m/year, with a maximum progradation of 0.5 m/year and a minimum erosion of 3.9 m/year, while the LRR indicated an average of -0.7 m/year, with maximum erosion of 3.6 m/year and maximum progradation of 1.6 m/year. These results indicate a more pronounced retreat of the SL over time. The analysis also revealed that containment structures, such as Rip-rap, have replaced wooden stakes and sandbags previously used by local communities, stabilizing 63.2% of the SL. The forecasts obtained through this study for the years 2034 and 2044 indicate shoreline retreat in areas still without protection, highlighting the urgent need for effective participatory planning. It is essential to align this planning with the Municipal Climate Change Adaptation Plan and the Integrated Coastal Management Plan (ICMP). Maintaining protection structures and conducting continuous monitoring is crucial to adapting coastal management strategies, protecting vulnerable communities and ecosystems.

Keywords: Coastal Dynamics; Coastal Monitoring; Climate Change; Urban Planning.

1. Introdução

As praias arenosas ocupam mais de um terço da costa global e têm grande valor socioeconômico associado ao lazer, turismo e diversos serviços ecossistêmicos. Elas também desempenham um papel crucial como barreiras naturais contra o avanço do mar. No entanto, estão sujeitas a mudanças constantes devido a fatores naturais e/ou humanos, e muitas já estão em estágios avançados de erosão costeira (Vousdoukas et al., 2020).

A erosão costeira está presente em diversas regiões litorâneas ao redor do planeta, não sendo algo restrito apenas ao Brasil, e mais especificamente ao estado do Ceará, no Nordeste do Brasil (NEB). Esse fato tem se intensificado cada vez mais em função da subida do nível do mar que é um efeito importante das mudanças climáticas globais. Além disso, há um crescente aumento do contingente populacional ao longo dos litorais, expondo pessoas e suas propriedades a inundações marinhas e a erosão costeira (Muehe, 2006; Luijendijk et al., 2018; Brasil, 2018; Vousdoukas et al., 2020; Paula et al., 2022; Pang et al., 2023; Vasconcelos et al., 2024).

A literatura mostra que a erosão costeira é inerente à dinâmica litorânea e está diretamente ligada ao equilíbrio do sistema praiado, tendo como principais mecanismos impulsionadores os fatores naturais de ordem global e/ou local. Alterações impulsionadas por questões naturais e/ou antrópicas que possam provocar uma diminuição e/ou

quebra do ciclo de abastecimento de sedimentos para as áreas litorâneas levam ao chamado balanço sedimentar negativo, levando ao recuo da Linha de Costa (LC) (Bird, 2008; Roebeling et al., 2011).

A interrupção desse ciclo pode ocorrer devido a diversos fatores, atuando em diferentes escalas. Os fatores naturais que agravam o processo erosivo incluem o aumento do nível do mar, que provoca a inundação de áreas costeiras e a perda de sedimentos, e as mudanças climáticas e oceânicas, que aumentam a intensidade e frequência de tempestades, agravando a erosão das dunas frontais (Dillenburg et al., 2004; Muehe, 2005; Morais et al., 2006; Nichols et al., 2007). Já os fatores antropogênicos incluem a ocupação desordenada e a fixação de edificações em áreas de dunas, além da construção de obras rígidas de contenção e recuperação costeira, que alteram o equilíbrio sedimentar natural (Souza e Suguio, 2003; Souza et al., 2005; Morais e Pinheiro, 2011; Paula, 2015; Kuriyama e Banno, 2016). Essas intervenções humanas muitas vezes exacerbam o processo de erosão e dificultam a regeneração natural das dunas e da linha de costa.

Le Cozannet et al. (2014) apontam que a elevação do nível do mar não tem sido o principal fator de recuo da linha de costa nas últimas décadas, ressaltando que a variabilidade local limita conclusões generalizadas sobre essa relação. Os autores recomendam a ampliação da base de dados, com a inclusão de observações de processos costeiros, e destacam a necessidade de definir claramente as suposições e limitações dos métodos utilizados. Embora as abordagens metodológicas atuais tenham limitações, elas oferecem um quadro inicial para detectar o impacto da elevação do nível do mar, sendo essencial expandir os dados e aprimorar as observações para um entendimento mais profundo.

Nesse mesmo sentido, Cooper et al. (2020) afirmam que as praias arenosas variam em forma e contexto, não apresentando uma resposta única à elevação do nível do mar. Elas podem migrar em direção ao continente sem perda de largura, podem sofrer recuo devido ao transporte de sedimentos em direção ao oceano e ou podem ficar estagnadas ao fundo marinho, dependendo de condições específicas. Além disso, podem progradar quando há suprimento de sedimentos favorável. O suprimento de sedimentos provenientes da erosão das dunas pode auxiliar na mitigação do recuo costeiro, uma vez que esses sedimentos são essenciais para o equilíbrio morfodinâmico das praias. As respostas da linha de costa, no entanto, são influenciadas por fatores locais, como a morfologia do terreno e a dinâmica costeira local. Os mesmos autores ressaltam a necessidade de aprimorar os métodos de coleta de dados e as abordagens para prever os impactos do aumento do nível do mar. Além disso, enfatizam que a maior ameaça à sobrevivência das praias é representada pelas estruturas de proteção costeira, especialmente as rígidas (e.g. espigões, enrocamentos e *bagwall*), que limitam a capacidade natural de migração das praias, comprometendo sua adaptação a mudanças ambientais e exacerbando o processo erosivo a longo prazo.

Paula (2012; 2015) e Lacerda Barros (2018; 2021) apontam que a erosão costeira se torna um problema quando passa a influenciar diretamente a vida cotidiana da população que reside próximo ao litoral, ocasionando danos às estruturas construídas nessas áreas e gerando prejuízos econômicos para o município e seus habitantes locais. Esse cenário é frequentemente abordado nos noticiários locais, regionais e nacionais.

Luijendijk et al. (2018) usando imagens de satélite (entre os anos de 1984 e 2016) e classificação supervisionada por pixels, verificaram que 31% das LC sem gelo do mundo são arenosas, além disso, a análise desses dados indicou que 24% das praias arenosas do mundo estão sofrendo erosão a taxas acima de 0,5 m/ano, enquanto 28% estão acumulando sedimentos e 48% permanecem estáveis. A erosão é predominante em muitas LC arenosas em áreas marinhas protegidas, gerando preocupações significativas.

Boak e Turner (2005) identificaram três tipos principais de indicadores de LC. O primeiro tipo é baseado no alinhamento de estruturas feitas pelo homem, como a borda de uma estrutura de revestimento. O segundo tipo é baseado em uma característica morfológica, como uma escarpa de erosão. O terceiro tipo envolve características visivelmente discerníveis, incluindo aquelas baseadas na posição de uma linha de água selecionada, como o nível de água alta da maré alta anterior.

A LC é um sistema dinâmico que responde rapidamente às mudanças naturais e/ou antrópicas, sendo essencial para analisar a situação das praias, especialmente as afetadas pela erosão costeira (Lima, 2021). Sua variação espacial deve ser monitorada por mapeamento em diferentes períodos, usando coleta de dados em campo ou imageamento por satélite (Liu et al., 2013; Diniz et al., 2020).

A LC varia conforme os critérios de delimitação, como geomorfológicos, oceanográficos e antrópicos. Muehe e Klumb-Oliveira (2014) definem a linha de costa como a interseção entre o nível do mar e a terra firme, levando em consideração as marés de sizígia. Já Mazzer e Dillenburg (2009) a caracterizam como um elemento

geomorfológico altamente dinâmico, influenciado por processos costeiros de diferentes frequências e magnitudes, que incluem desde a variação das marés até eventos meteorológicos e climáticos de maior impacto.

Dentre os tipos de indicadores, os mais utilizados são aqueles baseados na posição do nível de água da maré alta ou na Linha de Preamar Máxima (LPM), que se enquadram no terceiro tipo conforme mencionado anteriormente. Esse indicador é amplamente adotado para caracterizar a posição da LC em áreas costeiras arenosas. Ele consiste na observação da "linha" que marca o limite atingido durante a preamar de sizígia, caracterizando-se por uma mudança nítida de tonalidade nas areias da praia (Crowell; Leatherman; Buckley, 1991). Portanto, devido ao grande dinamismo da LC, sua definição deve considerar uma perspectiva temporal e espacial. A atuação de diferentes forçantes (antrópicas e naturais) torna sua delimitação complexa, pois sua posição muda constantemente devido a esses fatores (Boak; Turner, 2005).

O litoral do estado do Ceará enfrenta um colapso devido à ação de diversos impactos, tanto de origem natural quanto antrópica (Morais et al., 2006; Paula, 2012, 2015; Morais et al., 2018). O impacto mais relevante e que demanda maior atenção é a erosão costeira, cujos processos já afetam os 20 municípios situados ao longo da linha de costa cearense. De acordo com Morais et al. (2018), dos 573 km de extensão do litoral, 30% já estão em estado de erosão, enquanto outros 17% apresentam tendências erosivas, o que reforça a necessidade de medidas urgentes de gestão e mitigação. Se somarmos esses valores, obtemos um percentual de 47%, o que revela um cenário preocupante em relação à dinâmica do nosso litoral. Com o agravamento das mudanças climáticas previsto para a próxima década, a situação se torna ainda mais alarmante, ameaçando não apenas os ecossistemas, mas também a saúde humana e atividades econômicas cruciais, como turismo, urbanização, aquicultura e pesca. É fundamental reconhecer a gravidade desse problema em curso e agir de forma proativa para mitigar seus impactos.

Tal fato passou a ser motivo de preocupação no município de Icapuí (Ceará) por volta do início dos anos 2000, quando as primeiras notícias de erosão no município começaram a ser veiculadas com mais frequência nos meios de comunicação estaduais. Neste período, foram relatados uma série de danos às edificações construídas muito próximas da LC devido à ação direta da maré sobre elas (Lacerda Barros, 2018; Chacanza et al., 2022; Leite; Almeida, 2023). Além disso, essa situação muitas vezes demanda a implementação de estruturas de proteção e/ou recuperação costeira, que podem ser alvo de controvérsias devido aos seus objetivos, técnicas empregadas e falhas no planejamento, na gestão e no monitoramento dessas estruturas (Williams et al., 2018; Lacerda Barros et al., 2021).

O histórico de aceleração do recuo da linha de costa em trechos do litoral de Icapuí, aliado à implementação de alternativas de contenção frequentemente ineficazes, destaca a necessidade de uma análise aprofundada da dinâmica costeira local. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo compreender a variação da linha de costa nas praias de Barreiras de Baixo, Barreiras de Cima e Barrinha, no município de Icapuí, localizado no Nordeste do Brasil (NEB). A pesquisa visa fornecer subsídios para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação da erosão costeira. Para isso, utilizamos dados geodésicos e orbitais abrangendo o período de 2002 a 2024, além de analisar as projeções da linha de costa para os anos de 2034 e 2044.

1.1. Área de Estudo

A área em questão está no município de Icapuí, no litoral setentrional do Nordeste do Brasil (NEB), no Setor 1 - Litoral Leste, de acordo com o Gerenciamento Costeiro do Estado do Ceará (GERCO-CE). Faz divisa com o estado do Rio Grande do Norte a leste e com o município de Aracati a oeste e sul. Possui aproximadamente 46 km de costa e 14 praias distribuídas entre três distritos: Icapuí (Sede), Ibicuitaba e Manibu (Meireles et al., 2016) (Figura 1).

A área de estudo está localizada na porção emersa da Bacia Potiguar, onde afloram diversas formações geológicas associadas à fase drift de evolução dessa bacia. Entre as principais formações geológicas da região, destacam-se a Formação Jandaíra, de idade cretácea, composta predominantemente por calcário; a Formação Barreiras, do Mioceno, constituída por conglomerados e arenitos; e a Formação Potengi, do Quaternário, caracterizada por arenitos eólicos (Ximenes Neto et al. 2024a). Essas formações têm papel fundamental na sustentação das falésias e paleofalésias que se estendem ao longo da costa, proporcionando importantes feições geomorfológicas.

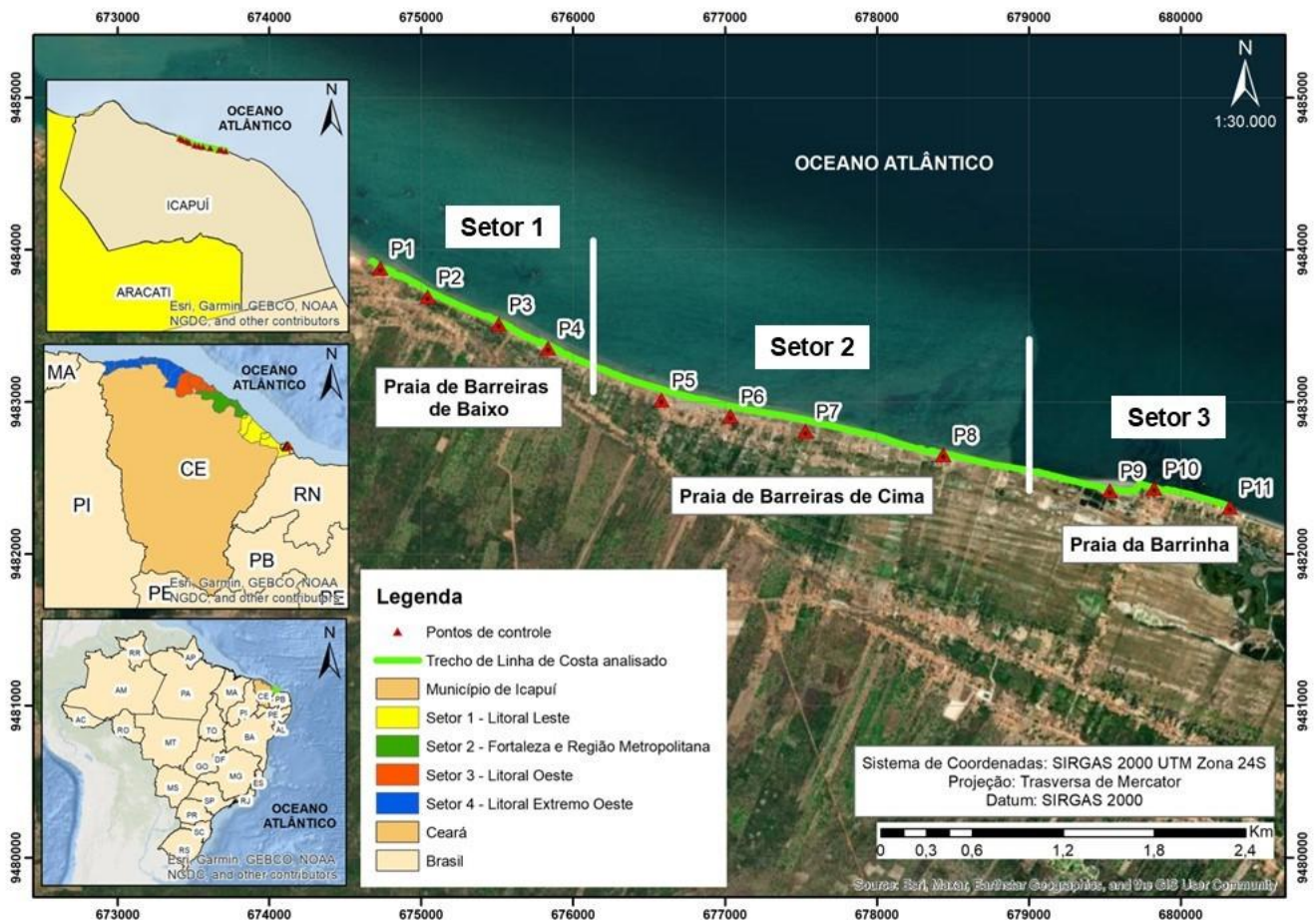


Figura 1. Localização do município de Icapuí e do trecho analisado.

Além dessas unidades mais antigas, a área de estudo inclui também ambientes de origem mais recente, formados ao longo do Holoceno. Esses ambientes holocênicos desempenham um papel crucial na configuração atual da paisagem, sendo resultado de processos sedimentares e geomorfológicos que ocorreram durante esse período.

Especificamente, a área de estudo está associada a um terraço marinho de origem holocênica, formado durante o Holoceno Tardio, nos últimos 1.200 anos AP (Ximenes Neto et al., 2024b). Este terraço marinho se localiza entre as paleofalésias e a linha de costa moderna, desempenhando um papel significativo na dinâmica atual da zona costeira. A presença desse terraço contribui para a compreensão dos processos de erosão e sedimentação que moldam a região, fornecendo importantes insights para a gestão e conservação costeira.

A Planície Litorânea de Icapuí é caracterizada por feições geomorfológicas resultantes de variações do nível do mar ocorridas durante o Quaternário. Os terraços marinhos holocênicos, dunas, falésias e paleofalésias, praias, lagoas e lagoas costeiras tiveram sua origem e evolução através de eventos globais relacionados aos processos de regressão e transgressão marinha do fim do quaternário (Meiros et al., 1991; Meiores, 2011; Ceará, 2016; Ximenes Neto et al., 2024b). Alguns trechos recebem diretamente sedimentos de dunas costeiras e movimentos de massa, tornando as falésias e dunas fontes cruciais de sedimentos para a dinâmica costeira (Morais et al., 2006; Pinheiro et al., 2016; Lacerda Barros et al., 2024).

