

Avaliação da vulnerabilidade à erosão costeira em uma comunidade tradicional amazônica

Evaluation of vulnerability to coastal erosion in a traditional amazonian community

Fabrício de Sousa Figueiredo^{ab} , Mayara de Souza Rodrigues^{ac} , Leilanhe Almeida Ranieri^{ad} 

^aLaboratório de Oceanografia Geológica (LABOGEO) - Universidade Federal do Pará

^bfabricio.figueiredo2201@gmail.com, ^cmay.rdg1@gmail.com, ^dlaranieri@ufpa.br



© 2025 The authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons license.

Resumo

As zonas costeiras amazônicas estão entre os ambientes mais suscetíveis aos impactos das mudanças climáticas, agravados pela intensificação das pressões antrópicas. Este estudo teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade à erosão costeira da comunidade de Jubim, situada na margem leste da Ilha do Marajó, sob dois cenários de elevação do nível do mar projetados pelo IPCC (RCP 2.6 e RCP 8.5). Para tal, aplicou-se o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC), aliado à análise da variação da linha de costa obtida por meio do DSAS e ao uso de dados de cobertura do solo. Os resultados indicaram que a vulnerabilidade é heterogênea ao longo do litoral. No cenário RCP 2.6, predominaram condições intermediárias, sobretudo nos setores norte e central, enquanto o setor sul manteve maior estabilidade associada à presença de falésias e plataformas de abrasão. Já no cenário RCP 8.5, a vulnerabilidade foi significativamente intensificada: o setor norte apresentou os maiores índices, com retrações superiores a 180 m em pontos críticos, e o setor central também revelou maior suscetibilidade, contrastando com a relativa resiliência do setor sul. De forma geral, 30,3% da linha de costa apresentou vulnerabilidade moderada e 27,3% vulnerabilidade alta, evidenciando riscos diretos a áreas agrícolas e de uso comunitário localizadas próximas ao setor norte. A análise integrada destacou ainda que a expansão agropecuária e a ocupação urbana potencializam a vulnerabilidade ao comprometer ecossistemas como os manguezais, reduzindo a resiliência natural frente à elevação do nível do mar. Conclui-se que o IVC constitui ferramenta eficaz para o diagnóstico e o mapeamento espacial da vulnerabilidade costeira, fornecendo subsídios relevantes para estratégias de gestão e adaptação em comunidades tradicionais amazônicas, diante de um cenário de intensificação dos processos erosivos e de mudanças climáticas globais.

Palavras-chave: Variação do Nível do Mar; Zona Costeira Amazônica; Alterações climáticas; Erosão Costeira

Abstract

The Amazonian coastal zones are among the environments most susceptible to the impacts of climate change, exacerbated by increasing anthropogenic pressures. This study aimed to assess the vulnerability to coastal erosion of the community of Jubim, located on the eastern margin of Marajó Island, under two sea-level rise scenarios projected by the IPCC (RCP 2.6 and RCP 8.5). To this end, the Coastal Vulnerability Index (CVI) was applied in combination with shoreline change analysis using DSAS and land cover data. The results indicated that vulnerability is heterogeneous along the coastline. Under the RCP 2.6 scenario, intermediate conditions predominated, particularly in the northern and central sectors, while the southern sector remained more stable due to the presence of cliffs and abrasion platforms. Under the RCP 8.5 scenario, vulnerability was markedly intensified: the northern sector showed the highest indices, with shoreline retreat exceeding 180 m at critical points, and the central sector also displayed increased susceptibility, contrasting with the relative resilience of the southern sector. Overall, 30.3% of the coastline exhibited moderate vulnerability and 27.3% high vulnerability, indicating direct risks to agricultural and community-use areas near the northern sector. The integrated analysis further highlighted that agricultural expansion and urban occupation exacerbate vulnerability by compromising ecosystems such as mangroves, reducing natural resilience to sea-level rise. In conclusion, the CVI proves to be an effective tool for diagnosing and spatially mapping coastal vulnerability, providing valuable support for management and adaptation strategies in traditional Amazonian communities facing intensifying erosive processes and global climate change.

Keywords: Sea Level Rise; Amazonian Coastal Zone; Climate change; Coastal Erosion.

1. Introdução

As zonas costeiras são um sistema natural importante para toda sociedade, hospedando uma ampla variedade de atividades sociais, econômicas e ecológicas (Nguyen et al. 2016). Além disso, representa uma interface dinâmica entre o ambiente terrestre, marinho e atmosférico, caracterizada por processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em escamas temporais de curto, médio e longo prazo (Souza & Andrade 2024). Essa região é influenciada por fatores naturais, como variações na linha de costa, ação das marés, correntes litorâneas e eventos extremos, além de pressões antrópicas decorrentes da ocupação humana e das atividades socioeconômicas (Brand et al. 2020).

Nesse sentido, a zona costeira é amplamente reconhecida como uma área exposta a intenso estresse ambiental, resultante tanto da exploração intensiva de seus recursos naturais quanto do uso desordenado do território. Além disso, essa região desempenha um papel fundamental na proteção dos continentes, atenuando os efeitos de forças oceanográficas, meteorológicas e fluviais (Ranieri & El-Robrini 2016). Essas forças desencadeiam processos dinâmicos de erosão e deposição sedimentar, influenciando de forma contínua a morfologia, a estabilidade da paisagem costeira, e o nível de vulnerabilidade às resultantes positivas e negativas a qual está sujeita.

O Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) é definido como uma ferramenta de análise que quantifica o grau de exposição de um determinado segmento litorâneo às dinâmicas naturais, considerando a interação entre variáveis climáticas, oceanográficas e geomorfológicas, bem como a capacidade desse sistema costeiro de responder a impactos adversos (Dal Cin & Simeoni 1994). A aplicação desse índice tem como objetivo avaliar a probabilidade de ocorrência de modificações físicas e ambientais ao longo da linha de costa (Gornitz 1991). Além disso, o IVC possibilita a identificação de áreas suscetíveis a impactos decorrentes da elevação do nível médio do mar (NMM). Dessa forma, constitui-se como um instrumento estratégico para apoiar gestores no planejamento de medidas e na tomada de decisões voltadas à proteção dos ambientes costeiros (Dwarkish et al. 2009).

No cenário atual das mudanças climáticas globais, a elevação do NMM representa uma consequência direta do aumento das emissões antrópicas de gases de efeito estufa, especialmente após a Primeira Revolução Industrial (IPCC 2013, NOAA 2017) e, atualmente, intensificado principalmente pelo derretimento das áreas congeladas da Groenlândia (Box et al. 2022), da expansão térmica dos oceanos e do derretimento de calotas polares (Nicholls et al. 2014, IPCC 2013).

Nesse contexto, as projeções do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC)

indicam um aumento da temperatura global de até 4,8 °C até o ano de 2100, sendo estimada uma elevação média de 3,7 °C no período de 2081 a 2100 no cenário mais crítico. Esse aumento térmico influencia diretamente a elevação do nível dos oceanos, para a qual se projeta um acréscimo médio de 0,29 a 0,59 m, podendo alcançar valores acima de 1 m (Oppenheimer et al. 2022).

Diante das diversas projeções relacionadas à elevação do NMM, torna-se evidente que localidades, modos de subsistência e ecossistemas costeiros estão sob ameaça. Segundo o IPCC (2019), estima-se que, até 2050, aproximadamente um bilhão de pessoas habitarão áreas costeiras de baixa altitude, ou seja, regiões situadas a menos de 10 metros acima do nível atual do mar. Além disso, de acordo com as Nações Unidas (2017), cerca de 40% da população mundial já reside em uma faixa litorânea de até 100 km, o que ressalta a vulnerabilidade dessas áreas frente às mudanças ambientais em curso.

Dada sua complexidade e vulnerabilidade, a zona costeira tem sido amplamente estudada com o objetivo de compreender os impactos das mudanças ambientais e fornecer subsídios para estratégias de gestão sustentável. Nesse contexto, destacam-se os estudos realizados pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – United States Geological Survey (USGS 2021) e por outros autores (Gornitz et al. 1991, 1994; Pendleton et al. 2004, 2010), que aplicaram o método do IVC. Essa abordagem metodológica também foi aplicada em diversas regiões do mundo, sendo ajustada conforme as especificidades regionais, incluindo pesquisas realizadas na Espanha (Koroglu et al. 2019), Marrocos (Muzirafuti 2025), Índia (Bharadwaz et al. 2025) e Costa do Marfim (Tano et al. 2016). No Brasil, o método foi aplicado com adaptações em diversos estados, como Rio de Janeiro, por Muehe et al. (2011) e Osilieri et al. (2020), Ceará, por Barros et al. (2024), Pará, por Braga et al. (2019) e Ranieri & El-Robrini (2016); entre outros.

O estudo da vulnerabilidade costeira pode ser utilizado para identificar as áreas urbanas com ocupação humana suscetíveis aos impactos da erosão, por meio da correlação com análises de uso e ocupação do solo. Esse mapeamento é uma ferramenta crucial para entender a distribuição das práticas humanas nas áreas costeiras e como essas ações podem interagir com a vulnerabilidade ambiental local (Ranieri & El-Robrini 2015). A relação entre vulnerabilidade e uso e ocupação do solo é crucial para o planejamento e gestão sustentável das zonas costeiras, uma vez que o uso inadequado do solo pode exacerbar os impactos de eventos climáticos extremos, enquanto a ocupação indevida pode agravar os processos de degradação ambiental (Campos et al. 2022).

A aplicação do método do IVC em áreas rurais também é válida, embora a densidade demográfica nessas áreas seja menor, pois muitas comunidades

costeiras dependem fortemente da relação terra-mar nas suas atividades de subsistência, a exemplo da Vila de Jubim, situada na costa oriental da Ilha do Marajó, Brasil. A presente pesquisa justifica-se pela erosão costeira que afeta parte desse trecho litorâneo, resultante da elevação do nível do mar e de processos oceanográficos, tal como ocorre nas áreas adjacentes que compõem a porção oriental da ilha (Henriques et al. 2024).

O estudo tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade costeira de Jubim, identificando áreas suscetíveis à erosão com base em parâmetros geomorfológicos e oceanográficos, conforme a metodologia do IVC. Para tal, foram empregadas observações e coleta de dados *in situ*, e técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento em Sistema de Informação Geográfica (SIG), viabilizando a elaboração de mapas temáticos e a definição de um índice de vulnerabilidade à erosão costeira.

2. Caracterização da área de estudo

A Ilha do Marajó, maior ilha fluviomarinha do mundo, situa-se na costa amazônica brasileira. Limita-se ao norte com o Oceano Atlântico, ao sul com o rio Pará, a oeste com o rio Amazonas e a leste com a baía do Marajó. A área de estudo compreende a porção leste da Ilha do Marajó (Fig. 1), especificamente no litoral de uma comunidade tradicional chamada Jubim, distrito do município de Salvaterra-PA. O uso territorial de Jubim se estende para áreas adjacentes, abrangendo

um segmento costeiro de aproximadamente 4,7 km de extensão, situada entre as latitudes 0°47'26"S e 0°49'8"S e as longitudes 48°31'5"O e 48°31'4"O.