O clima no NEB é fortemente influenciado pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), onde os ventos alísios de nordeste e sudeste se encontram. As chuvas são sazonais, ocorrendo principalmente de fevereiro a maio, seguidas por um período de seca no restante do ano, com variações possíveis devido ao El Niño Oscilação Sul (ENOS) (Marengo et al., 2017). A drenagem superficial intermitente, combinada com o clima semiárido, contribui para a baixa quantidade de sedimentos para o sistema praial e plataforma continental do Ceará (Morais; Pinheiro,

2011). O posto climático de Icapuí registrou uma média histórica de precipitação para o período entre 1988 e 2023 de 714 mm, de acordo com a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

As marés na costa cearense são semidiurnas, caracterizadas como ambientes de mesomaré, com amplitudes de 3,2 m (Morais, 1981; Maia, 1998; Pinheiro et al., 2016). Em Icapuí, segundo a Tábua de Marés do Porto de Areia Branca, porto este localizado no estado do Rio Grande do Norte e o mais próximo da área aqui analisada, as amplitudes podem chegar a 3,8 m.

As alturas das ondas na área, de acordo com o modelo *Wavewatch III*, atingem o máximo entre dezembro e março, alcançando até 2,2 m (Lacerda Barros, 2018), com o pico registrado em fevereiro de 2016 (Lacerda Barros, 2018). Nos outros meses, variam de 0,8 m a 1.5 m, com períodos entre 4,1 s e 9,9 s. As ondas Swell têm períodos entre 10 s e 11,5 s. No Ceará, predominam as ondas do tipo Sea, com 72% das ocorrências, enquanto as do tipo Swell representam 28% (Carvalho et al., 2007). A deriva litorânea obedece, preferencialmente, o sentido leste-oeste, isto é, os sedimentos são transportados na direção do município vizinho de Aracati.

2. Materiais e Métodos

A metodologia de identificação e análise da LC no trecho monitorado, em Icapuí, ocorreu em quatro etapas: i) Avaliação e setorização da área de estudo *in situ*; ii) Obtenção da LC por meio do uso de imagens orbitais; iii) Obtenção da LC por meio de levantamento geodésico; e iv) Análise das variações no posicionamento da LC (Figura 2).

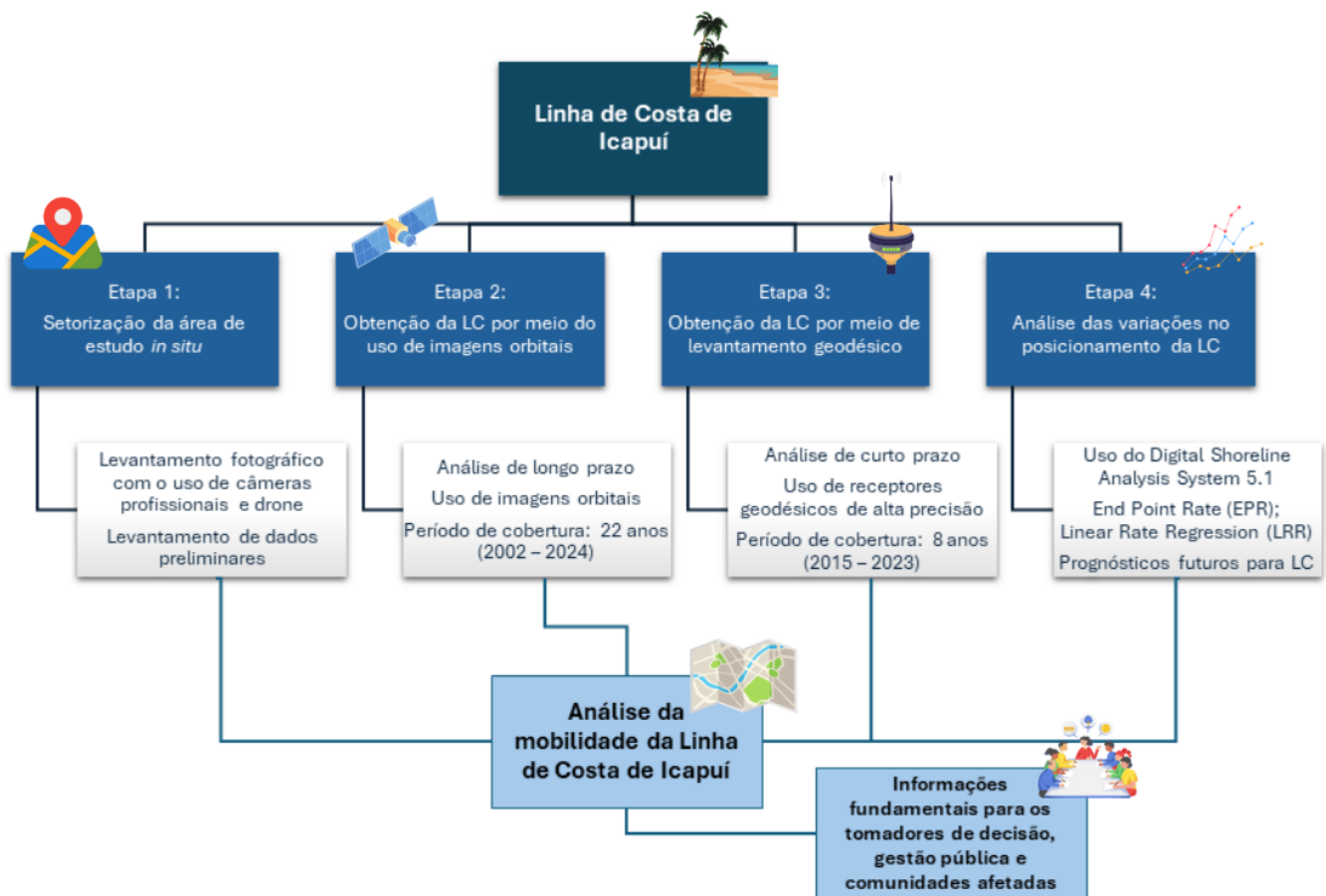


Figura 2. Fluxograma metodológico utilizado na pesquisa.

A primeira etapa consistiu na análise *in situ* da área a ser monitorada. Foram realizadas observações diretas no local para avaliar as condições atuais da LC, identificar características geográficas relevantes e coletar dados preliminares para subsidiar as análises posteriores. Nesta etapa, as três praias analisadas (Barreiras de Baixo, Barreiras de Cima e Barrinha), com uma extensão de 6 km, foram divididas em 3 setores: Setor 1: Praia de Barreiras de Baixo, com erosão costeira intensa, danos ao patrimônio edificado e medidas de contenção da erosão, como

sacos de areia, madeira e enrocamento. Setor 2: Praia de Barreiras de Cima, caracterizado pela presença de Dunas Frontais, ocupação mais distante da LC e enrocamento. Setor 3: Praia da Barrinha, similar ao Setor 1, com parte da erosão e recuo da LC induzida por estruturas instaladas no local.

A segunda etapa envolveu o uso de imagens orbitais dos satélites Quickbird, fornecidas pela Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Estado do Ceará (SEMACE); do satélite RapidEye, disponibilizadas pelo GeoCatálogo do Ministério do Meio Ambiente (MMA); e do satélite Sentinel-2, acessadas através da ferramenta *Copernicus*, desenvolvida pela Agência Espacial Europeia (ESA). Para a análise de longo prazo, foram utilizadas 10 imagens de satélite, cobrindo um período de 22 anos (2002 a 2024). Nesse processo, foram consideradas a disponibilidade de imagens, a cobertura de nuvens e os períodos de chuva e estiagem na região, visando uma análise mais precisa da sazonalidade local. Ao abranger um período significativo, é possível capturar eventos e processos que podem não ser evidentes em análises de curto prazo, permitindo uma compreensão mais completa e precisa da dinâmica ambiental do trecho costeiro em análise (Quadro 1). As imagens foram georreferenciadas para o sistema de referência SIRGAS 2000 Zona 24S, selecionadas com base no critério de obter a melhor resolução possível e mínima cobertura de nuvens, utilizando receptores geodésicos e pontos 11 pontos físicos ao longo da área de estudo.

A análise da LC foi realizada utilizando as imagens disponíveis para cada ano, em vez de mosaicos anuais, o que garantiu maior consistência temporal nas comparações entre os períodos observados. Essa abordagem foi viabilizada pela escala de análise adotada, que permitiu que a área monitorada fosse completamente incluída em cada imagem selecionada. No entanto, reconhecemos que a variação na resolução espacial dos diferentes sensores utilizados pode influenciar os resultados, especialmente na precisão das delimitações da linha de costa. Para mitigar possíveis distorções, padronizamos o processo de análise e os indicadores utilizados, buscando garantir coerência nas comparações. Assim, a variação na resolução espacial foi considerada uma limitação do estudo.

Quadro 1. Detalhamento das Imagens Utilizadas no estudo.

Sensores	Resolução espacial	Mês/Ano da imagem	Fonte da imagem
Quickbird	0,6 m	Dez/2002	Superintendência Estadual do Meio Ambiente - SEMACE
Quickbird	0,6 m	Abr/2009	Superintendência Estadual do Meio Ambiente - SEMACE
RapidEye	5,0 m	Abr/2012	Catálogo de Imagens /Ministério do Meio Ambiente - MMA
RapidEye	5,0 m	Jul/2013	Catálogo de Imagens /Ministério do Meio Ambiente - MMA
RapidEye	5,0 m	Mar/2014	Catálogo de Imagens /Ministério do Meio Ambiente - MMA
RapidEye	5,0 m	Jun/2015	Catálogo de Imagens /Ministério do Meio Ambiente - MMA
Sentinel 2	10 m	Mai/2018	European Space Agency - ESA
Sentinel 2	10 m	Out/2019	European Space Agency - ESA
Sentinel 2	10 m	Abr/2020	European Space Agency - ESA
Sentinel 2	10 m	Mai/2024	European Space Agency - ESA

A terceira etapa, referente à análise de curto prazo, consistiu na obtenção da LC por meio de receptores geodésicos configurados para a coleta de dados com alta precisão em sete ocasiões, distribuídas entre o período chuvoso (primeiro semestre) e o período de estiagem (segundo semestre) na região, permitindo uma análise sazonal, ressalta-se ainda que todas as atividades de campo foram realizadas em baixamar de sizígia (Figura 3). As seis primeiras coletas ocorreram entre outubro de 2015 e novembro de 2016, utilizando um receptor GTR-G2 L1/L2 DGPS (*Differential Global Positioning System*) da TechGEO. Posteriormente, foi realizada uma campanha de atualização das informações em outubro de 2023, utilizando um receptor RTK (*Real Time Kinematic*) da South

Kolida K20S. Para ambos os equipamentos, foi adotado o sistema de coordenadas UTM, Datum Sirgas 2000 Zona 24S (EPSG 31984).

O processamento dos dados obtidos pelo receptor DGPS foi realizado com o software Novatel CDU e processado por meio do GTR Processor da TechGEO. No programa, os arquivos da base (fixo-arquivo.pdc) e do rover (móvel-arquivo.gps) foram importados para a conversão da altura elipsoidal em ortométrica e a correção da inclinação de 15°, conforme especificações do software. As coordenadas obtidas pelo receptor RTK foram enviadas para a plataforma do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o pós-processamento dos dados GNSS, utilizando a técnica de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP).



Figura 3. Etapa de campo do monitoramento da linha de costa em Icapuí por meio do uso de um receptor Geodésico.

O Quadro 2 detalha a área monitorada e os geoindicadores utilizados tanto nas medições de campo quanto na análise de imagens. A etapa de campo é fundamental para a análise da Linha de Costa (LC), pois fornece dados de localização precisos que servem como referência nas análises realizadas em um Sistema de Informações Geográficas (SIG). A metodologia empregada para a detecção da LC foi baseada nas propostas de Leatherman (2003), Boak e Turner (2005), Baptista et al. (2011), Mendonça et al. (2014) e Muehe e Klumb-Oliveira (2014). Considerou-se como LC o alcance máximo da maré de sizígia, complementado por outros geoindicadores identificados durante a etapa de campo.

Quadro 2. Quadro situacional da área monitorada.

Praias Analisadas	Município	Setor da costa (GERCO-CE)	Extensão da Linha de Costa e linha de costa analisada	Direção da Linha de Costa	Tipo de exposição da Linha de Costa	Geoindicadores	
						(Curto Prazo / 2015 - 2023) Atividades de Campo	(Longo Prazo / 2002 - 2024) Imagens orbitais
Barreiras de Baixo	Icapuí	Setor 1 – Litoral Leste	46 km 6,039 km (13,1 %)	L - O	Exposta	Base de duna frontal, alcance máximo do espraio e limite de planície de inundação, ocupação e obras de contenção da erosão	Alcance máximo do espraio e frente marítima urbanizada
Barreiras de Cima							
Barrinha							

A quarta e última etapa consistiu na análise das variações no posicionamento da linha de costa, tanto para curto prazo (dados de campo) quanto para longo prazo (dados orbitais), permitindo a obtenção das taxas de erosão e/ou progradação do trecho em análise (Figura 4). Foram utilizadas 17 linhas de costa, delimitadas manualmente, tanto em campo, com receptores geodésicos, quanto em ambiente SIG, onde as linhas foram vetorizadas manualmente seguindo os indicadores de linha de costa conforme a literatura. O intervalo temporal máximo considerado foi de 22 anos (Figura 4). As taxas foram calculadas utilizando o *software* ArcGIS, por meio de sua extensão *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS), na versão 5.1. Essa versão também permite realizar previsões sobre o comportamento da linha de costa para os próximos 10 anos (2034) e 20 anos (2044), utilizando a base estatística incorporada no *software*.

A metodologia aplicada é amplamente utilizada na literatura, conforme citado por Morton et al. (2005), Albuquerque et al. (2013), em ambientes de micromaré, Rangel-Buitrago et al. (2015), Lima et al. (2019), Moreira et al. (2020), Quang et al. (2021), Baía et al. (2021), em ambientes de macromaré, Vasconcelos et al. (2021), Khakhim et al. (2024), Nascimento; Andrade (2024), em ambientes de mesomaré, e Machado et al. (2024). Esses prognósticos são orientados pelas tendências observadas conforme os métodos estatísticos aplicados. É importante destacar que o *software* não considera a presença de estruturas de contenção; ele utiliza apenas as informações disponíveis na base de dados utilizada. Dessa forma, foi crucial realizar uma análise mais detalhada sobre o comportamento e prognósticos das linhas costeiras futuras nas áreas em questão.

Para a análise de curto prazo, foi adotada uma distância de 10 metros, esse espaçamento mais curto permite uma resolução mais detalhada dos dados, essencial para capturar variações rápidas e pequenas alterações que podem ocorrer em intervalos de tempo menores. Assim, o programa estabeleceu um total de 586 transectos. Já para a análise de longo prazo, optou-se pelo espaçamento de 20 metros, totalizando 293 transectos ao longo dos 6 quilômetros da LC analisada. Esse espaçamento maior é justificado pela necessidade de uma visão mais abrangente e menos detalhada, adequada para identificar tendências e padrões de mudanças que ocorrem ao longo de períodos mais extensos. A menor quantidade de transectos é suficiente para capturar variações significativas e de maior escala, proporcionando uma análise eficiente sem comprometer a representatividade dos dados.

As estatísticas utilizadas para quantificar as taxas foram baseadas na Taxa de Ponto Final (EPR - *End Point Rate*), que considera as extremidades do intervalo analisado, e na Taxa de Regressão Linear (LRR - *Linear Regression Rate*), que utiliza todas as LC inseridas no ambiente SIG. A metodologia empregada apresenta uma limitação relacionada à diferença na frequência de amostragem, o que pode impactar a consistência da análise de curto prazo. Embora o método do *End Point Rate* (EPR) seja adequado para intervalos curtos, o uso da Regressão Linear (LRR) pode ter a sua confiabilidade diminuída em cenários com dados temporais irregulares. Assim, é necessário destacar que, em tais condições, a LRR pode não refletir de forma precisa as tendências temporais de longo prazo.

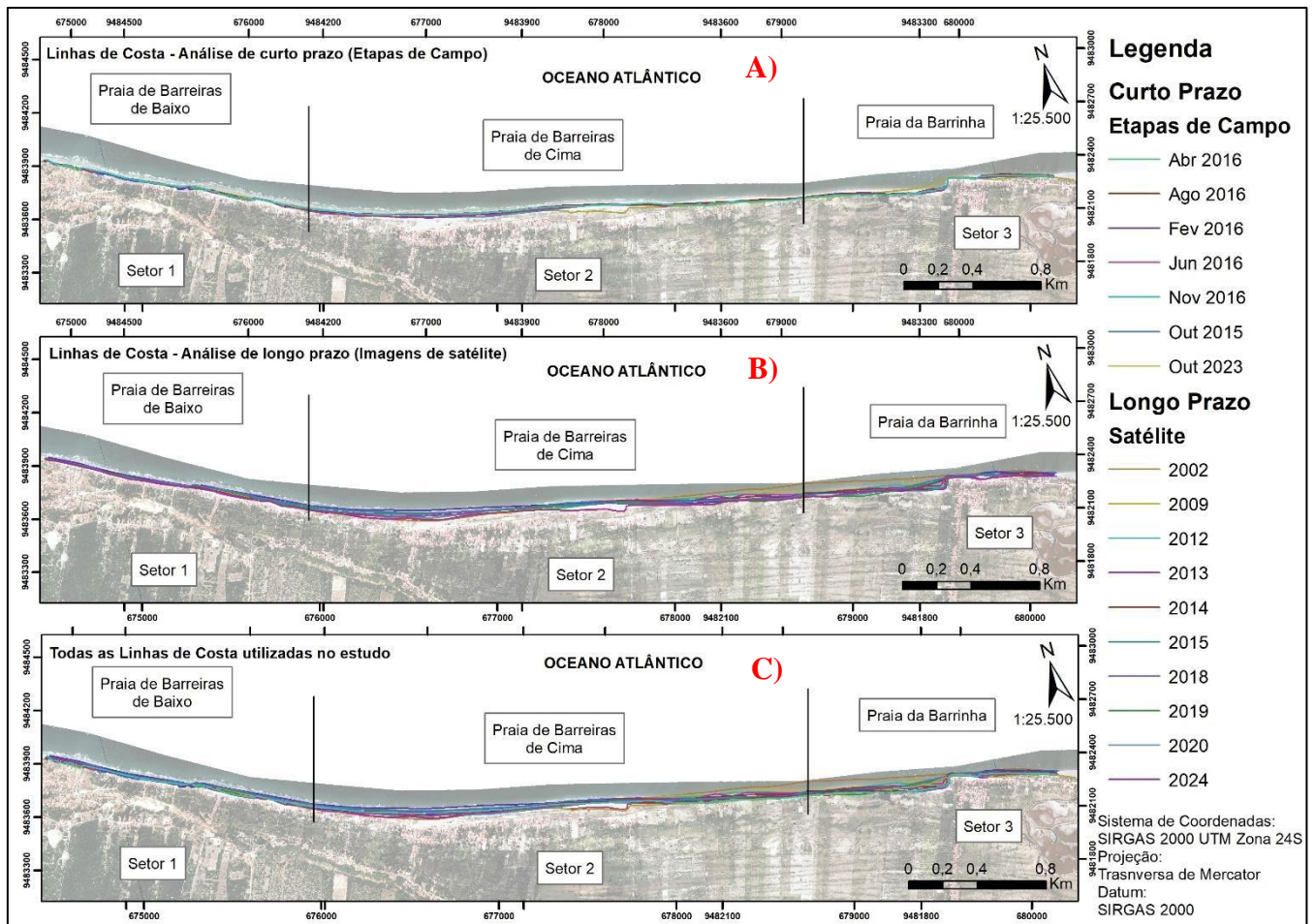


Figura 4. Linha de Costa dos setores monitorados. A) Análise de curto prazo por meio das etapas de campo; B) Análise de longo prazo por meio do uso de imagens de satélite; C) Todas as linhas de costa utilizadas no estudo.

3. Resultados

As taxas de erosão e progradação em curto prazo apresentaram uma média de EPR de 0,0 m/ano. No entanto, ao analisarmos os valores extremos, constatamos que durante o período analisado houve uma progradação máxima de 7,1 m/ano (totalizando 56,8 m), e uma erosão máxima de 6,4 m/ano (totalizando 51,2 m) (Figura 5 A). Para a mesma situação, ao utilizar o LRR, foi observada uma média de -0,2 m/ano. Identificaram-se trechos com progradação máxima de 7 m/ano (totalizando 56 m) e outros com erosão máxima de 6,7 m/ano (totalizando 53,6 m) (Figura 5B).

Para a análise de longo prazo (imagens de satélite) por meio do EPR, as taxas apresentaram um valor médio de -1,1 m/ano, com trechos de progradação máxima na ordem de 0,5 m/ano (totalizando 11 m) e taxas mínimas de erosão na ordem de 3,9 m/ano (totalizando 85,8 m) (Figura 6A). O LRR, para a mesma situação de análise, mostra uma média novamente negativa, com valor de -0,7 m/ano. Foram identificados trechos com erosão máxima de 3,6 m/ano (totalizando 79,2 m) e trechos com progradação máxima de 1,6 m/ano (totalizando 35,2 m) (Figura 6B).

As maiores taxas máximas de erosão e progradação, seja para análise de curto prazo, seja para análise de longo prazo, foram identificadas no setor 2, na praia de Barreiras de Cima (erosão máxima) e no setor 3, na praia da Barrinha (progradação máxima).

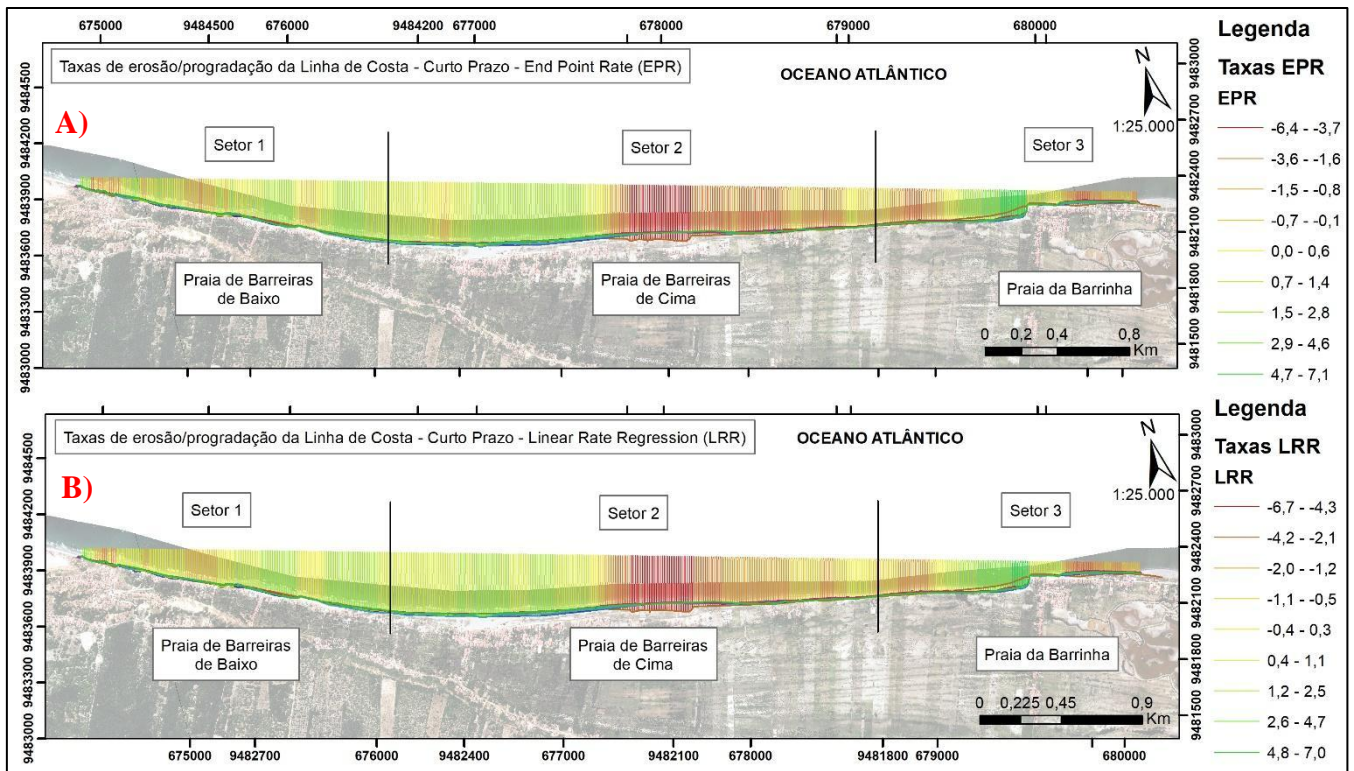


Figura 5. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Curto Prazo. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

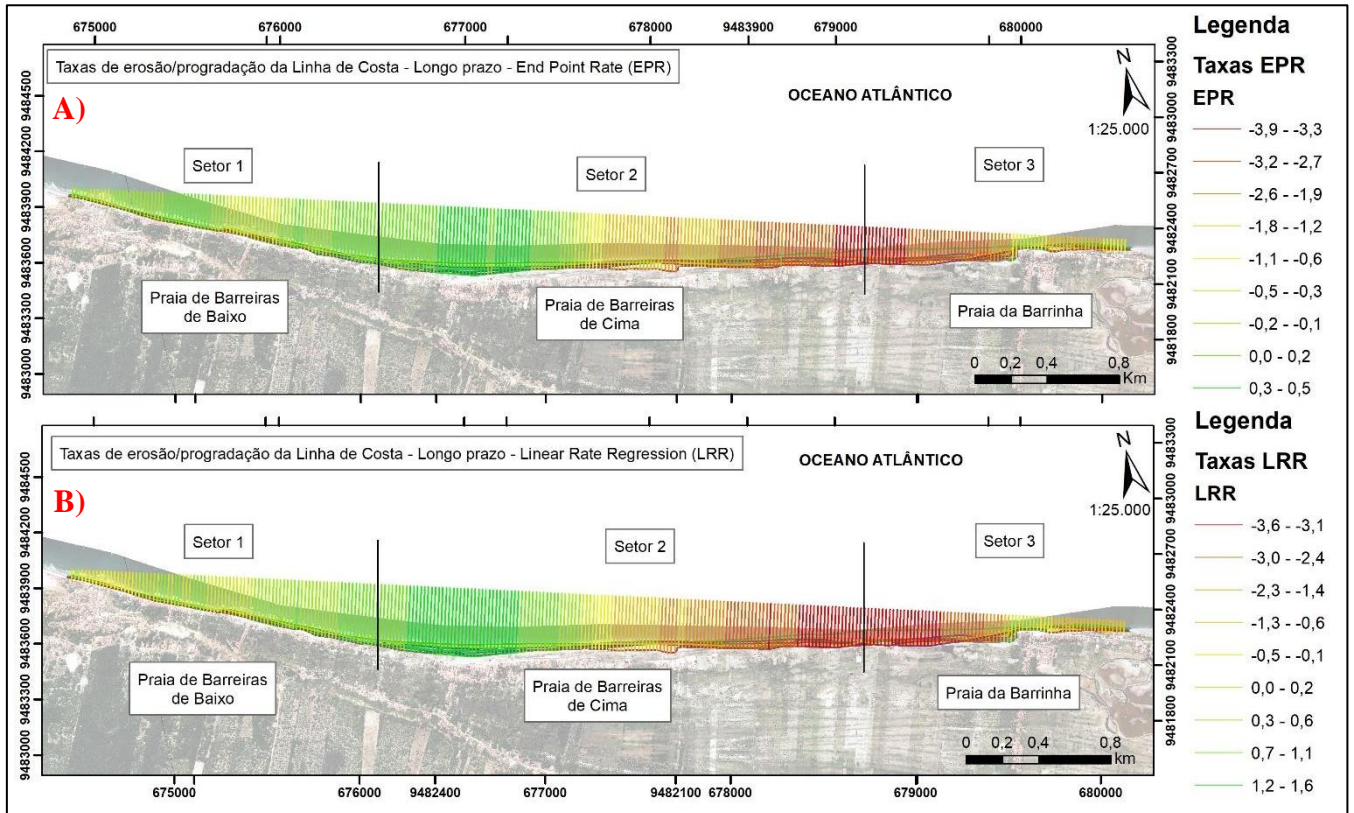


Figura 6. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Longo Prazo. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

3.1. Setor 1 – Praia de Barreiras de Baixo

A análise das taxas de erosão e progradação em escala de curto prazo para o setor 1 apresenta uma média de 0,6 m/ano para EPR e de 0,3 m/ano para o LRR. A progradação máxima foi de 4,1 m/ano (32,8 m) e erosão máxima de 2,8 m/ano (22,4 m) ao utilizarmos o EPR como método estatístico (Figura 7A). Ao utilizarmos o LRR, identificou-se uma progradação máxima de 3,6 m/ano (28,8 m) e erosão máxima de 1,5 m/ano (12 m) (Figura 7B).

As taxas obtidas por meio da análise de longo prazo mostram uma média de -0,2 m/ano, de acordo com o EPR, e 0,3 m/ano para o LRR. A taxa de progradação máxima durante a análise do EPR foi de 0,2 m/ano (4,4 m), e a erosão máxima foi de 0,5 m/ano (11 m) (Figura 8A). Para o LRR, foi identificada uma taxa máxima de progradação na ordem de 0,9 m/ano (19,8 m), e a erosão máxima foi de 0,3 m/ano (6,6 m) (Figura 8B). De modo geral, tanto na análise de curto prazo quanto na de longo prazo, esse setor apresenta uma tendência maior para a estabilidade da LC e uma taxa de progradação relativamente baixa.

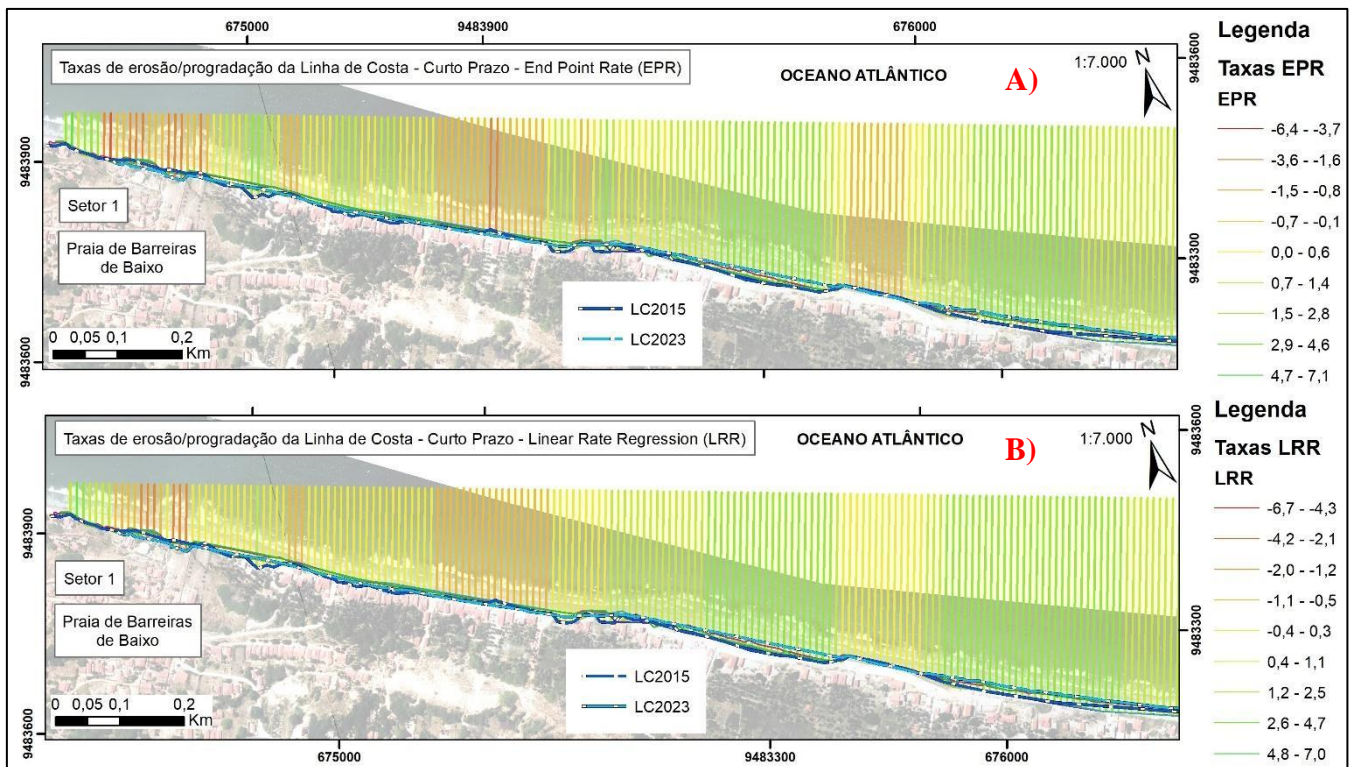


Figura 7. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Curto Prazo para o Setor 1. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