Na região leste da Ilha do Marajó, o clima é tropical úmido de monção (Am), segundo a classificação Koppen, com temperatura média anual de 27 °C e pluviosidade anual de 3.000 mm. A estação chuvosa compreende os meses de dezembro a maio, e a estação com menos chuva compreende junho a novembro (Lima et al. 2005).

Os processos que formaram as paisagens da área de estudo estão relacionados a eventos regionais, como soerguimento crustal, subsidência, falhamentos e variações relativas do nível do mar (gressões e transgressões) ocorridos durante o Cenozóico Superior (Mioceno ao Holoceno). Além disso, a hidrodinâmica costeira atual, influenciada por marés e ondas na baía do Marajó, apresenta papel determinante nos processos costeiros locais (França & Souza Filho 2003).

A região de estudo é segmentada em três subunidades morfológicas: planalto costeiro, planície de intermaré e delta de maré vazante (França & Souza Filho 2006). O planalto costeiro é formado por sedimentos neógenos e quaternários do Grupo Barreiras/Pós-Barreiras, originando falésias de até 6 m de altura. Apresenta relevo suave e aplainado, com altitudes variando entre 5 e 20 m acima do nível do mar (Ab'Saber 1967).

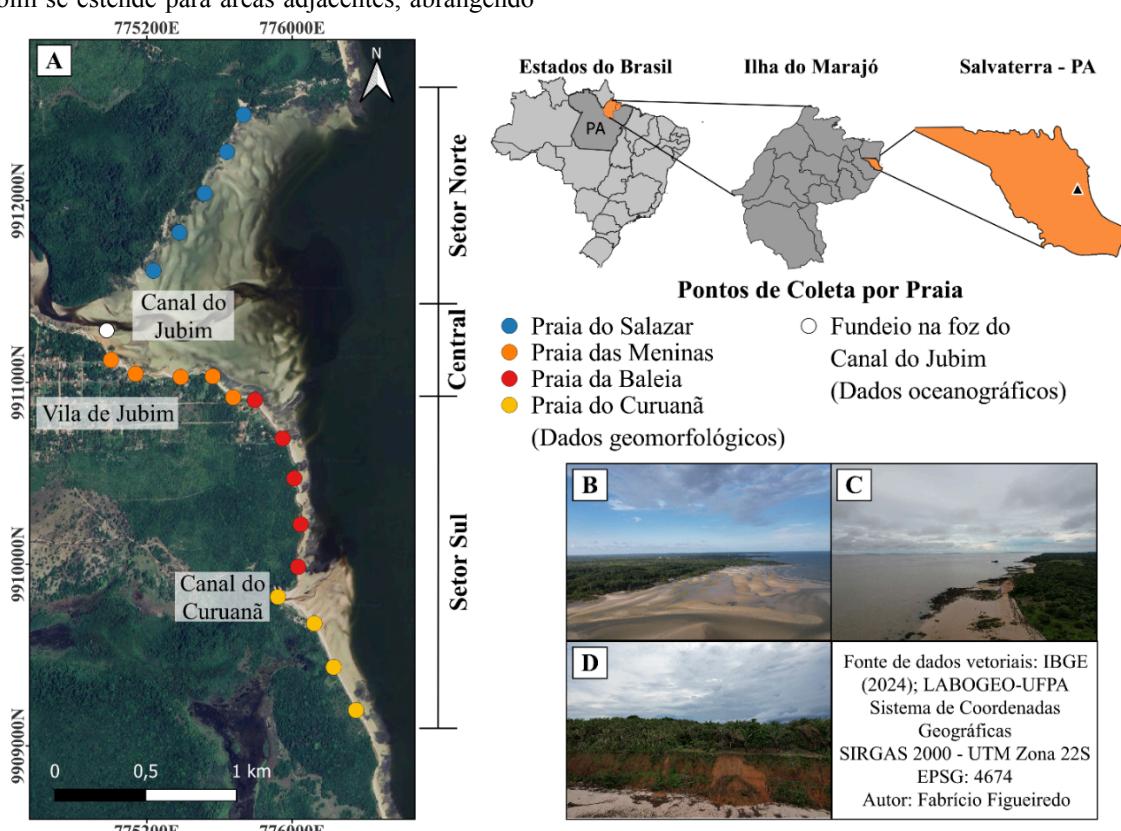


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, segmento costeiro da comunidade de Jubim. A) Área de estudo em detalhe, indicando os pontos de coleta de dados geomorfológicos e oceanográficos, nas quatro praias da Vila e na foz do canal do Jubim. B) Praia do Salazar, setor norte. C) Praia das Meninas, setor central. D) Praia da Baleia, setor sul.

Em Salvaterra, as planícies de intermaré, principalmente lamosa, ocupam o interior de paleovalves escavados no planalto costeiro, seguindo até o limite de influência das marés. As principais drenagens são representadas pelos canais Jubim e Curuanã, a cobertura vegetal é representada por florestas de mangue. Nas desembocaduras dos canais de maré, ocorre a formação de deltas de maré vazante. Esta morfologia é caracterizada pela presença de bancos arenosos de foz de canal, que ficam expostos na maré baixa (França & Souza Filho 2006).

A hidrografia da região é caracterizada por uma rede de drenagem formada por vários canais recentes, lagos e igarapés. Segundo Barboza et al. (2012), o movimento das águas atua como um elemento definidor da paisagem local, onde se destacam as várzeas e os igapós. A hidrografia e a dinâmica das marés têm grande importância para a economia da comunidade devido aos aspectos como: a) meio de transporte e comunicação entre a grande maioria das cidades e vilas; e b) potencial pesqueiro e extrativista. A região é dominada por meso a macromarés semidiurnas com amplitudes que variam de 2 a 5 m (El-Robrini et al. 2018).

Com o intuito de facilitar as análises e comparações dos resultados na área de estudo, esta foi segmentada em três setores distintos (norte, central e sul). A adoção dessa zonação justifica-se pela presença do canal de Jubim, que divide a região e impõe dificuldades ao processo de digitalização da linha de costa. Além disso, as regiões apresentam um contraste na compartimentação do relevo, na geologia, topografia e na distribuição de ecossistemas, onde distingue-se duas principais unidades morfológicas: planície costeira e planalto costeiro (ou tabuleiro costeiro) (França & Souza Filho 2006). O setor norte, abrange a praia do Salazar, que está inserido às margens do manguezal e sobre a planície costeira, enquanto que os setores Central (praia das Meninas) e Sul (praias da Baleia e do Curuanã), estão sobre o planalto costeiro.

3. Material e Métodos

De maneira geral, a metodologia da pesquisa abrangeu coleta de dados *in situ* (análises observacionais, medições com equipamento de aerofotogrametria e instrumentação oceanográfica), bem como técnicas de geoprocessamento para análise de variação da linha de costa por meio de imagens de satélite. O fluxograma a seguir (Fig. 2) apresenta os parâmetros necessários para compor o dado final deste estudo, o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC).

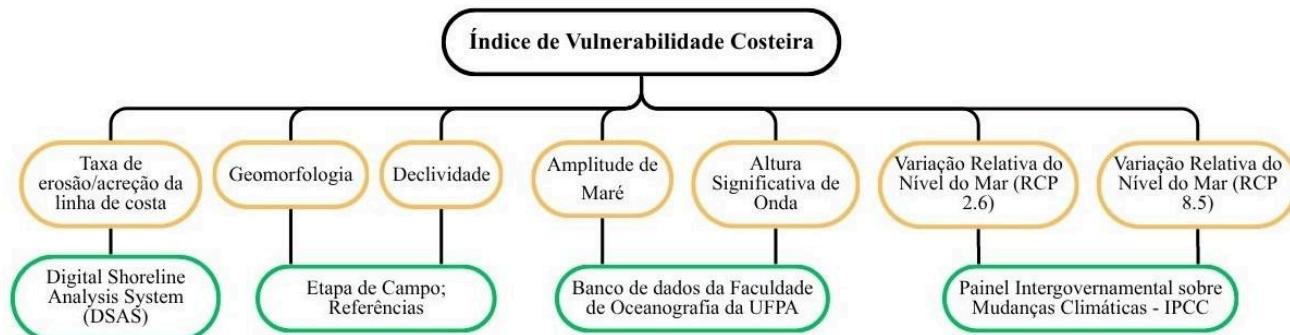


Figura 2: Organograma do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) considerando duas projeções de elevação do nível médio do mar. Seleção de coloração verde: materiais e métodos; seleção de coloração amarela: variáveis físicas e oceanográficas; seleção de coloração preta: resultados. Organização: Autores.

O IVC é uma metodologia para avaliar os impactos da erosão costeira através de grupos de variáveis, que englobam aspectos físicos e dinâmicos referentes a um segmento de linha de costa (Thieler & Hammar-Klose 1999). As variáveis físicas utilizadas nesta pesquisa englobam aspectos relacionados à geomorfologia, à declividade do terreno e às taxas de erosão e/ou acréscimo da linha de costa. Por outro lado, as variáveis dinâmicas compreendem a amplitude da maré, a altura significativa das ondas (H_s) e a variação do nível médio do mar (NMM). O peso destas variáveis é expresso numericamente por meio de cinco classes: (1) muito baixa; (2) baixa; (3) moderada; (4) alta e (5) muito alta, onde o menor valor indica menor vulnerabilidade, enquanto o maior valor representa a condição mais crítica. Este estudo analisa o IVC considerando duas projeções de elevação do NMM, conforme diretrizes do IPCC quanto ao “Caminho Representativo de Concentração” – *Representative Concentration Pathway*

(RCP) 2.6 e 8.5 adotado no Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC.

O valor de cada RCP se refere ao incremento da força radiativa na atmosfera em W/m^2 estimado para o final de 2100 comparado com o período pré-industrial (Van Vuuren et al. 2011), e considerando o balanço de radiação (razão entre a quantidade de radiação que entra e sai da Terra), de acordo com as concentrações de gases de efeito estufa, aerossóis e tipos de cobertura terrestre. No RCP 2.6, o forçamento radiativo atinge o pico em aproximadamente 3 W/m^2 antes de 2100 e depois declina para $2,6 \text{ W/m}^2$ em 2100. Cenário desenvolvido pela equipe de modelagem IMAGE da Agência de Avaliação Ambiental dos Países Baixos (Van Vuuren et al. 2007). No RCP 8.5, o forçamento radiativo atinge $8,5 \text{ W/m}^2$ até 2100 e continua a aumentar por algum tempo. Cenário desenvolvido pela equipe de modelagem MESSAGE e pelo Quadro de Avaliação Integrada do

Instituto Internacional de Análise de Sistemas Aplicados (IIASA) (Riahi et al. 2007).

3.1 Geomorfologia e Declividade (°)

Foram realizadas visitas *in loco* à Vila de Jubim em 15 de abril de 2023, de 22 a 25 de março de 2024 e de 6 a 10 de junho de 2024, com o objetivo de coletar dados oceanográficos e geomorfológicos.

A declividade praial (°), correspondente à zona de entremarés — compreendida entre a linha de preamar (limite superior) e a linha de baixa-mar (limite inferior) — foi obtida a partir de medições de cotas topográficas realizadas em ambos os limites, distribuídas em 19 pontos equidistantes (200 m) ao longo das praias (Fig. 1). A aquisição das cotas topográficas nesses locais foi realizada por meio do equipamento Estação Total, visando à posterior determinação da declividade praial. Em junho de 2024, efetuaram-se sobrevoos com o drone DJI Mavic Air 2S para a geração do ortomosaico e do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo, abrangendo toda a Vila de Jubim.