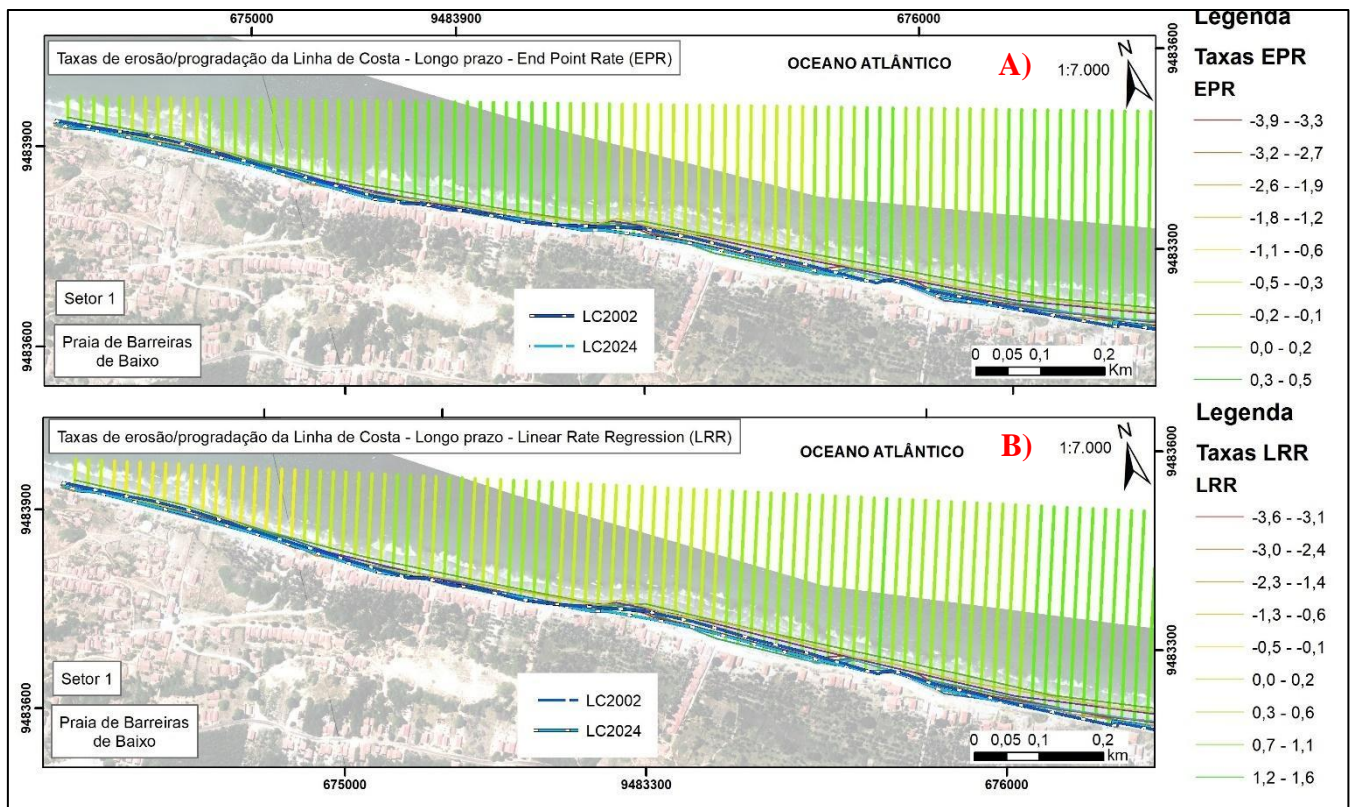


Figura 8. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Longo Prazo para o Setor 1. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

3.2. Setor 2 – Praia de Barreiras de Cima

A análise pormenorizada para o setor 2 mostra que, em termos de curto prazo, as taxas médias de erosão e progradação foram de -0,7 m/ano (EPR) e -0,9 (LRR) respectivamente. A análise do EPR apresentou uma progradação máxima de 2,5 m/ano (20 m) e erosão máxima de 6,4 m/ano (51,2) (Figura 9A), por outro lado a análise do LRR aponta uma progradação máxima de 1,7 m/ano (13,6 m) e erosão máxima de 6,7 m/ano (53,6 m) (Figura 9B).

Ao analisarmos as taxas em termos de longo prazo foi possível identificar valores médios na ordem de -1,2 m/ano (EPR) e -0,8 m/ano (LRR). A análise do EPR identificou progradação máxima de 0,5 m/ano (11 m) e erosão máxima de -3,7 m/ano (81,4 m) (Figura 10A). O LRR apresentou taxas de progradação máxima de 1,6 m/ano (35,2 m) e erosão máxima de 3,6 m/ano (79,2 m) (Figura 10B).

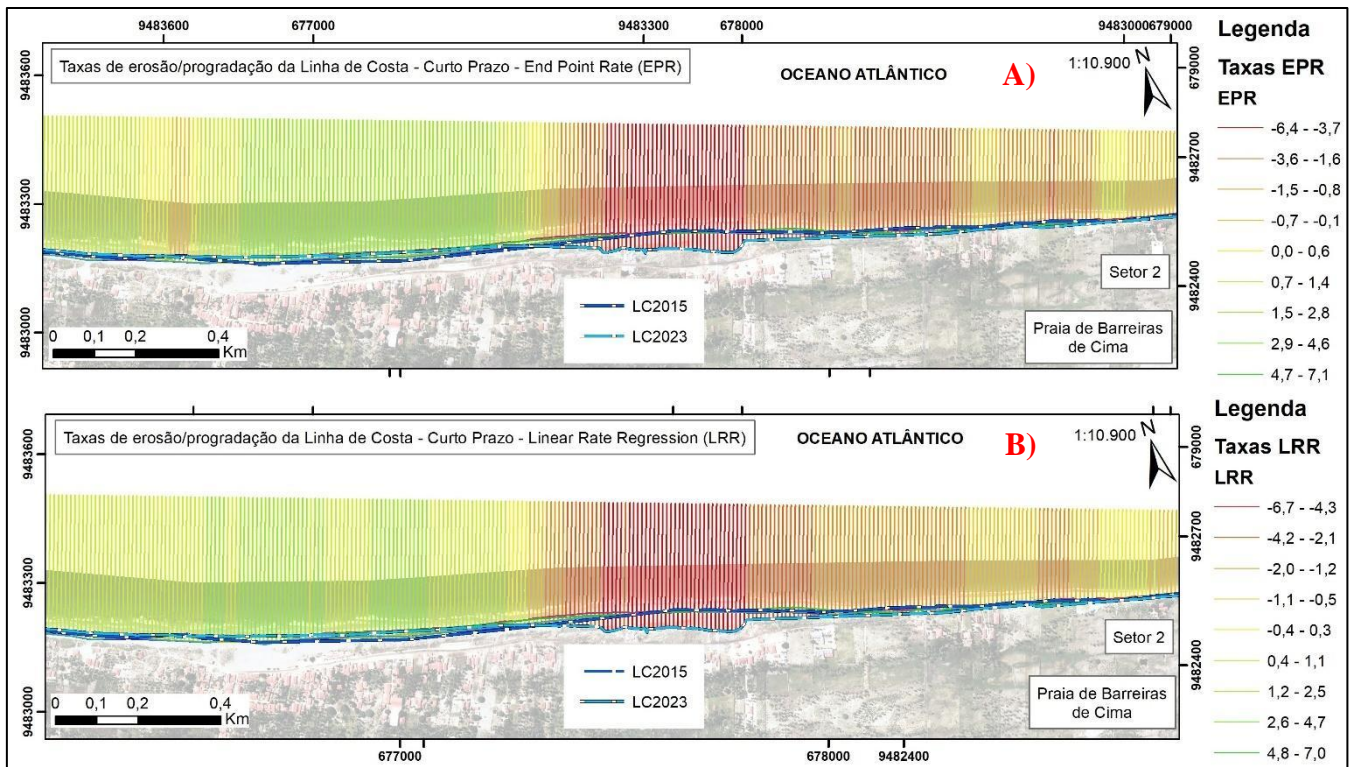


Figura 9. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Curto Prazo para o Setor 2. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

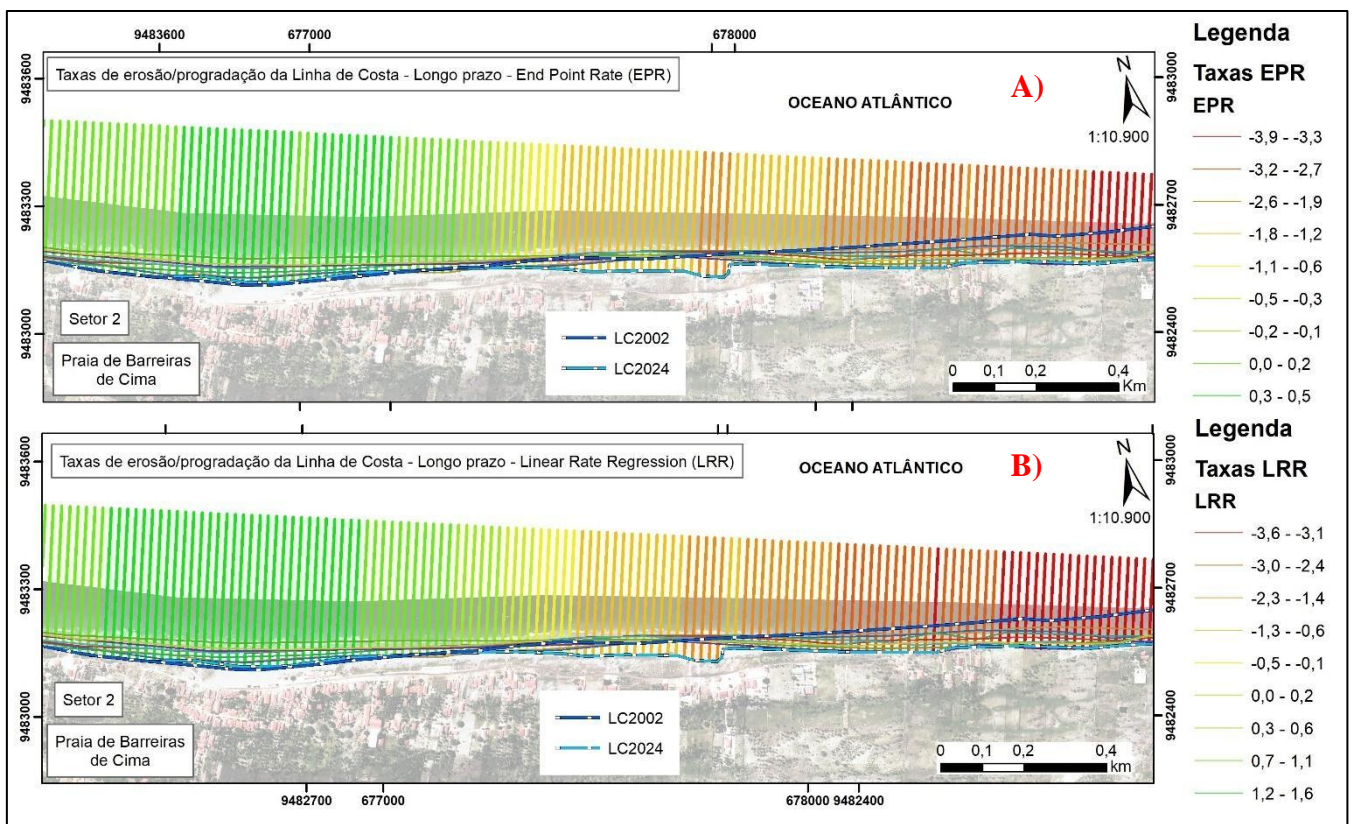


Figura 10. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Longo Prazo para o Setor 2. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

3.3. Setor 3 – Praia da Barrinha

O terceiro e último setor apresentou, durante a análise de curto prazo, taxas médias de 0,5 m/ano (EPR) e 0,4 m/ano (LRR). De acordo com o EPR, a taxa máxima de progradação foi 7,1 m/ano (56,8) e a taxa máxima de erosão foi 2,3 m/ano (18,4 m) (Figura 11A). Para o LRR foi observado uma progradação máxima de 7 m/ano (56m) e erosão máxima de 2,6 m/ano (20,8 m) (Figura 11B).

As taxas médias obtidas por meio da análise de longo prazo mostram para o EPR o valor de -2,1 m/ano e -1,9 m/ano para o LRR. Diferentemente das taxas apresentadas durante a análise dos outros setores, a análise de longo prazo para o EPR apresenta somente valores negativos, sendo eles um valor mínimo de erosão de 0,4 m/ano (8,8 m) e máximo de 3,9 m/ano (85,8 m) (Figura 12A). O LRR apresentou uma progradação máxima de 0,2 m/ano (4,4 m) e uma taxa máxima de erosão na ordem de 3,5 m/ano (77 m) (Figura 12B).

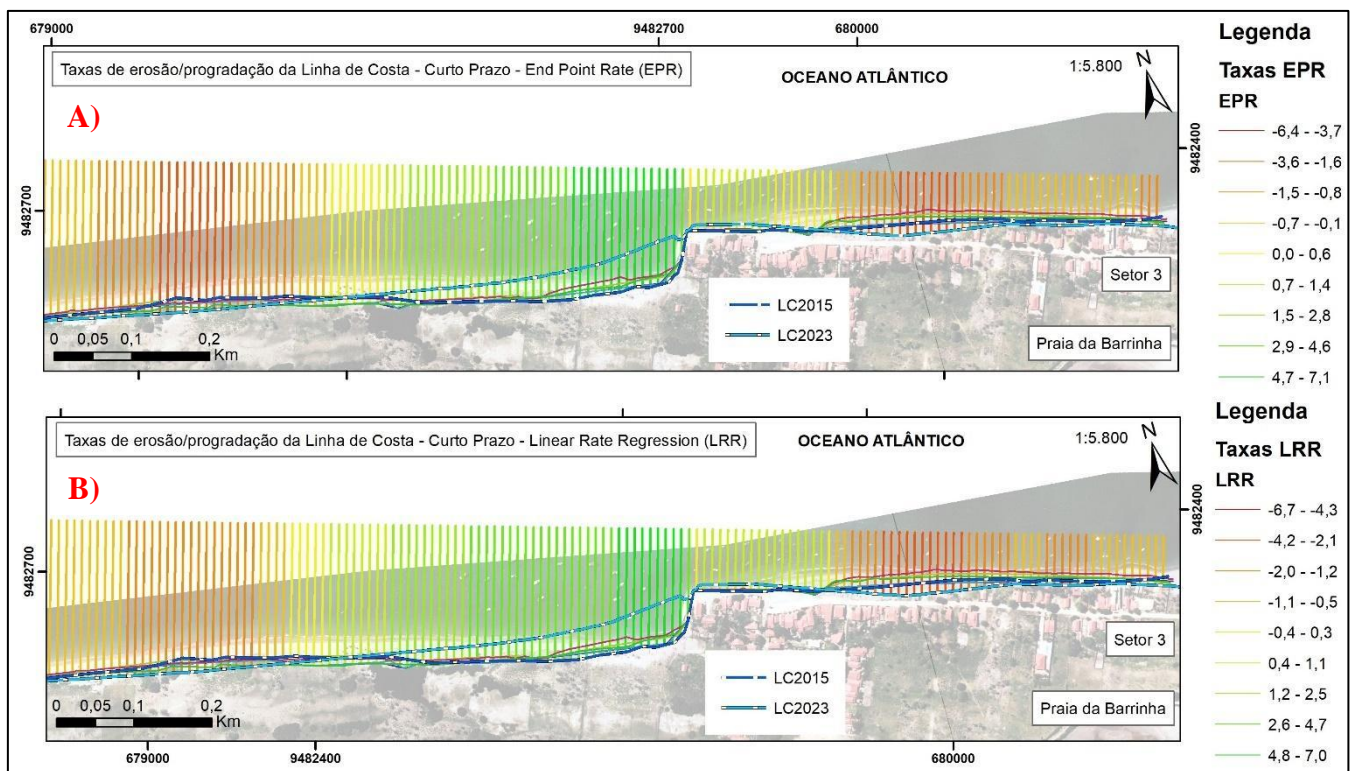


Figura 11. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Curto Prazo para o Setor 3. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

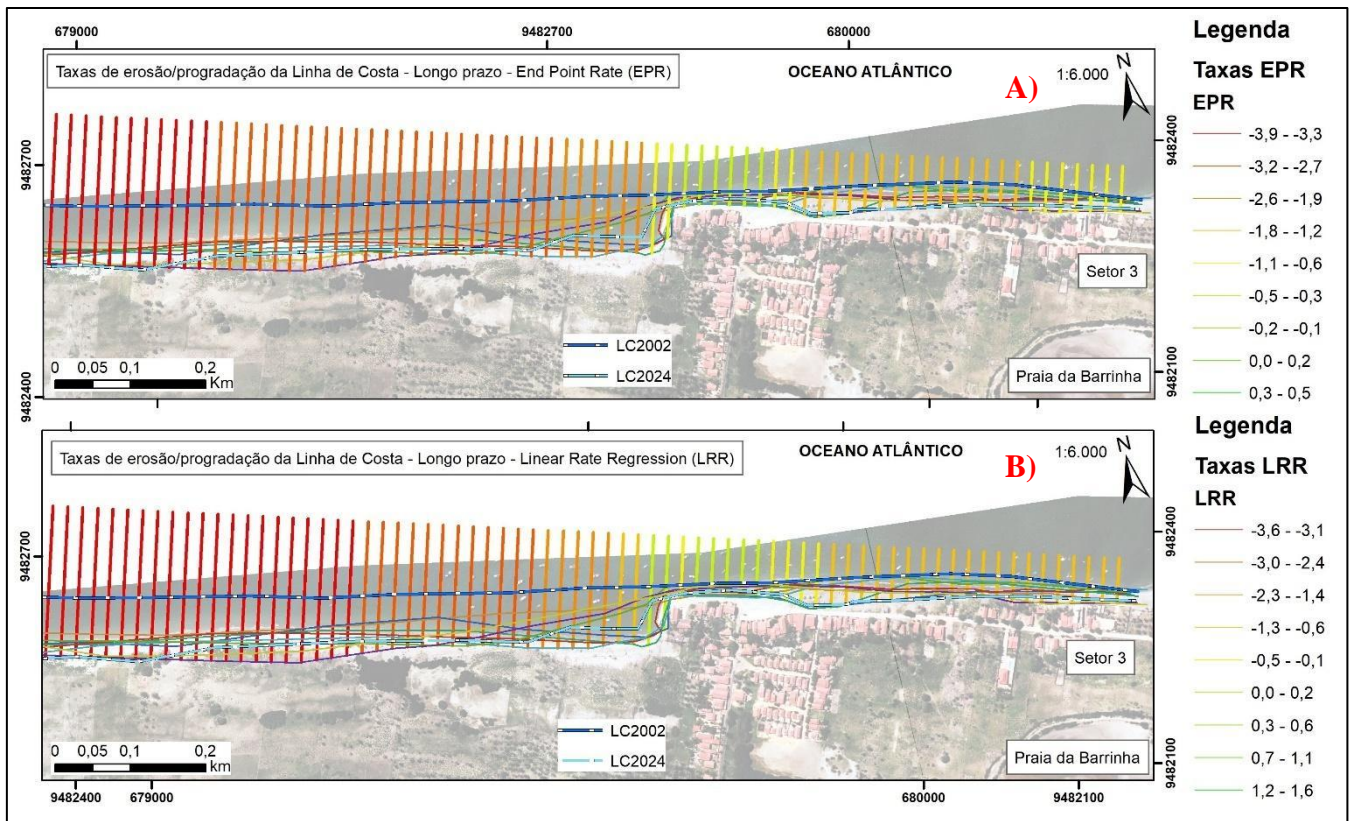


Figura 12. Taxas de erosão/progradação da Linha de Costa durante a análise de Longo Prazo para o Setor 3. A) End Point Rate (EPR); B) Linear Rate Regression (LRR).

3.4. *Perspectivas Futuras para Linha de Costa do trecho Monitorado em Icapuí*

As estruturas de proteção contra processos erosivos e recuo da linha de costa (LC) têm sido empregadas em Icapuí por meio de iniciativas particulares, como sacos de areia e estacas de madeira, e medidas governamentais, como enrocamentos. Essas informações são cruciais para o planejamento urbano costeiro, ajudando a identificar áreas adequadas para ocupação a longo prazo e aquelas que precisam ser preservadas devido aos riscos da erosão costeira e recuo da LC.

A figura 13 mostra a linha do tempo da construção de enrocamentos no trecho da LC analisado no município. Destaca-se a primeira estrutura instalada em 2009, no setor 1, e a estrutura em forma de "L" instalada no setor 3 em 2011. Esta última acabou intensificando o recuo da LC entre 2011 e 2019, mas a área começou a progredir novamente neste período.

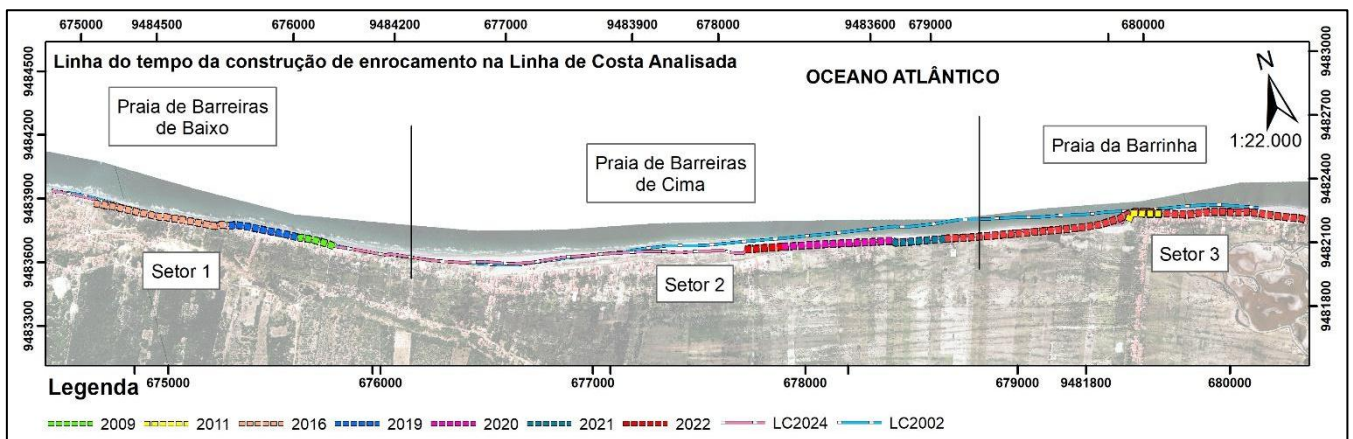


Figura 13. Linha do tempo da construção de enrocamentos na Linha de Costa analisada.

Este estudo revela que aproximadamente 63,2% ou 3,814 km da LC analisada estão estabilizados devido à presença de enrocamentos, principalmente nos setores 1 e 3. Quanto ao futuro desses trechos específicos, a LC permanecerá estável desde que sejam implementadas medidas de monitoramento e manutenção das estruturas, levando em consideração as tendências erosivas observadas nos resultados apresentados.

Em termo gerais, em uma escala de análise de curto prazo, foram identificados picos mais elevados tanto em termos de erosão quanto de progradação da LC. Observamos tendências progradacionais no setor 1, possivelmente devido à instalação das estruturas de contenção da erosão. Durante as atividades de campo para detecção da LC, a referência da LC mudou constantemente, alternando entre áreas com e sem proteção. Destaca-se que essas estruturas podem atuar como armadilhas de sedimentos, promovendo o acúmulo de material e impulsionando a progradação da LC, contanto que haja disponibilidade de sedimentos na área afetada (Figura 14 A e B).

Na região central do setor 2, observamos um aumento no recuo da LC devido à extremidade do enrocamento instalado ali. A análise para o ano de 2034 indica que a área pode recuar até 89 m em relação à posição da LC atual. O cenário previsto para o ano de 2044 indica que a LC pode recuar até 144 m neste trecho. Além disso, é possível notar uma leve tendência de progradação e estabilização da LC neste setor, especialmente no trecho mais a oeste, devido ao enrocamento. Por outro lado, há um leve recuo da LC na área mais a Leste, de até 47 metros, se considerarmos o período máximo de previsão, resultado das alterações antrópicas no setor 3.

Portanto, é um setor que requer atenção por parte do poder público, devido à possibilidade de um agravamento mais acentuado do recuo da LC, já evidente nesse trecho. O último setor demonstra tendências progradacionais significativas, conforme indicado pela LC prevista para o ano de 2034, com previsão de avanço em direção ao oceano até 89 metros, já para o ano de 2044 a área pode progradar em torno de 157 m em relação à posição da LC atual.

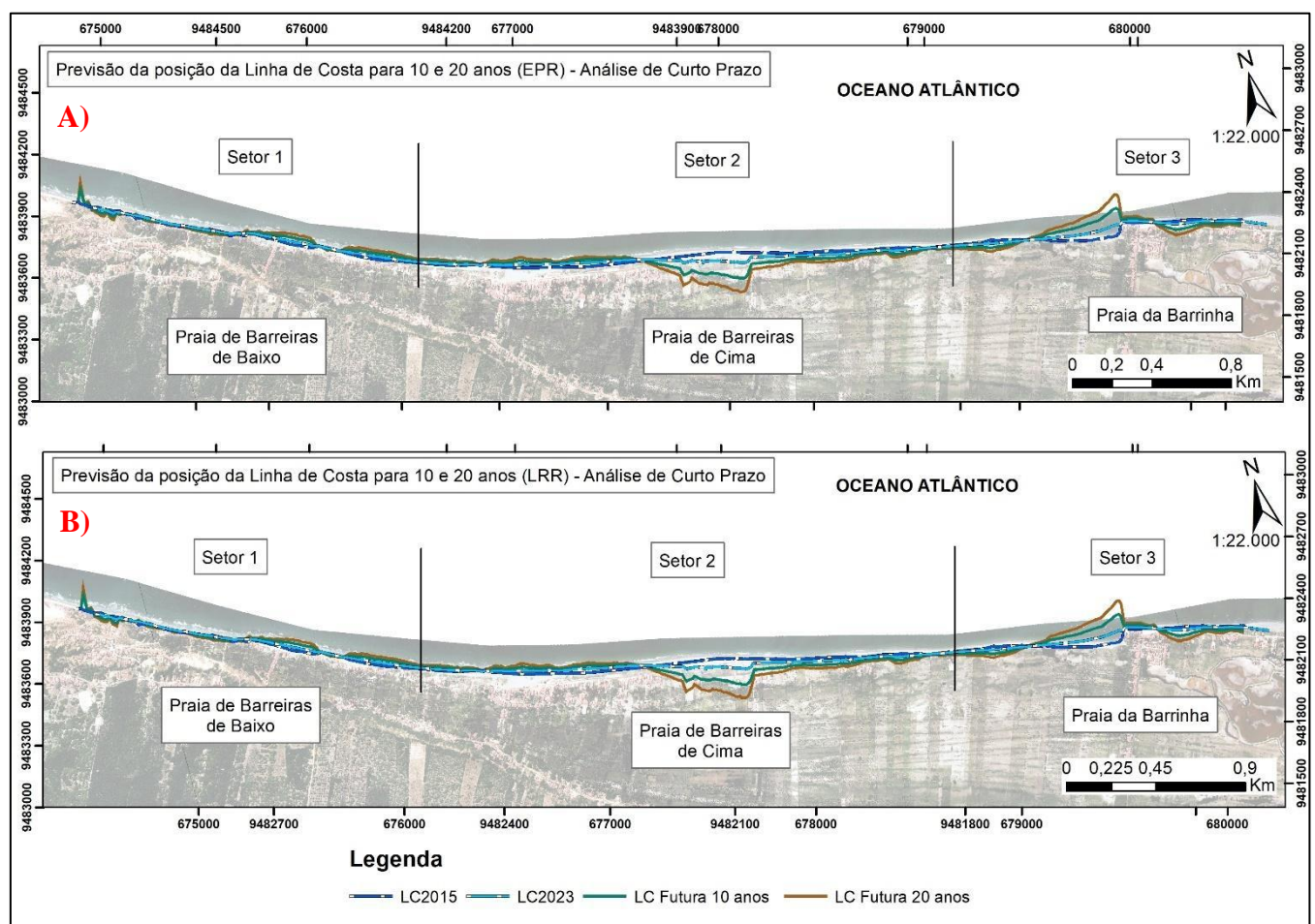


Figura 14. Previsão de curto prazo da posição da Linha de Costa para 10 e 20 anos para o trecho analisado. A) De acordo com as taxas obtidas por meio do EPR; B) De acordo com as taxas obtidas por meio do LRR.

A figura 15 A e B exibe os prognósticos futuros da LC para os anos de 2034 e 2044, com base nos dados da análise de longo prazo. Nessa escala de análise, observamos um ajustamento das linhas futuras, sem a presença de picos mais elevados em termos de erosão e progradação da LC. Isso provavelmente se deve à disponibilidade de uma abrangência temporal maior nos dados inseridos no software.

O setor 1 não deverá sofrer grandes alterações conforme os prognósticos para o comportamento da LC, tanto para 2034 quanto para 2044. Isso se deve à fixação proporcionada pelos enrocamentos construídos nos últimos anos na região, garantindo a proteção da infraestrutura urbana ali presente. No entanto, é crucial que essas estruturas de proteção costeira recebam constante manutenção e acompanhamento para manter essas tendências de estabilidade.

O setor 2 apresenta uma tendência de progradação, especialmente na porção mais a oeste, considerando o período máximo (2044), observa-se uma progradação aproximada de 90 m, tornando-se uma área importante do ponto de vista do planejamento urbano na região. Trata-se de um trecho estratégico para o município, devido à presença de dunas frontais e ocupação recuada. Manter essas características é essencial para evitar problemas futuros com o recuo da LC devido à erosão local. No entanto, foi observada uma tendência generalizada de recuo da LC no trecho mais a Leste, em direção ao setor 3. Para o ano de 2044 foi observado um recuo da LC na ordem de 94 m.

A área entre o setor 2 e o setor 3 mostrou-se como o trecho mais crítico em relação à erosão da LC ao longo dos 6 km de monitoramento, em diferentes escalas de tempo, incluindo períodos mais distantes no futuro, como 10 e 20 anos à frente. Mesmo com a fixação por enrocamento, essa preocupação persiste, indicando a necessidade de um acompanhamento mais rigoroso por parte do poder público em relação à integridade da estrutura no futuro.

Recentemente, observou-se um processo de engorda na área adjacente ao enrocamento construído na Praia da Barrinha. No entanto, são necessários estudos contínuos e de longo prazo para determinar se essa tendência progradacional persistirá ou se o trecho se comportará conforme previsto pelo DSAS para o local. Do ponto de vista do planejamento urbano, essa área é crítica e requer um planejamento de ocupação fundamentado em estudos como este, a fim de evitar danos à infraestrutura existente ou, pelo menos, minimizá-los.

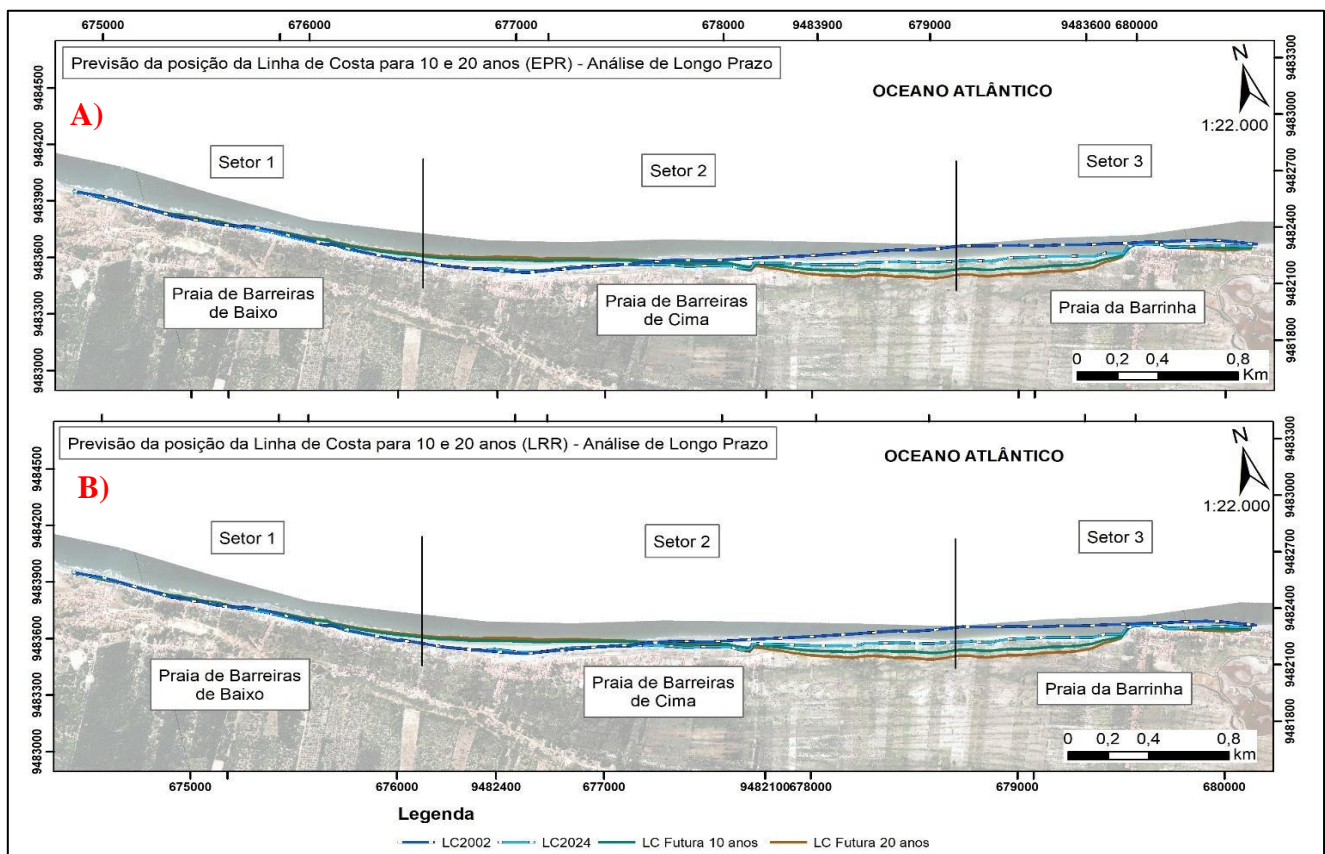


Figura 15. Previsão de longo prazo da posição da Linha de Costa para 10 e 20 anos para o trecho analisado A) De acordo com as taxas obtidas por meio do EPR; B) De acordo com as taxas obtidas por meio do LRR.