Utilizou-se cálculo trigonométrico para analisar a declividade da face praial a partir da Eq. 1:

Tabela 1: Classificação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) segundo o *United States Geological Survey (USGS)*, considerando seis variáveis que englobam fatores físicos e dinâmicos.

| | Muito Baixo | Baixo | Moderado | Alto | Muito Alto |
|--|---------------------------|-------------|------------------------------------|---|---|
| Grau de Risco | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Geomorfologia | Costão Rochoso; Duna Fixa | Falésias | Planície Costeira; Terraço Marinho | Estuários; Dunas Móveis; Cordões Litorâneos | Praia Arenosa; Escarpas de Praia; Recifes de Corais; Deltas |
| Declividade (°) | $\geq 1,9$ | 1,3 – 1,9 | 0,9 – 1,3 | 0,6 – 0,9 | < 0,6 |
| Taxa de Erosão/Acreção da LC (m/ano) | $\geq 2,0$ | 1,0 – 2,0 | -1,0 – +1,0 | -1,1 – -2,0 | < -2,0 |
| Variação Relativa do Nível do Mar (mm/ano) | < 2,0 | 2,0 – 3,0 | 3,0 – 4,0 | 4,0 – 5,0 | > 5,0 |
| Amplitude de Maré (m) | $\leq 0,99$ | 1,0 – 1,9 | 2,0 – 4,0 | 4,1 – 6,0 | $\geq 6,1$ |
| Altura Significativa de Onda (m) | < 0,55 | 0,55 – 0,85 | 0,85 – 1,05 | 1,05 – 1,25 | > 1,25 |

Durante as três campanhas de campo foram avaliadas as distintas feições geomorfológicas na linha de costa, delimitando-as com um par de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema de Navegação Global via Satélite), a fim de se obter o posicionamento geográfico delas.

O par de receptores GNSS foi utilizado em paralelo aos sobrevoos a fim de se obter pontos de controle com coordenadas geográficas precisas ao longo das praias imageadas, para posterior correção das coordenadas obtidas com o drone. Tais processos foram realizados

$$Tg\beta = \frac{(HLMA-HLMB)}{(DLMA-DLMB)} \quad (1)$$

Sendo que: HLMA representa a altura marcada na Linha de Maré Alta; HLMB: Altura marcada na Linha de Maré Baixa; DLMA: Distância marcada na Linha de Maré Alta; e DLMB: Distância marcada na Linha de Maré Baixa.

A variável geomorfologia foi analisada por referências bibliográficas, como o mapa morfológico da costa leste da Ilha do Marajó, elaborado por França & Souza Filho (2006) e, pelas observações *in loco*. As definições atribuídas para cada feição e forma costeira estão de acordo com as nomenclaturas propostas pelo IVC – USGS. O grau de risco relacionado a estas feições e processos oceanográficos é utilizado pelo USGS com similaridade à vulnerabilidade costeira, já presumindo impactos inerentes aos seres vivos, envolve fatores físicos e dinâmicos, conforme demonstrado na Tabela 1.

posteriormente no software Agisoft Metashape 2.0.0, e fornecem uma visão geral da geomorfologia local.

3.2 Taxa de Erosão/Acreção da Linha de Costa (m/ano)

Por meio de técnicas de Sensoriamento Remoto, avaliou-se a variação da linha de costa do litoral de Jubim nos anos de 1990, 2002, 2013 e 2023. Para tal, foram utilizadas imagens dos sensores TM, ETM+ e OLI/TIRS, obtidas, respectivamente, pelos satélites Landsat 5, 7 e 8. As bandas multiespectrais apresentam resolução espacial de 30 metros, enquanto a banda pancromática do Landsat 8 (OLI/TIRS) possui resolução

de 15 metros. Todas as imagens foram adquiridas no portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos

(United States Geological Survey – USGS), disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov> (Tabela 2).

Tabela 2: Especificações das imagens de sensoriamento remoto, constando informações sobre data de aquisição, sensores, satélites, resolução espacial, estado da maré e ocorrência ou não de eventos climáticos extremos.

| Data de Aquisição | Satélite | Sensor | Bandas | Resolução Espacial | Maré | Eventos Extremos |
|-------------------|-----------|----------|---------|--------------------|----------|------------------|
| 09/05/1990 | Landsat 5 | TM | 3, 4 | 30m | Vazante | El Niño |
| 07/09/2002 | Landsat 7 | ETM+ | 3, 4 | 30m | Vazante | El Niño |
| 18/07/2013 | Landsat 8 | OLI/TIRS | 4, 5, 8 | 30m (15m) | Enchente | S/ ocorrência |
| 23/07/2023 | Landsat 8 | OLI/TIRS | 4, 5, 8 | 30m (15m) | Vazante | La Niña |

As bandas do espectro visível e do infravermelho próximo dos satélites Landsat foram utilizadas para a identificação de superfícies terrestres e corpos d'água ao longo da linha de costa. As faixas do espectro infravermelho são particularmente eficazes na diferenciação entre ambientes aquáticos e terrestres, pois a energia do infravermelho médio é fortemente absorvida pela água, enquanto a vegetação, a areia e outros elementos costeiros apresentam alta reflectância nessa região espectral (Alesheikh et al. 2007).

Dessa forma, nesta pesquisa, optou-se pela aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que, segundo Mishra et al. (2019), apresenta maior eficiência em comparação a outros métodos, proporcionando maior precisão na detecção da linha de costa.

A análise multitemporal da linha de costa constitui um dos principais indicadores empregados em investigações relacionadas ao risco de erosão costeira (Novak & Lamour 2021). O método adotado para a definição dessas variáveis envolveu a escolha de imagens, o pré-processamento de dados digitais, georreferenciamento, a identificação do posicionamento da linha de costa no período de 1990 a 2023 e a aplicação da ferramenta *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) no software ArcGIS 10.5, pelo método EPR (*End Point Rate*) para a determinação das taxas de erosão e acreção (metros/ano), utilizadas no cálculo do IVC.

De acordo com a definição apresentada por Maiti & Bhattacharya (2009), índices positivos nas taxas de variação apontam para o avanço da linha de costa em direção ao oceano ou ao estuário, indicando processos de sedimentação ou acréscimo costeiro. Por outro lado, valores negativos sinalizam o recuo da linha de costa em direção à ilha, evidenciando fenômenos erosivos.

A incerteza posicional das linhas de costa foi estimada a partir do Erro Médio Quadrático da Raiz (RMSE), indicador da precisão média de localização das feições. Para as imagens Landsat utilizadas, adotou-se o valor de 15 m, correspondente à precisão planimétrica nominal dos produtos ortorretificados disponibilizados pelo USGS (2020). Esse valor foi convertido em unidades de m/ano e aplicado aos intervalos 1990-2002, 2002-2013 e 2013-2023, resultando em RMSE de 1,25; 1,36 e 1,50 m/ano, respectivamente. Considerando que cada intervalo temporal contribui de forma proporcional para a incerteza global, calculou-se o RMSE total

(RMSE_{total}) por meio de média quadrática ponderada, conforme a Equação 2:

$$RMSE_{total} = \frac{\sqrt{\sum (w_i \times RMSE^2 i)}}{\sum w_i} \quad (2)$$

RMSE_i representa a incerteza do subperíodo *i* e *w_i* corresponde à sua duração em anos. Aplicando os valores obtidos e os pesos temporais (12, 11 e 10 anos), obteve-se RMSE_{total} ≈ 1,37 m/ano. Esse valor agregado foi utilizado como limiar comum na classificação padronizada das taxas de variação (Erosão/Estabilidade/Acreção), possibilitando a comparação direta entre diferentes períodos.

Adicionalmente, para reduzir discrepâncias espaciais entre cenas e assegurar a comparabilidade temporal, realizou-se o co-registro das imagens no software QGIS, utilizando o Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) (Congedo 2021). A imagem de 2023 foi definida como referência, devido à sua ortorretificação mais recente, e as demais datas foram alinhadas automaticamente com base em feições comuns.

A banda do infravermelho próximo (NIR) foi empregada para realçar elementos estáveis da paisagem, como corpos d'água e vegetação (Jensen 2015, Lu & Weng 2007). O método de transformação geométrica adotado foi o Affine (Polynomial 1), adequado para corrigir translação, rotação e escala (Goslee 2011), enquanto a reamostragem cúbica (cubic convolution) garantiu a preservação da continuidade radiométrica (Richards & Jia 2006).

Todas as imagens foram reprojetadas para o sistema UTM, Zona 22S, Datum SIRGAS 2000. O RMSE final permaneceu abaixo de 1 pixel (30 m), dentro dos limites aceitos para análises multitemporais (Foody 2002; Chander et al. 2009).

3.3 Uso e Cobertura do Solo

Para a confecção do mapa de uso e cobertura do solo, utilizou-se uma imagem do satélite Sentinel , com resolução de 10 m (ano 2024), empregando a ferramenta de Image Classification no software ArcGIS 10.5. A classificação supervisionada é um método amplamente utilizado para a análise e classificação de imagens de satélite, como instruções fornecidas pelo MapBiomas (2024). Esse método permite identificar e categorizar diferentes tipos de cobertura do solo a partir de um conjunto de dados de treinamento, com base em amostras de classe conhecidas.

3.4 Variação Relativa do Nível do Mar (VRNM)

As referências utilizadas para a variação do nível do mar foram extraídas das projeções do IPCC, relatório SROCC 2019 (*Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, 2019). Neste trabalho utilizaram-se dois cenários, um mais otimista e outro mais pessimista para área de estudo, representada pelo *Representative Concentration Pathway* - RCP 2.6 com projeção de 4,0 mm/ano de elevação do NMM até 2100 e RCP de 8.5 com projeção de 15,0 mm/ano até 2100.

3.5 Parâmetros Oceanográficos

Os parâmetros oceanográficos foram coletados em abril de 2023. Utilizou-se o sensor OBS (*Optical Backscatter Sensors*), modelo Infinity-turbi ATU75W-USB da JFE-Advantech, fundeado após a linha de maré baixa da praia das Meninas (Fig. 1). Este ponto de medição foi usado como réplica para as demais praias estuarinas estudadas, visto que todas apresentam similaridade (baixo domínio de ondas/pequenas ondulações).

O equipamento utilizado foi configurado para registrar cinco medições a cada segundo, ou 5 hertz (Hz), abrangendo assim registros de altura de onda e de maré, durante o período de 13 horas (próximo de 1 ciclo de maré). A variável altura significativa de ondas (Hs) foi determinada através da média do terço mais alto das ondas (H1/3), calculada sobre as observações realizadas durante 13 horas. Neste mesmo período pode-se registrar a amplitude de maré da baixa-mar à preamar.