O coeficiente de determinação R^2 para as metodologias estatísticas na análise de curto prazo foi de 0,9461. Portanto, as duas metodologias estatísticas utilizadas explicam cerca de 94,61% da variabilidade observada nos dados. Já em termos de análise de longo prazo, o valor ficou na ordem de 0,9431, ou seja, 94,31%. Em ambas as situações, há uma relação bastante forte entre as variáveis analisadas. Os resultados mostram, portanto, uma boa capacidade das metodologias em modelar ou explicar o comportamento das variáveis em estudo (Figura 16 A e B).

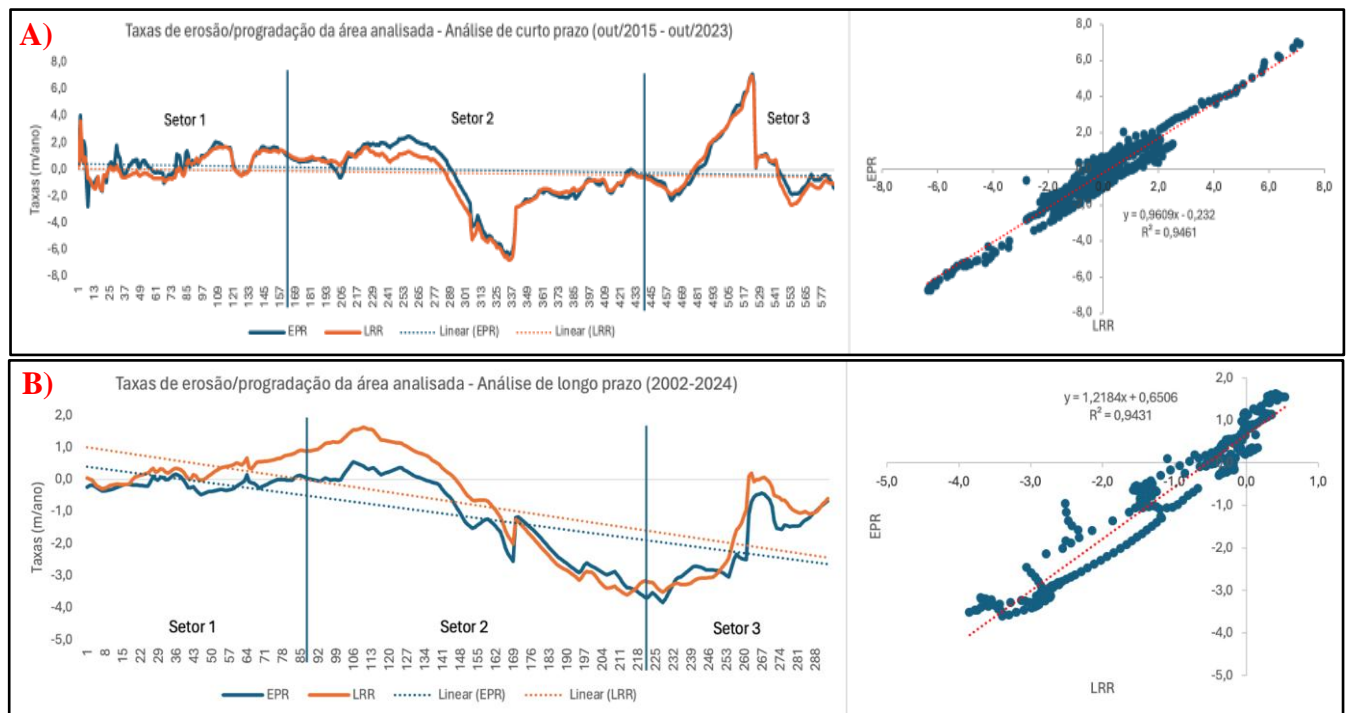


Figura 16. Coeficiente de determinação R^2 para as metodologias estatísticas utilizadas. A) Análise de Curto Prazo; B) Análise de Longo Prazo

4. Discussão

Ao analisarmos as médias das taxas de Erosão e Progradação da Linha de Costa (EPR e LRR), tanto para curto quanto para longo prazo, observamos uma leve tendência de recuo da linha de costa. No entanto, nota-se um valor mais acentuado para o período de análise de longo prazo. Isso se deve, provavelmente, a duas questões: a utilização de um intervalo de tempo maior e a ausência de estruturas de contenção da erosão em algumas áreas durante os 22 anos analisados. Essa última situação ajuda a explicar as menores taxas obtidas para o período de análise de curto prazo, de 8 anos, uma vez que há uma tendência geral de estabilização da linha de costa em decorrência da presença dessas estruturas.

Pinheiro et al. (2016) afirmam que as características morfológicas da LC são influenciadas pelos processos hidrodinâmicos costeiros ao longo da plataforma interna e da face litorânea, incluindo a atenuação, refração e difração das ondas em afloramentos, pontas de areia, bancos de areia e dentro das enseadas. Segundo os autores, a área aqui analisada apresenta, do ponto de vista hidrodinâmico, praias dominadas por maré, sendo predominantemente classificadas nos estágios morfodinâmicos como Reflexivas com Terraço de Baixamar (*R+LTT - Reflective plus Low Tide Terrace*) e Ultradissipativas (*UD - Ultradissipatives*).

Morais (2000) e Lacerda Barros (2018) associam também o fato de o trecho em análise apresentar praias planas na sua porção emersa e submersa, fato que se estende até o setor da plataforma continental interna e externa, que nesse trecho do litoral cearense apresenta baixo gradiente de elevação e baixa profundidade. Dessa forma, a LC em questão tem a maré como principal agente impulsor da hidrodinâmica local e está sujeita a maiores taxas de recuo quando ocorrem fenômenos como as marés de sizígia, marés de Superlua e a conjunção dessas marés com eventos de tempestades, essas últimas causam ainda eventos momentâneos de inundação costeira.

O setor 1 da LC analisada é o que apresenta um maior adensamento populacional e conta com a presença de residências de pescadores, comércio locais e pousadas. Segundo Lacerda Barros (2018), essas ocupações de

pequeno a médio porte ocorrem mais próximas da LC e até mesmo sobre ela. Essa situação acaba por intensificar a observação da atuação de processos erosivos no local, algo que já vem sendo observado na região desde o início dos anos 2000. Conforme o autor, para conter o recuo da LC em função do processo erosivo, foram implementadas medidas de fixação da LC, incluindo enrocamentos construídos entre os anos de 2015 e 2016 (ver Figura 17). A área em questão já contava com a presença de estruturas de contenção improvisadas na forma de estacas de madeira e sacos de areia, contudo tais alternativas não se mostraram eficazes ao longo do tempo e podem até ter intensificado o processo erosivo no local.



Figura 17. Medidas de contenção utilizadas para conter o recuo da Linha de Costa e atenuar a ação das marés. A e B) Alinhamento de estacas de madeira, blocos de calcário e sacos de areia – 2015; C e D) Utilização no mesmo local de estrutura rígida no formato de enrocamento utilizado para conter o recuo da Linha de Costa – 2024.

A Figura 18 apresenta a linha do tempo na forma de imagem do processo de intervenção estrutural realizado no trecho mais a oeste da Praia de Barreiras de Baixo por meio de um enrocamento. Conforme Alfredini (2005) e Klein et al. (2005), medidas estruturais, como construção de obras de defesa costeira, combatem a erosão costeira ao influenciar a ação das ondas e o transporte de sedimentos para estabilizar ou avançar a LC. Essas intervenções refletem as ondas e retêm ou adicionam sedimentos para esse fim. Portanto, as obras de proteção e restauração costeira são usadas para preservar sistemas naturais e elementos humanos na costa (USACE, 2002). No entanto, suas características podem afetar a evolução dos processos naturais, paisagens e habitats (Nordstrom, 2014).

A obra teve início em 2015 e parte dela foi finalizada em 2016, tendo sua extensão sido ampliada até parte do setor 2, mais a leste, nos anos seguintes. Vale ressaltar que é neste setor que foi instalada a primeira estrutura de contenção no trecho em análise, em 2009, na forma de um enrocamento (Lacerda Barros, 2018).

Essa estrutura praticamente cessou qualquer tipo de variação na LC deste trecho do município, protegendo as construções que ainda estavam presentes na época. Lacerda Barros (2018) destaca que com o avançar dos anos a área passou a ser mais valorizada, novas construções surgiram, bem como também houve uma melhora na infraestrutura urbana no local. Fato ressaltado pela comunidade, contudo no início houve algumas contestações referentes à dificuldade de acesso à praia (cota altimétrica elevada em função da obra e rebaixamento do perfil praial), o que levou a instalação de escadarias, 16 até o momento em todo o trecho analisado neste estudo, e rampas de acesso para facilitar o transporte do material utilizado na pesca local, mesmo que de forma tardia.



Figura 18. Evolução do processo de instalação de um enrocamento na Praia de Barreiras de Baixo entre os anos de 2015 e 2023. A) trecho da Praia de Barreiras de Baixo com o patrimônio edificado destruído em função de processos erosivos e recuo da Linha de Costa. Destaca-se a presença de estruturas paliativas para contenção da maré e da erosão no local; B) Início do processo de instalação do enrocamento para conter o recuo da Linha de Costa; C) Instalação do enrocamento finalizada e D) Panorama geral das estruturas rígidas construídas no setor em análise entre os anos de 2009 e 2019.

De acordo com USACE (2002), Nordstrom (2014), Brasil (2018) e Lacerda Barros et al., (2021), os enrocamentos, a alternativa de contenção utilizada em Icapuí, são estruturas compostas por blocos de rochas posicionados e alinhados diretamente e paralelamente à LC, com o objetivo de proteger estradas, casas, passarelas etc., contra a ação das ondas, através da reflexão ou dissipação da energia das ondulações. Destacam-se os impactos negativos resultantes da turbulência das ondas e da interação com a base da estrutura, incluindo o escavamento da base das estruturas e o rebaixamento do perfil da praia. Além disso, há uma perda de valor paisagístico e recreacional da praia devido à perda de acessibilidade no local.

Observou-se para o Setor 2 que tanto na análise de curto prazo quanto na análise de longo prazo, este setor apresenta tendências erosivas, diferentemente do que foi apontado por Lacerda Barros (2018) ao analisar o período de 2002 e 2016, quando o mesmo setor se apresentava de forma progradante em boa parte de sua extensão.

Atualmente, nele é encontrada a maior concentração de taxas mais intensas de recuo da LC, especialmente na região central e mais a leste do setor, onde a LC migra em direção ao continente. Parte desse recuo da LC ainda é resultante da influência direta de uma estrutura de contenção construída no setor 3 por volta dos anos de 2010 e 2011. Contudo, também se observou que nesse setor são encontradas taxas de progradação elevadas, na porção oeste do setor.

Parte da intensificação do processo de recuo da LC neste setor entre os anos de 2020 e 2023 também está diretamente ligado com as interferências antrópicas nesse trecho e no setor 3. A ponta de um enrocamento construído nesse período vem causando uma intensificação da erosão na porção central do setor em função da alteração dos padrões das forçantes oceanográficas, fato que já é facilmente observado por meio da análise das imagens de satélite e fotografias obtidas no local (Figura 19).

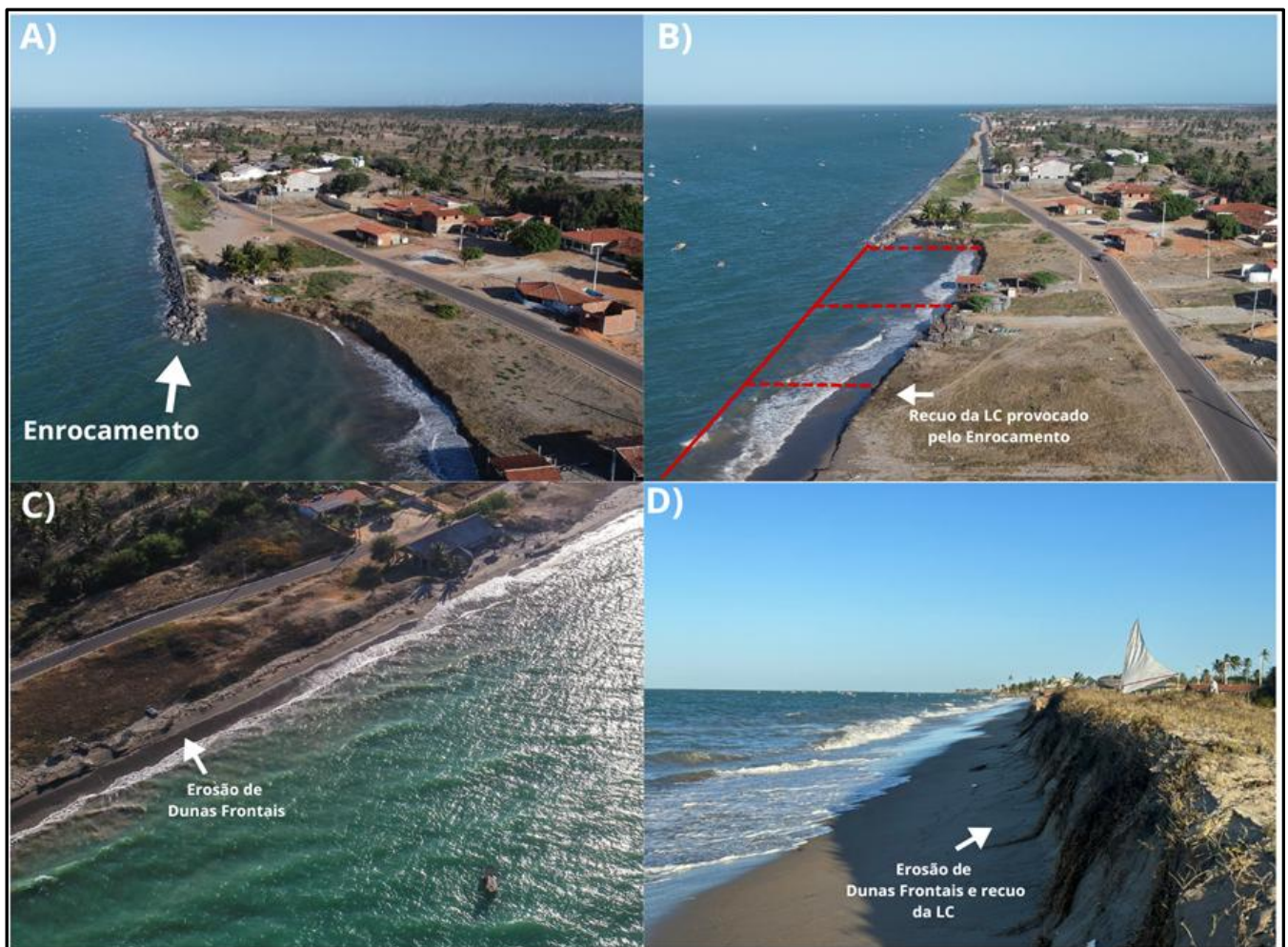


Figura 19. Alterações na Linha de Costa provocadas pela instalação de enrocamento no Setor 2. A) Extremidade de enrocamento instalado no setor; B) Recuo da Linha de Costa provocado pela extremidade do enrocamento; C e D) Erosão de Dunas Frontais e recuo da Linha de Costa.

Destaca-se ainda que, neste setor, os danos causados às infraestruturas instaladas próximas da linha de costa são reduzidos quando comparados aos setores 1 e 3. Isto se deve a três fatores: a urbanização neste setor da orla do município estar mais afastada em relação à LC, à presença de um extenso pós-praia com dunas frontais que atuam como proteção da costa e área fonte de sedimentos, porém, atualmente, encontram-se escarpadas em função da atuação erosiva das marés e ondas locais, e, por fim, ao material que se depositou neste setor e foi oriundo da erosão de parte do trecho no setor 3 (que anos atrás se apresentava fortemente em processo de retrogradação da LC), à barlamar, devido à direção predominante de transporte da deriva litorânea no local, que é de leste a oeste, assim como em praticamente todo o estado.

O setor 3 é caracterizado pela presença de trechos sem ocupação ou com ocupação mais afastada da LC, com presença de dunas frontais e por trechos com uma ocupação semelhante à encontrada na Praia de Barreiras de Baixo, ou seja, com casas e demais estruturas diretamente posicionadas sobre a LC.

Este último setor em análise está localizado na área mais ao leste. Os dados referentes às análises das taxas de variação da LC neste setor, utilizando o monitoramento de campo e imagens, demonstram uma tendência inversa do que foi observado no setor 2, a sotamar, mesmo que nele seja observado o maior recuo da LC em termos de valores totais, que foi de 85,8 m. Diferentemente do observado entre os anos de 2002 e 2016, quando foi possível verificar que esse setor era dominado por tendências erosivas, conforme Lacerda Barros (2018), atualmente essa área apresenta uma tendência progradacional recente.

A relação entre uma praia relativamente plana e avanço da ocupação em direção à LC conseqüentemente tornou este ponto vulnerável à erosão no passado, o que proporciona uma série de danos já causados às estruturas construídas. Várias construções foram destruídas pela erosão, além disso, uma escola teve que ser demolida por apresentar riscos de desabamento para dar lugar ao enrocamento na tentativa de conter a erosão e proteger as casas localizadas mais à retaguarda. A população foi realocada para uma área próxima, porém, a obra construída com o objetivo já citado acabou agravando a erosão em áreas à sotamar (Lacerda Barros, 2018).

A Figura 20 apresenta as alterações na LC na Praia da Barrinha (setor 3) entre os anos de 2002 e 2022 ao longo do monitoramento de campo e imagens de satélite, onde foram observadas as taxas de erosão e o maior número de indicadores de erosão costeira, no trecho central e mais a oeste deste setor. São áreas onde as dunas frontais estavam presentes e foram erodidas durante esse período de análise.



Figura 20. Danos causados erosão costeira ao patrimônio edificado na Praia da Barrinha entre os anos de 2002 e 2010. Fonte: Blog “A Cidade Icapuí”.

Ressalta-se ainda que, segundo Lacerda Barros (2018), a presença de um enrocamento na área em formato de "L", constituído por material calcário, bastante presente na área e extremamente frágil frente a atuação e intensificação de processos erosivos no local, acabou por agravar a erosão em todo o trecho a sotamar da estrutura, pois ele foi construído para fixar a LC e assim conter o avanço das marés sob as construções ali instaladas. Contudo, hoje observa-se uma tendência para progradação justamente no trecho com o recuo da LC mais acentuado no passado, ao centro do setor (Figura 21 e 22).

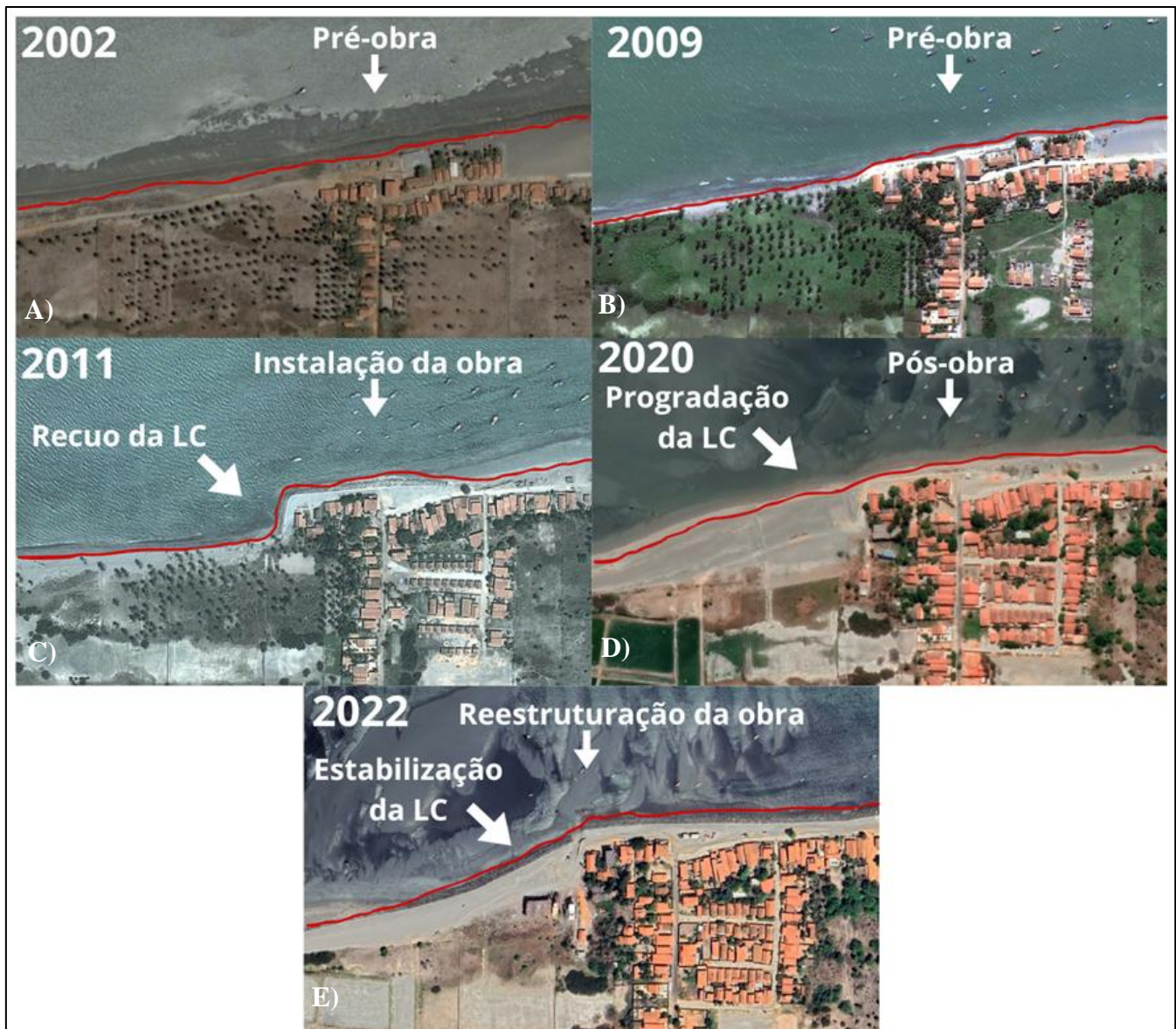


Figura 21. Evolução de um trecho da Linha de Costa no setor 3 analisada entre os anos de 2002 e 2022. A) Situação da Linha de Costa na Praia da Barrinha em 2002; B) Situação da Linha de Costa na Praia da Barrinha em 2009, destaca-se o acentuado processo erosivo no local com recuo da LC e início da construção de contenção com blocos de calcário; C) Finalização da contenção, realocação da comunidade afetada e agravamento do recuo da LC no trecho a oeste da estrutura; D) Início de um processo de progradação da LC no trecho a oeste da estrutura ; E) Substituição da estrutura de contenção de calcário por um enrocamento com blocos graníticos e prolongamento da estrutura à leste e oeste do trecho de maior ocupação. Fonte: Adaptado de Google Earth Pro 2023.



Figura 22. Evolução de um trecho da Linha de Costa no setor 3 analisada. A e B) Registros fotográficos do período de intensa atuação de processos erosivos e os consequentes danos às estruturas construídas no trecho em 2010; C, D e E) Registros fotográficos de 2024 obtidos no mesmo trecho.

Foi possível observar ainda por meio das análises por imagem de satélite que houve progradação da LC na área à sotamar adjacente ao enrocamento em meados de 2019/2020, mesmo sem a construção do enrocamento no local, indicando um possível ciclo anterior de erosão seguindo de deposição na área à exemplo de outras áreas na costa do estado do Ceará (Pinheiro et al., 2008; Duarte, 2018).

A área passou por uma série de modificações nos últimos anos, contudo, durante as atividades de campo, foi possível observar vários indicadores de erosão presentes na área, como, por exemplo, as escarpas erosivas, as raízes dos coqueiros expostas, dunas frontais escarpadas e totalmente erodidas, danos à infraestrutura urbana e a presença de medidas de contenção da erosão, como no caso do uso de estruturas de madeira para minimizar a ação das marés e das ondas no local.

A utilização de estruturas como o enrocamento para a fixação da LC se torna uma opção viável não só para esse objetivo, mas também para a proteção da infraestrutura urbana construída na área. Contudo é preciso uma série cuidados no momento da escolha por essa opção pois é se fazem necessários estudo de monitoramento da área antes, durante e pós-obra, estudos de médio a longo prazo, além da manutenção da estrutura, para se evitar situações como essas anteriormente verificadas no trecho do setor 3, na Praia da Barrinha. Atualmente, o recuo da LC neste trecho do litoral de Icapuí encontra-se estabilizado ou em progradação em função da construção do enrocamento que substituiu a estrutura anteriormente instalada no local.

As medidas de contenção na área são cruciais, especialmente em face dos prognósticos do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, que indicam um aumento médio global do nível do mar de aproximadamente 3,7 mm por ano desde 2006, com projeções de elevação entre 0,43 m e 0,84 m até o final do século, dependendo dos cenários de emissões de gases de efeito estufa. No entanto, ao analisar essas projeções, é fundamental considerar também a escala local, pois o comportamento da LC não se correlaciona diretamente com o nível do mar, mas está intimamente ligado ao aporte sedimentar. Pois, mesmo com a elevação do nível do mar, um alto aporte sedimentar em áreas de influência fluvial pode resultar em progradação da LC, como observado nos deltas da costa leste do Brasil, onde em Atafona há erosão costeira (Machado et al., 2024), enquanto em Gargaú ocorre progradação. O mesmo fenômeno é identificado no delta do Jequitinhonha, reforçando que o aporte sedimentar é essencial para compreender a dinâmica costeira e a evolução da linha de costa, independentemente das variações no nível do mar (Fernandez e Rocha, 2015).

5. Conclusões

As praias arenosas desempenham um papel crucial na proteção contra eventos extremos e oferecem valores socioeconômicos significativos, incluindo lazer, turismo e serviços ecossistêmicos. No entanto, essas áreas costeiras estão constantemente sujeitas a mudanças devido a fatores naturais e antrópicos, muitas vezes resultando em erosão costeira e no recuo da LC. Este estudo revelou que aproximadamente 63,2% da LC analisada foi estabilizada por estruturas de proteção, especialmente em setores críticos observados durante as atividades de campo para levantamento de dados. Apesar disso, a erosão costeira continua sendo uma preocupação significativa para Icapuí e outros municípios do estado do Ceará, especialmente diante das mudanças climáticas e do aumento do nível do mar projetado pelo IPCC.

Os resultados apresentados mostram variações na LC em curto e longo prazo, com tendências de recuo mais acentuadas em áreas sem proteção adequada. Setores como Barreiras de Cima e Barrinha destacaram-se por apresentarem os maiores índices de erosão e progradação. Essas variações ressaltam a importância do monitoramento contínuo e da implementação de medidas de contenção eficazes. Além disso, as projeções futuras indicam que, sem intervenções adequadas, algumas áreas podem enfrentar recuos significativos da LC, impactando diretamente as comunidades e a infraestrutura local.

O estudo destaca a necessidade urgente de um planejamento diretor participativo eficaz, atualmente em fase de elaboração para o município, alinhado com instrumentos como um Plano Municipal de Adaptação à Mudança do Clima e o Plano de Gerenciamento Costeiro Integrado – PGI, este associado ao Projeto Orla, considerando as tendências de variação da LC, especialmente em áreas vulneráveis. As projeções para 2034 e 2044 sugerem que, sem ações preventivas, a erosão pode se agravar, afetando negativamente o meio ambiente, a sociedade e a economia local. Portanto, recomenda-se a adoção de medidas de monitoramento constante, a manutenção das estruturas de proteção existentes e a realização de estudos contínuos para adaptar as estratégias de gestão costeira às dinâmicas observadas na LC.

Assim, as informações geradas por este trabalho são de suma importância para os tomadores de decisão em ações voltadas para o planejamento urbano e gerenciamento costeiro local. Este estudo oferece insights valiosos sobre as mudanças costeiras ao longo do tempo, essenciais para o planejamento e a implementação de medidas de adaptação e mitigação contra o agravamento dos processos erosivos nas localidades analisadas. Tais medidas visam proteger as comunidades costeiras, a infraestrutura e os ecossistemas vulneráveis às transformações do litoral.

Contribuições dos Autores: E.L.B.: Concepção, Metodologia, Investigação, Análise Formal, Curadoria dos dados, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição, Visualização, Supervisão. L.S.P.: Concepção, Validação, Investigação, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto, Aquisição de financiamento. R.G.P.G.: Concepção, Metodologia, Investigação, Redação – revisão e edição. F.J.M.M.: Concepção, Metodologia, Investigação, Redação – revisão e edição. D.P.P.: Concepção, Validação, Investigação, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto, Aquisição de financiamento. A.X.N.: Concepção, Metodologia, Investigação, Redação – revisão e edição. M.M.L.: Metodologia, Software, Análise Formal, Curadoria dos dados, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição. J.O.M.: Concepção, Validação, Investigação, Redação – versão inicial, Redação – revisão e edição, Supervisão, Administração do projeto, Aquisição de financiamento. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais (PPGCMT) do Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR/UFC) entre 2014 e 2018 ao autor principal. Bolsa de Pesquisador Visitante (BPV), processo nº PVS-0215-00011.01.00/23, concedida pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) ao autor principal a partir de 2023.

Agradecimentos: Agradecemos aos projetos “Potencialidades e Manejo para a Exploração de Granulados Marinhos na Plataforma Continental do Ceará”, “Geodiversidades, Interações e Impactos Socioambientais no Sistema Praia-Plataforma da Costa Oeste do Ceará” (PRONEX - CNPq/FUNCAP) e “Evolução costeira de falésias ativas na costa semiárida do NE do Brasil: avaliação do risco de instabilidade baseado na vulnerabilidade e nas mudanças climáticas”, financiado pela Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP), pelo suporte na coleta de dados de campo, realizado em parceria com o Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica (LGCO/PROPGEU/UECE) e o Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG/LABOMAR/UFC). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas DTI, PQ e Sr (380986/2022-1 (FINEP/CNPq), 316941/2021-2 (PQ-LP), 306462/2018-4 (PQ-Sr-JOM) e 309102/2022-7 (PQ-DPP). Aos projetos FUNCAP UNI-0210-00736.01.00/23 / PS1-0186-00333.01.00/21 e CNPq 420516/2022-0. Agradecemos também à comunidade das Praias de Barreiras da Sereia e Barrinha, em Icapuí, pela recepção e por todo o apoio durante as coletas.

Conflito de interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse

Referências

1. ALFREDINI, P. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2005.
2. ALBUQUERQUE, M., ESPINOZA, J., TEIXEIRA, P., DE OLIVEIRA, A., CORRÊA, I., & CALLIARI, L. Erosion or Coastal Variability: An Evaluation of the DSAS and the Change Polygon Methods for the Determination of Erosive Processes on Sandy Beaches. **Journal of Coastal Research**, 1710–1714. (2013). <http://www.jstor.org/stable/26491036>
3. BAPTISTA P.; CUNHA T.; BERNARDES C.; GAMA C.; FERREIRA O.; DIAS A. A precise and efficient methodology to analyse the shoreline displacement rate. **Journal of Coastal Research**, v. 27, n. 2, p. 223-232, 2011. DOI: 10.2112/09-1187.1
4. BAÍA, L.B.; RANIERI, L.A.; ROSÁRIO, R.P. Análise multitemporal da variação da linha de costa em praias estuarinas de macromaré na Amazônia Oriental. **Geociências**, v. 40, n. 1, p. 231–244, 2021. DOI: 10.5016/geociencias.v40i1.13470