3.6 Cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)

O IVC é quantificado em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), a partir do método *smartiline*, no qual se baseia em uma representação vetorial da linha de costa, permitindo a atribuição de atributos espaciais e classificações de vulnerabilidade em diferentes segmentos do litoral. Ele facilita a interpretação dos processos costeiros ao integrar dados geoespaciais em uma abordagem sistemática e visualmente intuitiva. Após a divisão dos segmentos, o índice foi determinado com base na Eq. 3

$$IVC = \frac{\sqrt{a \times b \times c \times d \times e \times f}}{6} \quad (3)$$

As variáveis consideradas para o cálculo do IVC incluem a característica geomorfológica (*a*), a inclinação da zona costeira (*b*), a taxa de variação da linha de costa por erosão ou acréscimo (*c*), a amplitude das marés (*d*), a altura significativa das ondas (Hs) (*e*) e a variação do nível médio do mar (NMM) (*f*). Os dados

foram processados e examinados para a obtenção dos valores de média, mediana e moda, seguindo o critério adotado para a elaboração do Mapa de IVC, baseado na distribuição percentilica de 25°, 50° e 75°, conforme a metodologia estabelecida por Pendleton et al. (2004).

Nesse contexto, valores situados abaixo do 25° percentil são classificados como de baixa vulnerabilidade, aqueles entre os percentis 25° e 50° indicam vulnerabilidade moderada, enquanto os intervalos entre 50° e 75° percentil correspondem a alta vulnerabilidade. Por fim, valores superiores ao 75° percentil são considerados indicativos de vulnerabilidade muito alta.

4. Resultados

4.1 Geomorfologia

A Figura 3 ilustra as principais feições geomorfológicas das áreas costeiras de Jubim. Dentre essas feições, destacam-se o planalto costeiro, caracterizado por baixos platôs com altitudes variando entre 5 e 20 metros acima do nível do mar; a planície de intermaré, que apresenta relevo suavizado e se estende pelo interior de paleovalves até o limite da influência das marés; os cordões arenosos atuais, correspondentes às praias; e os deltas de maré vazante, que se distinguem pela presença de dois ou mais canais rasos, separados por bancos arenosos expostos durante a maré baixa.

O setor norte, correspondente à praia do Salazar, é caracterizado por uma ampla zona de intermaré areno-lamosa e um baixo gradiente topográfico, enquanto a região de pós-praia é composta por vegetação de mangue.

O setor central, correspondente à praia das Meninas, é caracterizado pela presença de cordões arenosos de menor extensão e pela ocorrência de um delta de maré vazante. No setor sul, as praias da Baleia e do Curuanã apresentam variação na elevação topográfica ao longo do segmento litorâneo. A praia da Baleia é delimitada por falésias ativas e promontórios esculpidos no planalto costeiro, cujo gradiente topográfico decresce novamente em direção à praia do Curuanã (planície arenosa) (Fig. 4).

4.1 Declividade da Costa na Zona Entremarés

A variável declividade foi classificada em cinco categorias de vulnerabilidade, variando de muito baixa a muito alta, ao longo das quatro praias de Jubim (Fig. 5). Os índices obtidos apresentaram valores entre os graus 1 e 5, conforme a Tabela 1, sendo considerado para o IVC o valor frequente em cada praia.

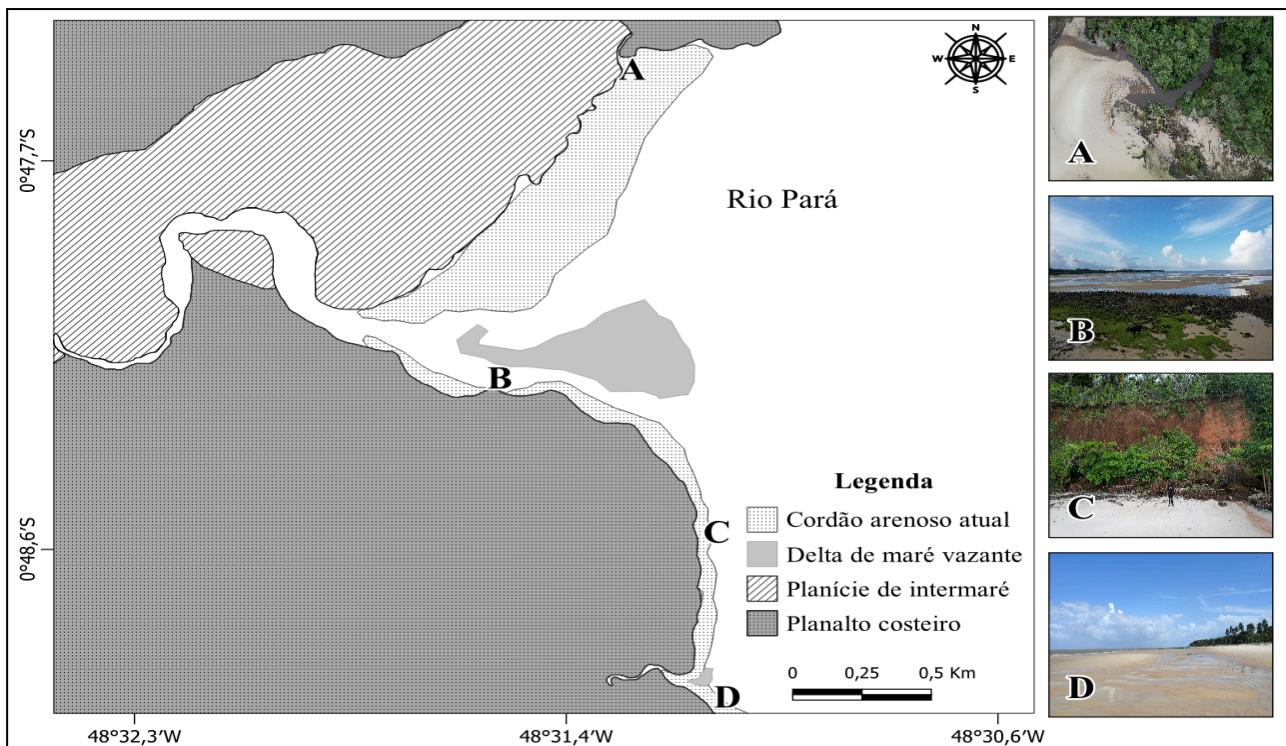


Figura 3: Unidades geomorfológicas da comunidade de Jubim, destacando cordão arenoso atual, delta de maré vazante, planície de intermaré e planalto costeiro. À direita, registros fotográficos de campo: (A) cordão arenoso vegetado por mangue; (B) área de intermaré e cordões arenosos; (C) frente de erosão no planalto costeiro (falésias ativas); (D) faixa arenosa de intermaré. Adaptado de França e Souza Filho (2006).

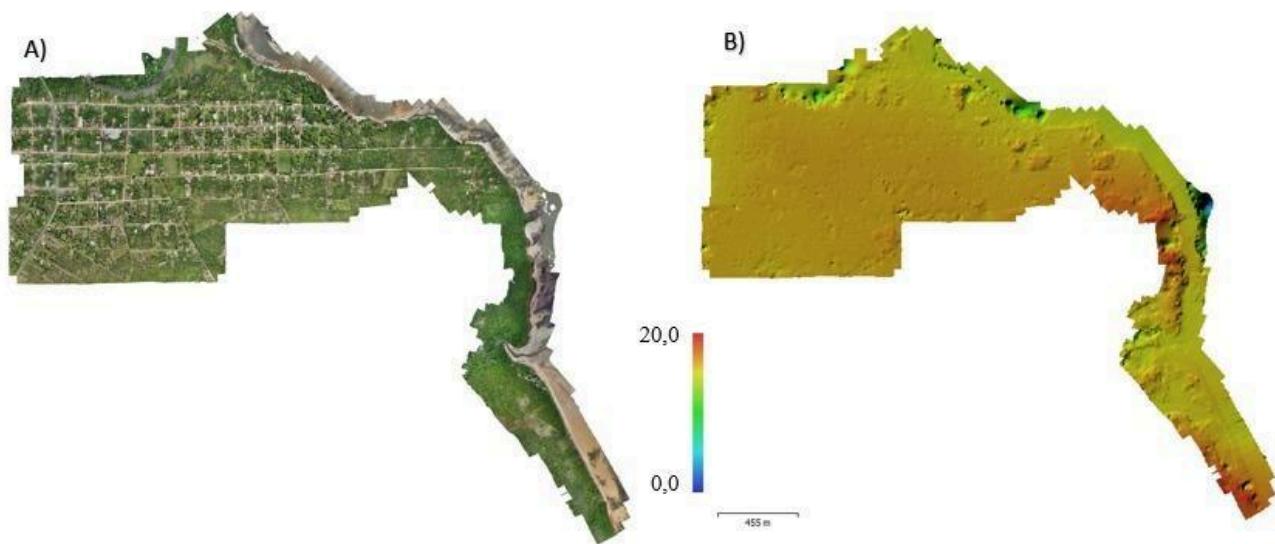


Figura 4: Ortomosaico (A); e o Modelo Digital de Elevação (B) da Vila de Jubim, confeccionados a partir de sobrevoo com drone, com tratamento no software Agisoft Metashape 2.0.0.

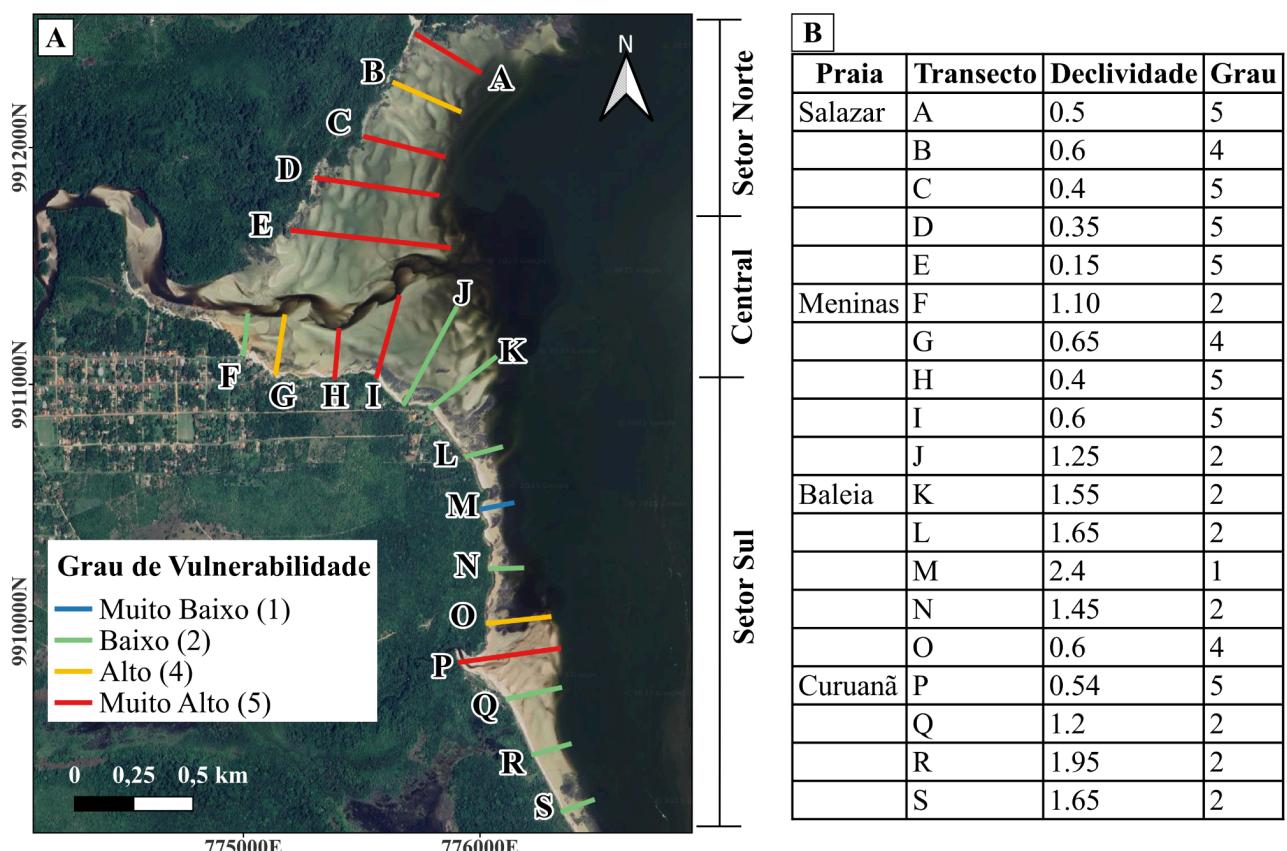


Figura 5: Grau de vulnerabilidade costeira em função do parâmetro Declividade. A) Transectos gerados a partir da ligação entre os pontos de maré alta e maré baixa (faixa entremarés). A escala de cores indica os diferentes graus de vulnerabilidade: azul (Muito Baixo), verde (Baixo), amarelo (Alto) e vermelho (Muito Alto). B) Valores da declividade para cada transecto.

O segmento norte, correspondente à praia do Salazar, exibiu predominantemente alta a muito alta vulnerabilidade, com valores de declividade entre 0,15° e 0,60° entre a Linha de Maré Alta (LMA) e a Linha de Maré Baixa (LMB). No segmento central, que abrange a praia das Meninas, a declividade variou entre 0,40° e 1,10°, indicando níveis de vulnerabilidade classificados como moderado a alto.

No segmento sul, que compreende as praias da Baleia e do Curuanã, os valores de declividade praial oscilaram entre 0,55° e 2,40°, resultando em níveis de vulnerabilidade que variaram de muito baixo a muito alto em determinados pontos. Os maiores valores de declividade foram observados na praia da Baleia.

4.2 Variação da Linha de Costa (LC)

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise da dinâmica da linha de costa da comunidade de Jubim no período de 1990 a 2023. Os cálculos foram realizados por meio da ferramenta DSAS, considerando os parâmetros *Net Shoreline Movement* (NSM) e *End Point Rate* (EPR), bem como as incertezas associadas ao erro médio quadrático (RMSE), estimadas em 1,25 m/ano (1990–2002), 1,36 m/ano (2002–2013) e 1,50 m/ano (2013–2023). Os resultados evidenciaram padrões diferenciados de recuo, estabilidade e acréscimo nos três setores delimitados (Norte, Central e Sul).

No setor Norte, correspondente à praia do Salazar,

verificou-se um quadro marcadamente erosivo (Fig. 6). Em áreas críticas, o deslocamento máximo da linha de costa atingiu aproximadamente -189,73 m, resultando em uma taxa média de recuo de -1,71 m/ano. A análise temporal indica que, entre 1990 e 2002, o NSM médio foi de -35,46 m (EPR = -3,03 m/ano), valor superior ao RMSE, confirmando a robustez da tendência erosiva. No período seguinte (2002–2013), registrou-se avanço médio de 7,03 m (EPR = 0,62 m/ano), embora este valor se situe próximo à margem de incerteza (RMSE = 1,37 m/ano), devendo ser interpretado com cautela. No intervalo mais recente (2013–2023), a erosão intensificou-se (NSM médio = -58 m; EPR = -5,7 m/ano), consolidando este setor como o mais vulnerável do litoral estudado.

Tabela 3: Valores mínimos, médios, máximos e desvios-padrão dos parâmetros *Net Shoreline Movement* (NSM) e *End Point Rate* (EPR), obtidos a partir da ferramenta DSAS para os períodos de 1990-2002, 2002-2013, 2013-2023 e 1990-2023. Os resultados estão organizados por setores (Norte, Central e Sul) da área de estudo na comunidade de Jubim, região costeira amazônica.

| NORTE | | | | | |
|------------------|----------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| Parâmetro | Período | Mínimo | Médio | Máximo | Desvio Padrão |
| NSM (m) | 1990-2002 | -137,88 | -35,46 | 111,51 | $\pm 48,04$ |
| | 2002-2013 | -77,17 | -7,03 | 118,33 | $\pm 51,12$ |
| | 2013-2023 | -57,81 | -13,7 | 51,43 | $\pm 23,96$ |
| | 1990-2023 | -189,73 | -56,4 | 22,02 | $\pm 59,87$ |
| EPR (m/ano) | 1990-2002 | -11,81 | -3,03 | 9,55 | $\pm 4,11$ |
| | 2002-2013 | -6,89 | -0,62 | 10,57 | $\pm 4,56$ |
| | 2013-2023 | -5,77 | -1,36 | 5,13 | $\pm 2,39$ |
| | 1990-2023 | -5,77 | -1,71 | 0,67 | $\pm 1,82$ |
| CENTRAL | | | | | |
| Parâmetro | Período | Mínimo | Médio | Máximo | Desvio Padrão |
| NSM (m) | 1990-2002 | -90,28 | -40,13 | 0 | $\pm 15,84$ |
| | 2002-2013 | -12,87 | 16,28 | 51,1 | $\pm 16,77$ |
| | 2013-2023 | -38,81 | -1,82 | 21,92 | $\pm 13,56$ |
| | 1990-2023 | -70,77 | -25,69 | 12,32 | $\pm 18,06$ |
| EPR (m/ano) | 1990-2002 | -7,48 | -3,25 | 0 | $\pm 1,28$ |
| | 2002-2013 | -1,18 | 1,49 | 4,7 | $\pm 1,54$ |
| | 2013-2023 | -3,87 | -0,18 | 2,18 | $\pm 1,35$ |
| | 1990-2023 | -2,13 | -0,77 | 0,37 | $\pm 0,54$ |
| SUL | | | | | |
| Parâmetro | Período | Mínimo | Médio | Máximo | Desvio Padrão |
| NSM (m) | 1990-2002 | -62,88 | -28,84 | 2,03 | $\pm 15,07$ |
| | 2002-2013 | -3,29 | 21,25 | 78,66 | $\pm 17,08$ |
| | 2013-2023 | -20,33 | 4,87 | 24,93 | $\pm 8,64$ |
| | 1990-2023 | -12,44 | -2,99 | 47,8 | $\pm 15,39$ |
| EPR (m/ano) | 1990-2002 | -5,09 | -2,33 | 0,16 | $\pm 1,22$ |
| | 2002-2013 | -0,3 | 1,95 | 7,24 | $\pm 1,67$ |
| | 2013-2023 | -2,03 | 0,48 | 2,48 | $\pm 0,86$ |
| | 1990-2023 | -1,11 | -0,09 | 1,43 | $\pm 0,46$ |

O setor Central, onde se localiza a praia das Meninas, apresentou comportamento intermediário, caracterizado por indícios de estabilidade em determinados trechos, mas com predominância de processos erosivos. Para o período integral (1990-2023), a taxa média de recuo foi de -0,77 m/ano. Entre 1990 e 2002, observou-se NSM médio de -40 m (EPR = -3,25 m/ano), enquanto no intervalo de 2002 a 2013 os valores foram de -16,28 m para o NSM médio, e 1,49 para o EPR. Ambos os resultados superaram o RMSE, assegurando a consistência da tendência erosiva. Já entre 2013 e 2023, a intensidade do recuo diminuiu (NSM médio = -18 m; EPR = -1,8 m/ano), embora ainda superior à incerteza (RMSE = 1,37 m/ano), o que demonstra a permanência da vulnerabilidade costeira neste setor.

O setor Sul evidenciou maior heterogeneidade espacial. A linha de costa apresentou relativa estabilidade, com taxa média de variação de -0,09 m/ano, inferior ao valor de incerteza (RMSE = 1,37 m/ano), sugerindo uma tendência à estabilidade ou leve erosão sedimentar. Na praia do Curuanã foram registradas taxas positivas, entre +1,0 e +2,0 m/ano,

caracterizando um processo de acreção contínua (Fig. 4). Considerando o setor como um todo, o balanço (1990–2023) resultou em NSM médio de -2,99 m e EPR de -0,09 m/ano, valores menos expressivos em comparação aos setores Norte e Central.

De modo geral, os resultados apontam para uma tendência erosiva predominante ao longo da linha de costa da comunidade de Jubim, ainda que com significativa variabilidade espacial entre os setores. A comparação entre as taxas de EPR e os valores de RMSE confirma que, excetuando-se a praia da Baleia no setor Sul, a maioria dos resultados supera a margem de incerteza, conferindo robustez às interpretações. Assim, evidencia-se a necessidade de análises setorizadas para subsidiar estratégias de gestão costeira na região amazônica, considerando tanto áreas de forte erosão quanto trechos em equilíbrio ou acreção.

4.2 Uso e Cobertura do Solo

Os resultados obtidos a partir do mapa de uso e cobertura do solo revelam a distribuição das diferentes categorias de uso na área de estudo (Fig. 7).

A análise do uso e cobertura do solo em Jubim

evidencia um mosaico de classes que reflete a interação entre dinâmicas naturais e pressões antrópicas. A classe predominante corresponde às formações florestais (45,50%), distribuídas de maneira mais concentrada nas porções oeste e sul da área, funcionando como importantes remanescentes de vegetação nativa e de proteção ambiental. Essas áreas são complementadas por extensas faixas de manguezais (19,77%), principalmente ao longo das margens de cursos d'água e na transição com o estuário, confirmando a relevância desse ecossistema para a estabilidade da linha de costa e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos.

A agropecuária apresenta-se como uma das classes mais expressivas (18,24%), distribuída em grandes manchas contínuas e dispersas em áreas anteriormente florestadas, evidenciando a expansão de atividades produtivas sobre o território. Associada a essa classe, observa-se significativa presença de solo exposto e áreas urbanas (6,21%), especialmente no setor central do mapa, onde se concentram os núcleos habitacionais. Essa configuração espacial indica forte pressão sobre os recursos naturais e potencial contribuição para processos de degradação ambiental, como perda de cobertura vegetal, erosão e alteração do balanço sedimentar.