5. BIRD, E.C.F. **Coastal Geomorphology: An Introduction**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2008.
6. BOAK, E.H.; TURNER, I.L. Shoreline definition and detection: a review. **Journal of Coastal Research**, p. 688-703, 2005. DOI: 10.2112/03-0071.1.
7. BRASIL. Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro – GI-GERCO/CIRM. **Guia de Diretrizes de Prevenção e Proteção à Erosão Costeira**. Brasília, DF, 2018. ISBN 978-85-68813-13-3.
8. CARVALHO, A. M.; MAIA, L. P.; DOMINGUEZ, J. M. L. A deriva e o transporte litorâneo de sedimentos no trecho entre Cumbuco e Matões–costa noroeste do estado do Ceará. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 40, n. 1, p. 43-51, 2007.
9. CEARÁ. Superintendência Estadual do Meio Ambiente. Reestruturação e atualização do mapeamento do projeto Zoneamento Ecológico-Econômico do Ceará – zona costeira e unidades de conservação costeiras. **Relatório final de caracterização ambiental e dos mapeamentos**. Fortaleza: SEMACE, 2016.
10. CHACANZA, M.S.; ALMEIDA, N. M.; FREIRE, G.S. S.; SILVA NETO, C. Â.; ABREU NETO, J. C.; JALANE, O. I. Análise da variação da linha de costa no trecho entre as praias de Peroba e Redonda no município de Icapuí-Ceará, Brasil, a partir de imagens de satélite aplicando o DSAS. **Geociências**, v. 41, n. 4, p. 377-396, 2022. DOI: 10.5016/geociencias.v41i04.16718
11. CROWELL, M.; LEATHERMAN, S.P.; BUCKLEY, M.K. Historical shoreline change: error analysis and mapping accuracy. **Journal of Coastal Research**, Flórida, v. 7, n. 3, p. 839-852, 1991.
12. COOPER, A.; MASSELINK, G; COCO, G.; SHORT, A.; CASTELLE, B.; ROGERS, K.; ANTHONY, E.; GREEN, A.; KELLEY, J.; PILKEY, O. Sandy beaches can survive sea-level rise. **Nature Climate Change** 10: 993–995, 2020. DOI: 10.1038/s41558-020-00934-2
13. DILLENBURG, S.R.; ESTEVES, L.S.; TOMAZELLI, L.J. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 76, n. 3, p. 611-623, 2004. DOI: 10.1590/s0001-37652004000300014
14. DINIZ, M.T.M.; SILVA, D.S.; SANTOS, J.R.; SOUZA, R.M., AND SILVA, J.P.,. Variation of the coastline between the years of 1984 and 2017 in the State of Sergipe, Northeast Region, Brazil. In: Malvárez, G. and Navas, F. (eds.), *Global Coastal Issues of 2020*. **Journal of Coastal Research**, Special Issue No. 95, pp. 458–462. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208. DOI: 10.2112/SI95-089.1
15. DUARTE, D. M. **Erosão e progradação da praia de Pontal De Maceió, Fortim, Ceará**. 2018. 97 p. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
16. FERNANDEZ, G. B.; DA ROCHA, T. B. BARREIRAS COSTEIRAS HOLOCÊNICAS: GEOMORFOLOGIA E ARQUITETURA DEPOSICIONAL NO LITORAL DO RIO DE JANEIRO. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, 16(2). DOI:10.20502/rbg.v16i2.619, 2015.
17. IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 26 jun. 2024.
18. KHAKHIM, N. KURNIAWAN, A. PRANOWO, W.S. KHASANAH, E.U. HALILINTAR, P. Shoreline morphological change prognostic model based on spatiotemporal framework imagery data on the Northern Coast of Java, Indonesia, **Kuwait Journal of Science**, DOI: 10.1016/j.kjs.2024.100274
19. KLEIN, A.H.F.; DIEHL, F.L.; BENEDET, L. The paradigm between beach protection and beach restoration: case studies in Santa Catarina state, southeastern Brazil. In: **International Conference on Coastal Conservation and Management in the Atlantic and Mediterranean**, 2005, Tavira. Book of Abstracts..., p. 327-329.
20. KURIYAMA, Y.; BANNO, M. Shoreline change caused by the increase in wave transmission over a submerged breakwater due to sea level rise and land subsidence. **Coastal Engineering**, v. 112, p. 9-16, 2016. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2016.02.003.
21. LACERDA BARROS, E. **Erosão costeira no litoral do município de Icapuí-Ce na última década: causas, consequências e perspectivas futuras**. 2018. 254 f.: Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
22. LACERDA BARROS, E. PAULA, D.P; GUERRA, R.G.P.; SANTOS, J.O. Erosion and Coastal Structures in Brazilian Metropolises: The Case of Fortaleza and Its Inequalities. In: SINGH, R.B. *et al.* (eds.) **Practices in**

- Regional Science and Sustainable Regional Development.** Singapore: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-981-16-2221-2_6
23. LACERDA BARROS, E. L.; MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. S. Análise dos indicadores do processo erosivo no litoral do município de Icapuí, Ceará, nordeste do Brasil. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 1, n. 14, p. 69-86, jan. 2021. ISSN 1982-5528. DOI: 10.22411/rede2020.1401.05
 24. LACERDA BARROS, E.; OLIVEIRA, M. M. N. de; NETO, A. X.; GUERRA, R. P. G.; MOURA, F. J. M. de; MOURA, F. M. de.; MORAIS, J. O. de; PINHEIRO, L. Sedimentological Patterns of the Beach-Inner Continental Shelf System of Icapuí, CE (NE-Brazil). **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. 36–50, 2024. DOI: 10.21680/2447-3359.2024v10n2ID32257
 25. LE COZANNET, G.; GARCIN, M.G.; YATES, M.; IDIER, D.; MEYSSIGNAC, B. Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. **Earth-science reviews**, v. 138, p. 47-60, 2014. APA
 26. LEATHERMAN, S.P. Shoreline Change Mapping and Management along the U.S. East Coast. **Journal of Coastal Research**, v. 38, p. 5-13, 2003.
 27. LEITE, L.H.J.; ALMEIDA, N.A. Análise espaço-temporal e modelagem preditiva da linha de costa do estado do Ceará. **Geociências**, v. 42, n. 3, p. 419-436, 2023. DOI: 10.5016/geociencias.v42i3.17799
 28. LIMA, J. C.; LIMA, R. J. R.; BARROS, E. L.; PAULA, D. P. de. ANÁLISE MULTITEMPORAL DA VARIABILIDADE DA LINHA DE COSTA DO LITORAL DO MUNICÍPIO DE CAUCAIA, CEARÁ, BRASIL. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 864–884, 2019. DOI: 10.35701/rcgs.v21n2.542
 29. LIMA, J.C. **Erosão costeira e seus efeitos no potencial recreacional das praias do litoral de Caucaia (Ceará, Brasil): problemas e consequências no desenvolvimento do turismo.** Dissertação - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2021.
 30. LIU, Y.; HUANG, H.; QIU, Z.; FAN, J. Detecting coastline change from satellite images based on beach slope estimation in a tidal flat. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 23, p. 165-176, 2013. DOI: 10.1016/j.jag.2012.12.005
 31. LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The State of the World's Beaches. **Scientific Reports**, v. 8, n. 6641, 2018. DOI: 10.1038/s41598-018-24630-6.
 32. MAIA, L.P. **Processo costeros y balance sedimentario ao lo largo de Fortaleza (NE-BRASIL): implicaciones para uma gestão adequada de la zona litoral.** Tese de Doutorado. Programa Doutorado de Ciências del Mar, Departamento d'Estratigrafia i Paleontologia, Universitat de Barcelona, 269p. 1998.
 33. MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; ALVALA, R.; CUNHA, A. P.; BRITO, S.; MORAES, O. L. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, 1973-1985, 2017. DOI: 10.1590/0001-3765201720170206
 34. MAZZER, A.; DILLENBURG, S. Variações temporais da linha de costa em praias arenosas dominadas por ondas do sudeste da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis, SC, Brasil). **Pesquisas em Geociências**, v. 36, n. 1, p. 117-135, 2009. DOI: 10.22456/1807-9806.17880
 35. MEIRELES, A. J. A.; SANTOS, A. M. F. Evolução geomorfológica da planície costeira de icapuí, extremo leste do ceará, nordeste do brasil. **Geografia (RioClaro. Impresso)**, v. 36, p. 519–534, 2011
 36. MEIRELES, A.J.A. **MAPEAMENTO geológico/geomorfológico da planície costeira de Icapuí, extremo leste do Estado do Ceará.** Diss. Mestrado, Centro de Tecnologia, Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Recife, 1991, 178p. il.
 37. MEIRELES, A.J.A.; LIMA, W. F.; SILVA, A. P. **Atlas socioambiental: cartografia social das comunidades de Icapuí.** 1. ed. Fortaleza, CE: Editora Fundação Brasil Cidadão, 2016.
 38. MENDONÇA, F. J. B., GONÇALVES, R. M., AWANGE, J., SILVA, L. M. D., GREGÓRIO, M. D. N. 2014. Temporal shoreline series analysis using GNSS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, p. 701-719. DOI: 10.1590/S1982-21702014000300040.
 39. MORAIS, J. O. ;PINHEIRO, L. S. The effect of smi-aridity and damming on sedimentary dynamics in estuaries- Northeastern region of Brazil. **Journal of Coastal Research**, Polônia, v. 64, p. 805-808, 2011.
 40. MORAIS, J. O. Compartimentação Territorial Evolutiva da Zona Costeira. In: LIMA, L.C; MORAIS, J.O; SOUZA, M. J. N. (Org.). **Compartimentação Territorial e Gestão Regional do Ceará.** Fortaleza: p.106-179 FUNECE, 2000.

41. MORAIS, J. O. D. Evolução sedimentológica da enseada de Mucuripe (Fortaleza-Ceará-Brasil). **Arquivos de Ciências do Mar**, 21(1), 19-46. (1981).
42. MORAIS, J. O.; FREIRE, G. S. S.; PINHEIRO, L. S.; SOUZA, M. J.; CARVALHO, A. M.; PESSOA, P. R. S.; OLIVEIRA, S. H. M. Ceará: atlas de erosão. In: Muehe, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Dieter Muehe (Org.). 476p Brasília: MMA, 2006.
43. MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.; PESSOA, P. R. S.; FREIRE, G. S.; CARVALHO, A. MDE; GUERRA, R. G. P.; LACERDA BARROS, E.; MOURA, F. J. M. Ceará In: **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**.1 Dieter Muehe (Org.) ed.Brasília: , v.1, p. 261-289. MMA, 2018
44. MOREIRA, T. F., ALBUQUERQUE, M. DA G., ESPINOZA, J. M. DE A., DE PAULA, D. P., LEAL ALVES, D. C., BARROS, E. L., DA CONCEIÇÃO, T. F. (2020). Estudo do Comportamento da Linha de Costa na Praia do Icaraí (Caucaia, Ceará), a partir dos Métodos Digital Shoreline Analysis System e do Polígono de Mudança. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 13(07), 3395–3411. DOI: 10.26848/rbgf.v13.07.p3395-3411
45. MORTON, R.A.; MILLER, T., and MOORE, L., Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: A summary of recent shoreline comparisons and analyses. **Journal of Coastal Research**, 21(4), 704–709. West Palm Beach (Florida), 2005. ISSN 0749-0208. <https://doi.org/10.2112/04-0230.1>
46. MUEHE, D. ASPECTOS GERAIS DA EROSÃO COSTEIRA NO BRASIL (general aspects of coastal erosion in Brazil). **Mercator**, Fortaleza, v. 4, n. 7, nov. 2008. ISSN 1984-2201.
47. MUEHE, D. Erosion in the Brazilian coastal zone: an overview. **Journal of Coastal Research**, 39, 43-48. (2006).
48. MUEHE, D. **Panorama da erosão costeira no Brasil**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental, Departamento de Gestão Territorial. Brasília, MMA, 759p. 2018.
49. MUEHE, D.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Deslocamento da linha de costa versus mobilidade praia. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 5, n. 2, 2014. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2356
50. NASCIMENTO, E. A. N. ., & ANDRADE , A. C. DA S. Dinâmica tempo-espacial da linha de costa associada a delta de maré vazante, Cacha Pregos e Ponta dos Garcez, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 25(1) (2024). DOI: 10.20502/rbgeomorfologia.v25i1.2447
51. NICHOLLS, R. J.; WONG, P. P.; BURKETT, V.; CODIGNOTTO, J.; HAY, J.; MCLEAN, R.; RAGOONADEN, S.; WOODROFFE, C. D.; ABUODHA, P. A. O.; ARBLASTER, J.; BROWN, B.; FORBES, D.; HALL, J.; KOVATS, S.; LOWE, J.; MCINNES, K.; MOSER, S.; RUPP-ARMSTRONG, S.; AND SAITO, Y.: **Coastal systems and low-lying areas** 2007. <https://ro.uow.edu.au/scipapers/164>
52. NORDSTROM, K. F. Living with shore protection structures: A review. **Estuarine Coast. Shelf Sci.** 150, Part A, 11–23. doi: 10.1016/j.ecss.2013.11. (2014).
53. PANG, T.; WANG, X.; NAWAZ, R. A.; KEEFE, G.; ADEKANMBI, T. COASTAL erosion and climate change: A review on coastal-change process and modeling. *Ambio* 52, 2034–2052 (2023). DOI: 10.1007/s13280-023-01901-9
54. PAULA, D. P. Análise dos riscos de erosão costeira no litoral de Fortaleza em função da vulnerabilidade dos processos geogênicos e antropogênicos. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade do Algarve, Portugal, 2012, 364f.
55. PAULA, D.P. Erosão Costeira e Estruturas de Proteção no Litoral da Região Metropolitana de Fortaleza (Ceará, Brasil): Um Contributo para Artificialização do Litoral. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 9, n. 1, dez. 2015. ISSN 1982-5528.
56. PAULA, D. P.; VASCONCELOS, Y.; SOUSA, F. Effects of beach width variability on recreational function: A case study on NE Brazil. **Regional Studies in Marine Sciences**. 2022, 51, 102182. DOI: 10.1016/j.rsma.2022.102182
57. PINHEIRO, L. S.; MORAIS, J. O. ; MAIA, L. P. The Beaches of Ceará. In: Andrew D. Short; Antonio Henrique da F. Klein. (Ed.). **Brazilian Beach Systems**, Springer International Publishing, Switzerland, v. 1, p. 175-199. 2016
58. PINHEIRO, L. S.; MORAIS, J.O.; CAVALCANTE, A. A.; PAULA, D. P.; SILVA, R. L. Erosão Costeira em Praias Adjacentes às Desembocaduras Fluviais: O Caso de Pontal de Maceió, Ceará, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, Lisboa, v. 8, n. 2, p. 66-76. 2008.

59. QUANG, D.N.; NGAN, V.H.; TAM, H.S.; VIET, N.T.; TINH, N.X.; TANAKA, H. Long-Term Shoreline Evolution Using DSAS Technique: A Case Study of Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021, 9, 1124. DOI: 10.3390/jmse9101124
60. RANGEL-BUITRAGO, N., ANFUSO, G., & WILLIAMS, A.T. Coastal erosion along the Caribbean coast of Colombia: Magnitudes, causes and management. *Ocean & Coastal Management*, 114, 129-144. (2015). DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2015.06.024
61. ROEBELING, P.C, C.D. COELHO,; E.M. REIS. Coastal Erosion and Coastal Defense Interventions: A Cost-Benefit Analysis. *Journal of Coastal Research*, 2011, 1415–19. <http://www.jstor.org/stable/26482408>.
62. SOUZA, C.R DE G. & SUGUIO, K. - The coastal erosion risk zoning and the São Paulo Plan for Coastal Management. *Journal Coastal Research*, SI35:530-547. (2003)
63. SOUZA, C.R DE G., SOUZA FILHO, P.W.M., ESTEVES, S.L., VITAL, H., DILLENBURG, S.R., PATCHINEELAM, S.M. & ADDAD, J.E. - Praias Arenosas e Erosão Costeira. In: C.R. de G. Souza, K. Suguio, A.M. Santos & P.E. Oliveira (eds.), *Quaternário do Brasil*, (2005) p.130-152, Holos Editora, Ribeirão Preto, SP, Brasil. (ISBN-10: 8586699470)
64. USACE (US ARMY CORPS OF ENGINEERS). Shore protection projects. In: USACE. *Coastal Engineering Manual*, Chapter 3, Part V. Vicksburg, Mississippi: EM 1110-2-1100, 2002. 116p.
65. VASCONCELOS, S. C; RAMOS, I. A; NUNES R. S; SANTOS, R. A; FIGUEIREDO JR, A. G. Dinâmica erosiva e progradacional das praias de Atafona e Grussaí (RJ), 1954-2019. *Revista da ANPEGE*, v. 17, n. 33, p. 162-182, 2021
66. VASCONCELOS, Y.G.; PAULA, D. P.; FERREIRA, O.; LEISNER, M.M. Contrasting short-term coastline behaviour after the construction of sinusoidal groins in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 136. 2024. (February). DOI: 10.1016/j.jsames.2024.104832
67. VOUSDOKAS, M.I., RANASINGHE, R., MENTASCHI, L. *ET AL*. Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change* 10, 260–263 (2020). DOI: 10.1038/s41558-020-0697-0
68. WILLIAMS, A.T.; RANGEL-BUITRAGO, N.; PRANZINI, E.; ANFUSO, G. The management of coastal erosion. *Ocean & Coastal Management*, v. 156, p. 4-20, 2018. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.03.022.
69. XIMENES NETO, A. R.; PINHEIRO, L. de S.; ALMEIDA, N. M.; MORAIS, J. O.; MOURA, F. J. M.; PESSOA, P. R. S.; SILVA FILHO, W. F.; CARVALHO, A. M.; SOARES, R. C.; LIMA, R. M.; FILHO, R. P. L.; BARROS, E. L.; MARQUES, E. S. Geologia e geomorfologia costeira e marinha (versão estendida). In: LACERDA BARROS, E.; XIMENES NETO, A.; PAULA, D. P. P.; MATOS, F. O.; ANDRADE, L.; BEZERRA, L. E. A.; MENEZES, M. O.; ALBUQUERQUE, M. G.; SOUSA, P. H.; CAVALCANTE, R. M.; ROSSI, S.; MONTALVERNE, T. C. F. (Org.). *Atlas Costeiro e Marinho do Estado do Ceará 2023 (versão estendida)*. 1. ed. Fortaleza: Federação das Indústrias do Ceará (FIEC), 2024. v. 1, p. 1-1. ISBN 978-65-01-06248-8.
70. XIMENES NETO, A. R.; LACERDA BARROS, E. FILHO, R. P. L.; BRINDEIRO, F. O. S.; PAULA, D. P.; MORAIS, J. O.; PINHEIRO, L. Late Holocene progradation in a mixed siliciclastic-carbonate beach ridges system, Northeast Brazil. *Regional Studies in Marine Science* 69, 103295. 2024 DOI: 10.1016/j.rsma.2023.103295



obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.