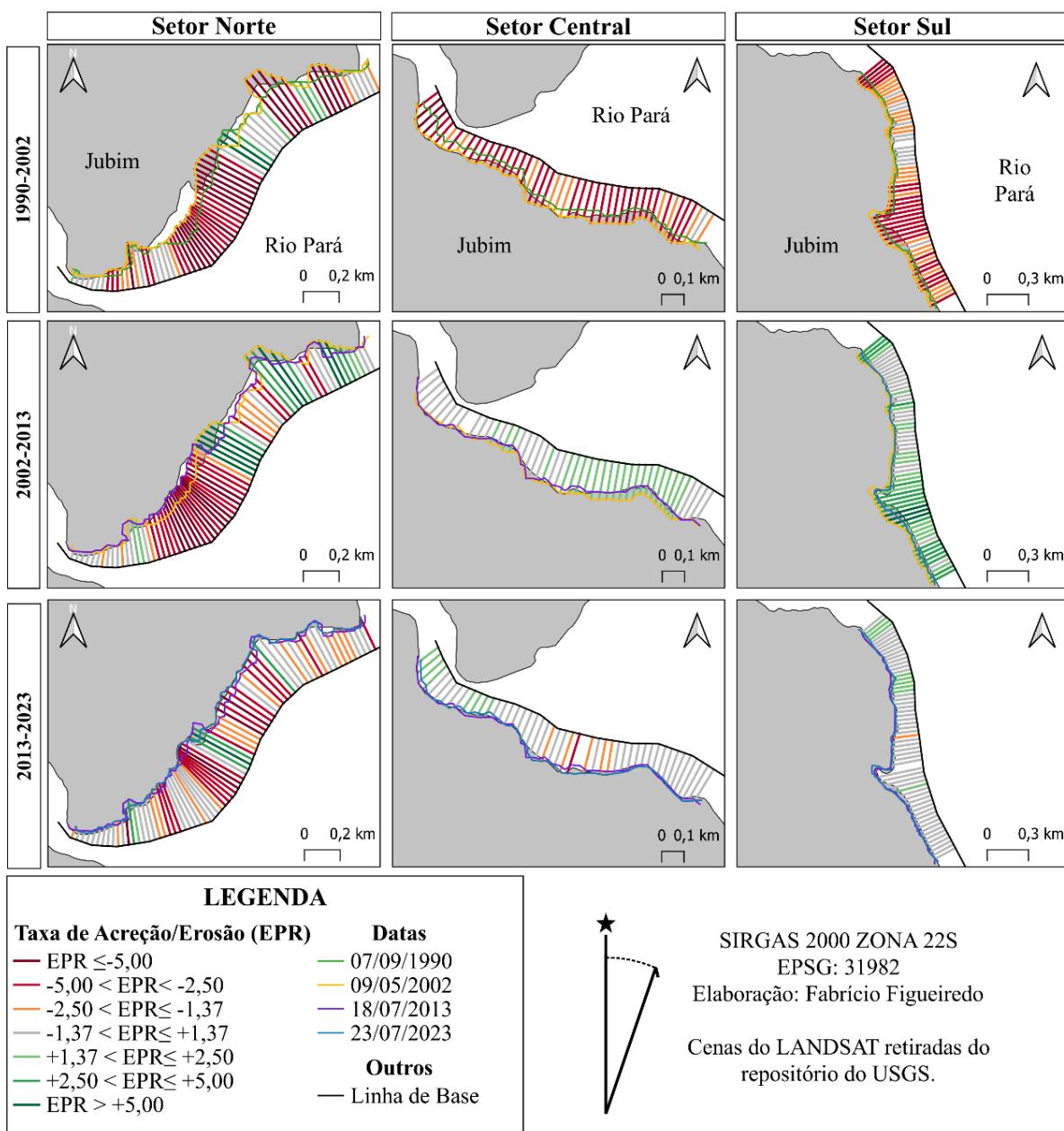


Figura 6: Variação espaço-temporal da linha de costa da comunidade de Jubim (setores Norte, Central e Sul) nos intervalos de 1990–2002, 2002–2013 e 2013–2023, obtida por meio da ferramenta Digital Shoreline Analysis System (DSAS). As classes de taxa de variação (EPR, em m/ano) foram padronizadas considerando o valor agregado do erro posicional ($\text{RMSE} = \pm 1,37 \text{ m/ano}$), permitindo a comparação direta entre os períodos analisados.

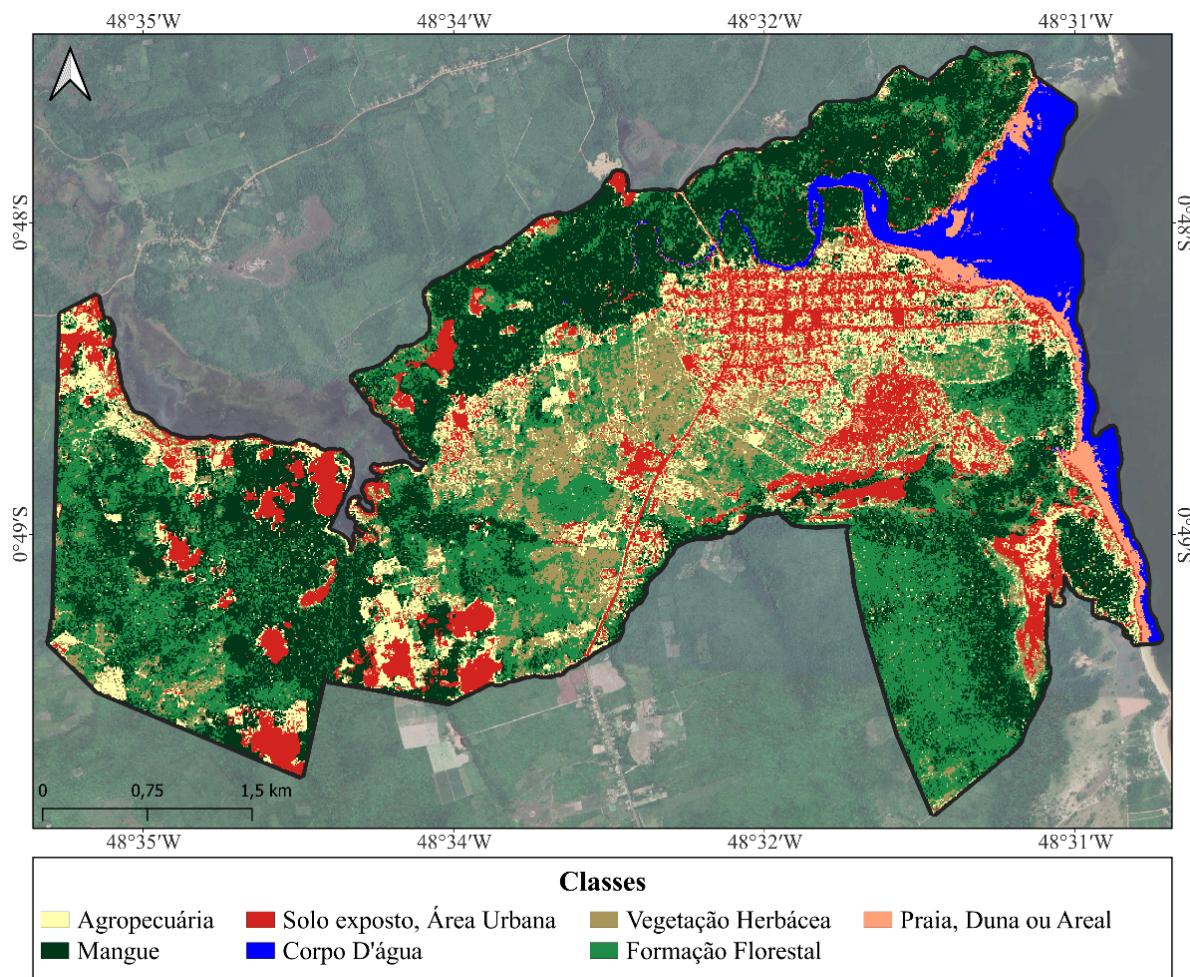


Figura 7: Mapa de uso e cobertura da terra da comunidade de Jubim obtido por classificação supervisionada, utilizando classes e cores da Coleção 9 do MapBiomas.

As classes de vegetação herbácea e praia/duna/areal aparecem em proporções menores (5,43% e 4,85%, respectivamente), mas desempenham papel importante na dinâmica ambiental local. A vegetação herbácea encontra-se principalmente em áreas de transição e clareiras abertas, enquanto as dunas e areais estão restritos ao setor leste, em contato direto com o oceano.

De forma geral, os resultados indicam que o território de Jubim encontra-se em um processo de transformação, marcado pelo avanço da agropecuária e da ocupação urbana sobre ambientes naturais, ao mesmo tempo em que ecossistemas-chave, como florestas e manguezais, ainda se mantêm como elementos estruturantes da paisagem. Essa configuração evidencia a necessidade de estratégias de planejamento territorial que conciliem a manutenção da cobertura vegetal com as demandas de uso do solo, de forma a reduzir a vulnerabilidade ambiental e garantir a sustentabilidade socioecológica da região.

4.3 Variação Relativa do Nível do Mar (VRNM) e Parâmetros Oceanográficos

A variação do nível do mar, a amplitude de maré e a altura significativa das ondas foram classificadas nos graus 3 (moderado) a 5 (muito alto) de vulnerabilidade. Conforme os dados do Representative Concentration Pathway (RCP) apresentados pelo IPCC et al. (2019), foram projetados dois cenários de elevação do nível do mar: o menos crítico, correspondente ao RCP 2.6, com uma taxa de aumento de 4,0 mm/ano até 2100, e o mais crítico, referente ao RCP 8.5, com elevação de 15,0 mm/ano até o mesmo período. Esses cenários foram enquadrados nos graus 3 a 5 de vulnerabilidade, respectivamente. A amplitude média de maré foi de 3,10 m, enquanto a altura significativa das ondas atingiu 0,12 m, indicando vulnerabilidade de grau 3 e 1, respectivamente. A Figura 8 apresenta a altura das ondas em centímetro, ao longo do período analisado.

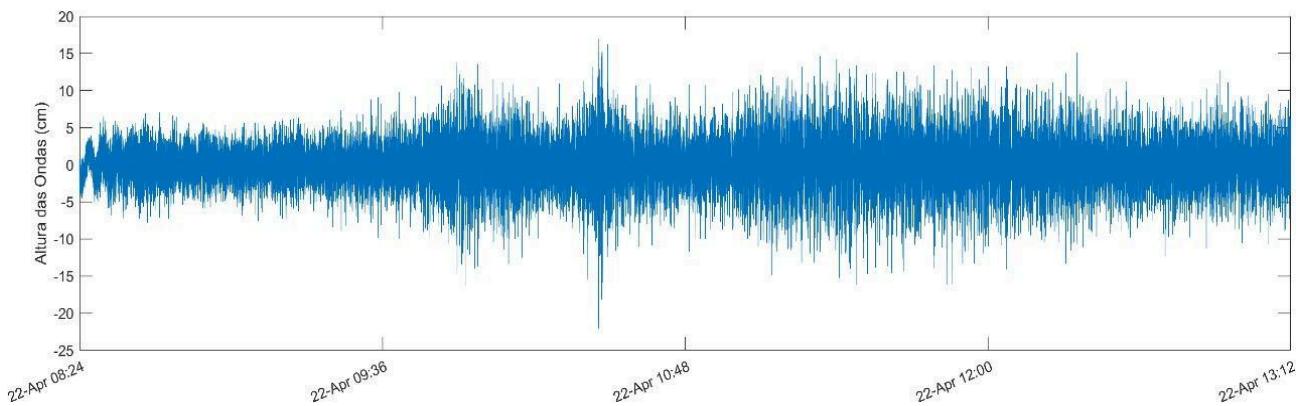


Figura 8: Altura das ondas (cm), durante o período fundeado na praia das Meninas.

4.4 Índice de Vulnerabilidade Costeira – IVC

A Tabela 4 apresenta os índices de vulnerabilidade, bem como as variáveis físicas e dinâmicas utilizadas na Eq. 2, conforme a metodologia proposta pelo USGS.

Tabela 4: Classificação do Índice de Vulnerabilidade Costeira

Esses índices são categorizados em cinco níveis, variando de 1 a 5, correspondendo, respectivamente, aos graus de vulnerabilidade: muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta.

| Praia | Geomorfologia | Declividade (°) | Taxa de Erosão/Acreção da LC (m/ano) | Amplitude de Maré (m) | Altura Significativa de Onda (m) | RCP 2,6 (mm/ano) | RCP 8,5 (mm/ano) |
|---------|---------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------------|------------------|------------------|
| Salazar | 5 | 5 | 4 | 3 | 1 | 3 | 5 |
| Meninas | 4 | 4 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 |
| Baleia | 2 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | 5 |
| Curuanã | 5 | 3 | 3 | 3 | 1 | 3 | 5 |

A Figura 9 apresenta resultados discretizados para cada uma das variáveis físicas e dinâmicas dos segmentos litorâneos de Jubim. Os resultados para a

declividade da costa sugerem que o segmento norte, correspondente à praia do Salazar, apresenta maior vulnerabilidade.

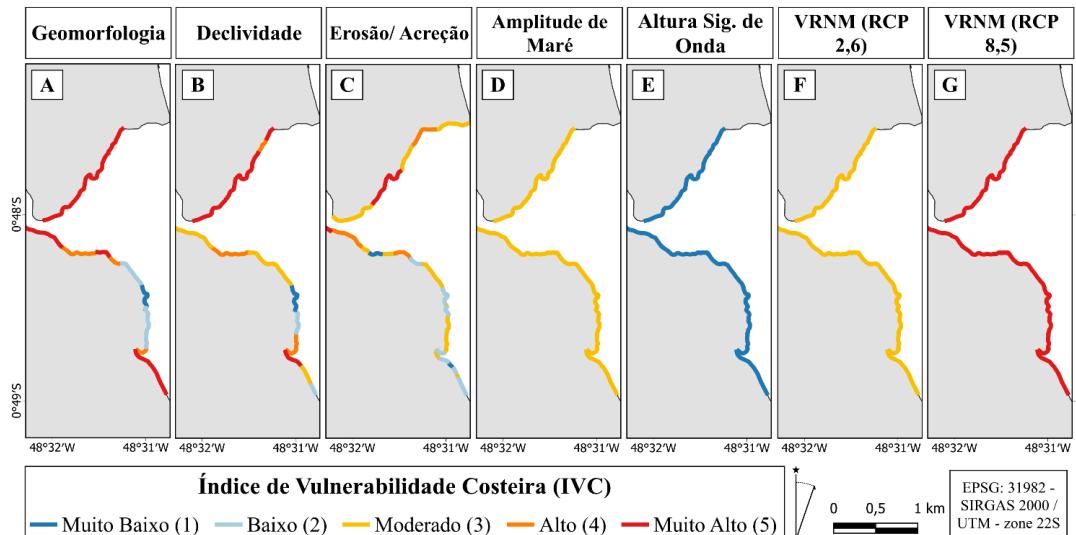


Figura 9: Parâmetros utilizados para o cálculo do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) na comunidade de Jubim. Os painéis representam: (A) geomorfologia, (B) declividade, (C) erosão/acríscimo, (D) amplitude de maré, (E) altura significativa de onda, (F) variação relativa do nível do mar (VRNM) no cenário RCP 2,6, e (G) VRNM no cenário RCP 8,5. As classes de vulnerabilidade foram organizadas em cinco níveis: Muito Baixo (1), Baixo (2), Moderado (3), Alto (4) e Muito Alto (5).

Na variável geomorfológica, os setores de maior vulnerabilidade correspondem aos segmentos do norte e a pontos específicos do segmento sul, onde se observa a presença de extensas faixas arenosas e cordões litorâneos. No entanto, em parte do segmento sul, especificamente na praia da Baleia, a vulnerabilidade

quanto à geomorfologia costeira é classificada como baixa, devido à presença de falésias ao longo da extensão da praia. No segmento central, caracterizado pela ocorrência de cordões litorâneos, delta e escarpas de praia, a vulnerabilidade geomorfológica é classificada como alta. As taxas médias de variação da

linha de costa indicam alto grau de vulnerabilidade na praia do Salazar (setor norte) e um nível moderado nas praias das Meninas (setor central) e Curuanã (setor sul, em pontos específicos). No segmento sul, observa-se um cenário de estabilidade a acreção sedimentar, o que sugere condições de vulnerabilidade entre moderada e muito baixa.

Com base nas projeções de elevação do nível do mar estabelecidas pelo IPCC, em que o cenário conservador (RCP 2.6) prevê um aumento de 4,0 mm/ano e o cenário mais crítico (RCP 8.5) projeta uma elevação de 15,0 mm/ano até 2100, foi elaborado um mapa do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC). A construção desse mapa considerou a ponderação dos índices de vulnerabilidade das variáveis físicas e dinâmicas

analisadas. Os resultados obtidos por meio da Equação 1 variaram entre 7,34 e 30,61, com valores médios, modais e medianos de 19,92, 23,71 e 18,97, respectivamente. A análise estatística indicou um desvio padrão de 6,17. Os percentis calculados para o Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) foram de 15,00 para o 25º percentil, 18,97 para o 50º percentil e 23,71 para o 75º percentil.

Dessa forma, a classificação dos graus de vulnerabilidade foi estabelecida da seguinte maneira: valores inferiores ao 25º percentil correspondem ao grau 1 (baixo), entre o 25º e o 50º percentil ao grau 2 (moderado), entre o 50º e o 75º percentil ao grau 3 (alto) e valores superiores ao 75º percentil ao grau 4 (muito alto) (Fig. 10).

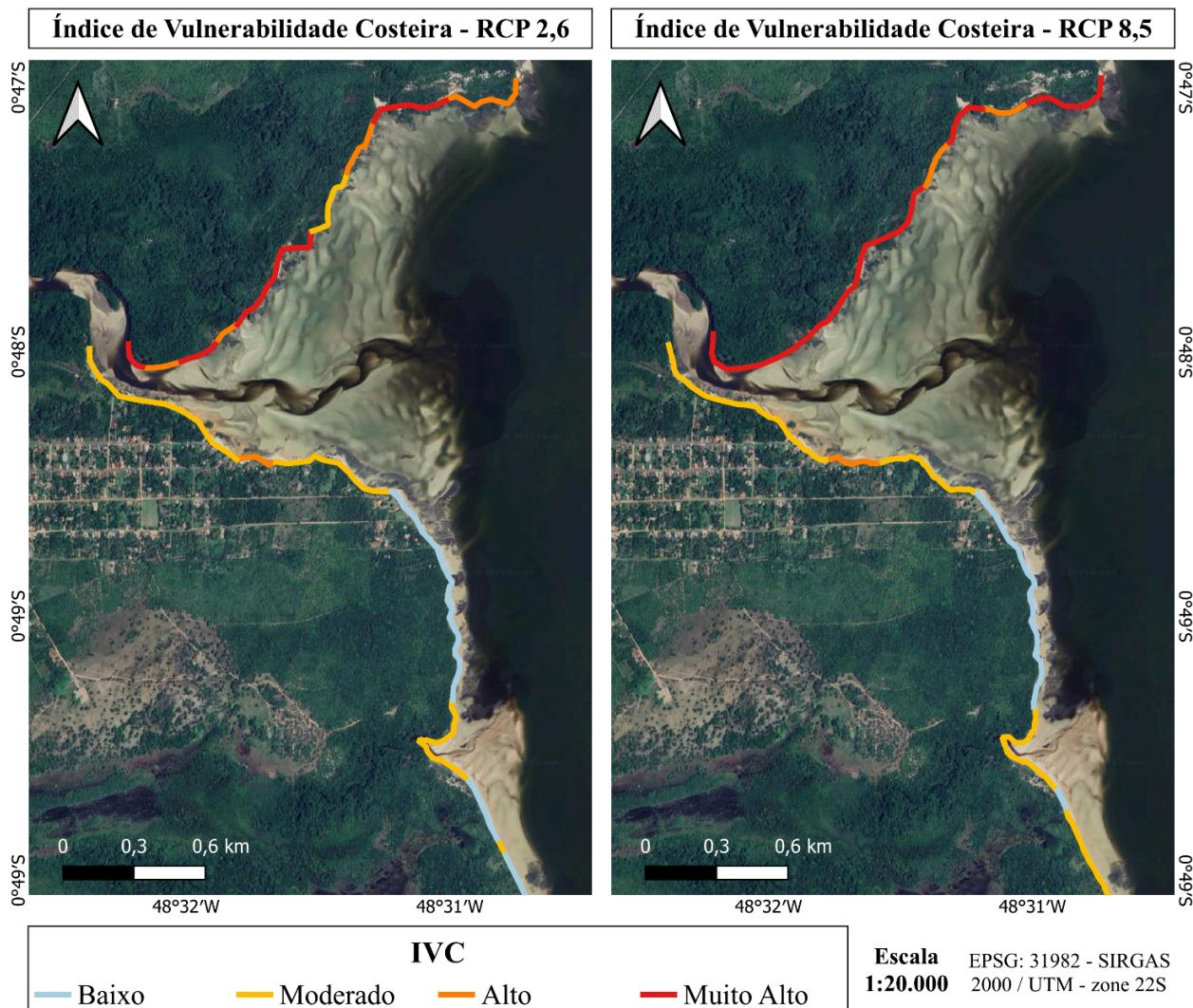


Figura 10: Mapa de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) do litoral da comunidade de Jubim, utilizando como base dois resultados da Variação do Nível Médio do Mar (NMM): RCP 2,6 (4,0 mm/ano) e RCP 8,5 (15,0 mm/ano).

5. Discussões

Os resultados referentes a cada variável seguiram integralmente o método do índice de vulnerabilidade costeira proposto por Thieler & Hammar-Klose (1999) e Pendleton et al. (2010). Estudos brasileiros que aplicaram esse método geralmente indicam a necessidade de adaptações locais (Osilieri et al. 2020).

No entanto, no presente estudo, os valores das seis variáveis analisadas na costa da comunidade de Jubim foram quantificados sem modificações, seguindo rigorosamente os critérios do IVC - USGS, visto que são coerentes à zona costeira amazônica.

O mapa de Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC) foi elaborado com base nas duas projeções de elevação

do nível médio do mar propostas pelo IPCC e utilizadas nesta pesquisa. Os dados analisados neste estudo indicam que a projeção referente ao RCP 2.6 (cenário otimista de elevação do nível do mar de 4,0 mm/ano até 2100) resultou em um índice moderado de vulnerabilidade costeira ao longo de 28,28% da extensão do litoral estudado, que corresponde a aproximadamente 4,7 km, seguido por 27,30% de áreas classificadas com baixa vulnerabilidade.

Por outro lado, a aplicação do RCP 8.5 (cenário crítico de elevação do nível do mar de 15,0 mm/ano até 2100) revelou valores mais expressivos em toda a área analisada. Ao longo da linha de costa, predominou a vulnerabilidade moderada, abrangendo 30,30% da extensão total, com destaque para a praia do Curuanã (setor sul), onde esse nível de vulnerabilidade se intensificou, elevando a classificação de baixa vulnerabilidade observada no cenário otimista para moderada no cenário de elevação crítica do nível médio do mar.

No setor norte, a erosão intensa identificada, com recuos superiores a 100 m em determinados pontos, está provavelmente associada à exposição mais direta à energia hidrodinâmica, incluindo ondas locais e

correntes de maré que redistribuem os sedimentos. Estudos como os de Anthony et al. (2010) e Souza Filho (2005) apontam que as praias amazônicas sofrem forte influência da interação entre ondas e macromarés, resultando em elevada mobilidade da linha de costa. Além disso, a redução do aporte sedimentar fluvial em decorrência de barramentos a montante e modificações no uso e cobertura da terra pode ter intensificado a erosão ao longo das últimas décadas, comprometendo a capacidade natural de deposição de sedimentos nessas áreas. Na praia do Salazar, observou-se um aumento na vulnerabilidade, com 27,30% da área classificada como altamente vulnerável.

Assim, a maior vulnerabilidade à erosão costeira foi obtida no setor norte da área de estudo, em decorrência de suas características geológicas. Taxas negativas de variação da linha de costa (erosão) foram observadas neste setor por se tratar de uma praia arenosa (Fig. 11a) com baixa inclinação topográfica, ou seja, mais suscetível às oscilações do nível d'água. Sharples & Watson (2025) afirmam que os processos de recuo da linha de costa em praias arenosas serão cada vez mais frequentes em todo o mundo, como resposta ao aumento relativo do nível do mar.



Figura 11: Linhas de costa e geomorfologia do setor norte representado em (A) praia do Salazar; Setor central representado em (B) praia das Meninas; Setor sul representado em (C) praia da Baleia e em (D) praia do Curuanã.

Embora a praia do Salazar margeie o manguezal, e este contribua para o processo de estabilidade costeira, fornecendo um mecanismo adicional para reter e fixar sedimentos (Allison et al. 2000, Gasparinetti 2018), no setor norte, o manguezal está recuando. Foi observada uma retração de até 189,73 metros da linha de costa de 1990 a 2023.

Essa ampla variação da linha de costa se assemelha aos resultados encontrados por Menezes et al. (2024) ao longo da costa do município de Soure-PA, município vizinho à Salvaterra, onde situa-se o distrito de Jubim. De acordo com os autores, a hidrodinâmica do rio Pará influencia principalmente processos de erosão e transporte ao longo da margem leste da Ilha do Marajó,

cuja maior deposição sedimentar e progradação costeira direciona-se ao extremo norte da ilha.

O setor central, embora apresente taxas erosivas inferiores às do setor norte, também se mostrou vulnerável, evidenciando recuos médios significativos no início do período (1990–2002), seguidos de redução gradual da intensidade erosiva até o intervalo mais recente (2013–2023). Essa mudança pode estar associada tanto à variabilidade climática interanual, como eventos El Niño e La Niña que influenciam os regimes de precipitação e descarga fluvial (Marengo et al. 2018), quanto a ajustes morfodinâmicos locais. A diminuição na intensidade erosiva, entretanto, não deve ser interpretada como estabilidade definitiva, pois o setor permanece suscetível a novos episódios de recuo em função da variabilidade hidrossedimentológica característica da região.

A existência do canal do Jubim confere vulnerabilidade alta na região mais interna, devido ao efeito erosivo da descarga fluvial, contudo, em direção à foz, o elevado aporte sedimentar permitiu o desenvolvimento de delta de maré vazante (Fig. 11b), cuja deposição sedimentar propicia uma vulnerabilidade moderada à praia das Meninas.

No setor sul, o comportamento distinto, com registros de acreção em determinados períodos, sugere a presença de mecanismos compensatórios de deposição sedimentar. A ocorrência de progradação de até 78 m entre 2002 e 2013 indica que este setor pode atuar como área de deposição preferencial de sedimentos redistribuídos a partir dos setores adjacentes, funcionando como zona de retenção. Esse padrão está em consonância com os modelos propostos por Short & Jackson (2013), segundo os quais a dinâmica costeira pode gerar alternância entre zonas de erosão e de acreção, dependendo do balanço sedimentar regional e da energia incidente.

Outro fator relevante a ser considerado é a atuação antrópica. Modificações no uso e cobertura do solo, incluindo desmatamento de áreas de manguezal e ocupação urbana desordenada, podem comprometer a resiliência natural da linha de costa (Souza Filho et al., 2009). Os manguezais, por exemplo, desempenham papel fundamental na retenção de sedimentos e na dissipação da energia das ondas; sua degradação reduz a proteção natural da linha de costa, aumentando a vulnerabilidade das praias estuarinas. Nesse sentido, a erosão observada, sobretudo nos setores norte e central, pode estar relacionada não apenas a processos naturais, mas também a pressões socioambientais crescentes.

A variação de vulnerabilidade moderada a baixa observada no setor sul, está relacionada à estabilidade e acreção costeira a qual o setor vem apresentando nas últimas três décadas. Essa característica pode ser explicada não somente por um transporte e deposição sedimentar favorável em direção ao extremo sul, onde estão o canal e a praia do Curuanã (Fig. 11c), mas também pela influência da geomorfologia costeira na evolução da linha de costa, uma vez que a presença de

falésias confere maior resistência e estabilidade ao segmento litorâneo em comparação às praias desprovidas dessa feição geomorfológica (Novaes et al. 2024). Essas falésias se destacam na linha de costa da praia da Baleia – setor sul (Fig. 11d), onde extensas plataformas de abrasão de ondas também ocupam a maior parte da zona de intermaré (entremarés).

Desta forma, o segmento sul da área de estudo apresenta baixa a moderada declividade e zona de espriamento de ondas mais estreita em relação às demais praias. Todas elas apresentam estado morfodinâmico dissipativo, ou seja, praias planas onde a maior parte da energia das ondas é gasta através do processo de quebra na antepraia (Sherman 2019).

A análise do mapa geomorfológico da zona costeira de Jubim (Fig. 4) e o Modelo Digital de Elevação (Fig. 5b) mostram a vulnerabilidade costeira nos setores norte e central da área estudada, devido à baixa declividade na zona entremarés e as feições morfológicas presentes na linha de costa, feições estas mais suscetíveis à mobilização sedimentar, como os cordões arenosos e escarpas de praia existentes nestes setores.

O aporte sedimentar do rio Pará forma cordões arenosos na forma de praias estuarinas, atuando como principal fonte de sedimentos para o sistema praial local, mas também propiciando intensas correntes originadas pelas meso-macromarés que ocorrem no estuário (Sousa & Ranieri 2023). Isso induz níveis de vulnerabilidade que variam de moderados a altos para esses parâmetros (geomorfologia, declividade e amplitude de maré), em contrapartida ao parâmetro altura de ondas, cuja influência é baixa.

A correlação do mapa de uso e cobertura do solo com a vulnerabilidade costeira revelou que o litoral da área de estudo está ameaçado pela erosão. Esse fenômeno representa impacto às atividades econômicas locais da comunidade de Jubim, que depende dessas áreas para sua subsistência. Impactos como a redução na extração de frutos da vegetação que ocupa a linha de costa, perda de zonas de mangue e redução na extração de crustáceos e moluscos, diminuição de áreas agrícolas, exposição de afloramentos rochosos que dificultam a pesca e navegabilidade, além dos perigos às moradias que ocupam a linha de costa.

O avanço da erosão pode levar à perda de terras produtivas, afetando a segurança alimentar, a economia e a estrutura sociocultural da população (Hernani et al. 2002). A proximidade entre áreas de agropecuária e a zona costeira reforça a necessidade de medidas de gestão territorial que considerem tanto a conservação ambiental quanto a sustentabilidade das atividades econômicas. Estratégias como a implementação de barreiras naturais, recuperação de vegetação nativa e planejamento do uso do solo podem contribuir para minimizar os impactos da erosão e garantir a resiliência da costa frente às mudanças ambientais.

6. Conclusões

Os resultados deste estudo demonstraram que a aplicação do Índice de Vulnerabilidade Costeira (IVC)

na comunidade de Jubim, sob os cenários de elevação do nível do mar projetados pelo IPCC (RCP 2.6 e RCP 8.5), permitiu identificar contrastes significativos na resposta costeira. Em ambos os cenários, a vulnerabilidade se mostrou heterogênea ao longo do litoral, mas a magnitude e a distribuição espacial dos impactos variaram conforme a intensidade da elevação do nível do mar considerada.

No cenário RCP 2.6, de menor forçamento, prevaleceram condições de vulnerabilidade intermediária, especialmente nos setores central e norte. Ainda assim, já se observaram indícios de intensificação dos processos erosivos em áreas onde os manguezais vêm sofrendo retração, reduzindo sua capacidade de proteção costeira. O setor sul manteve maior estabilidade, com registros de acreção em determinados trechos, reflexo da influência de feições resistentes, como falésias e plataformas de abrasão, que conferem maior resiliência frente às alterações hidrodinâmicas.

Sob o cenário RCP 8.5, correspondente a um aumento mais acentuado do nível do mar, os padrões de vulnerabilidade foram intensificados. O setor norte apresentou os maiores índices, com retracções de linha de costa que ultrapassam 180 m em pontos críticos, caracterizando áreas de alta suscetibilidade. O setor central também apresentou elevação significativa do IVC, evidenciando que a resiliência observada em períodos passados pode não se sustentar frente a pressões climáticas mais severas. Já o setor sul, embora menos impactado, revelou tendência de aumento da vulnerabilidade em áreas adjacentes às zonas de ocupação antrópica.

A análise integrada do IVC com dados de uso e cobertura do solo evidenciou que pressões humanas, como a expansão agropecuária e urbana, agravam o quadro de vulnerabilidade, sobretudo ao reduzir a integridade dos ecossistemas costeiros. Isso reforça que os impactos não decorrem apenas de processos naturais ou climáticos, mas também da intensificação das atividades humanas que fragilizam a resiliência ambiental local.

Metodologicamente, a incorporação do RMSE na análise de variação da linha de costa assegurou maior confiabilidade aos resultados, enquanto o uso do DSAS possibilitou a quantificação precisa das taxas de erosão, estabilidade e acreção. A abordagem demonstrou ser eficaz para integrar múltiplas dimensões (geomorfológicas, oceanográficas e antrópicas) em um diagnóstico espacialmente explícito de vulnerabilidade costeira.

Conclui-se que, sob cenários futuros de elevação do nível do mar, a comunidade de Jubim tende a enfrentar intensificação dos processos erosivos e aumento da vulnerabilidade, principalmente nos setores norte e central. Esse panorama aponta para a urgência de políticas públicas voltadas à adaptação costeira, contemplando medidas como restauração de manguezais, manejo adequado do uso do solo e fortalecimento de estratégias de gestão integrada que

articulem ciência, conservação e participação comunitária. Assim, este trabalho não apenas avança na compreensão da vulnerabilidade costeira amazônica em cenários climáticos distintos, mas também oferece subsídios concretos para o planejamento territorial e a mitigação de riscos socioambientais em comunidades tradicionais costeiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES pelo apoio à pesquisa por meio da bolsa de mestrado, que foi concedida ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal do Pará. Os autores agradecem também ao projeto Maretórios Amazônicos pelo apoio logístico.

Declaração de autoria

F.S.F: Conceptualization, Formal Analysis, Investigation, Resources, Supervision, Methodology, Writing original draft preparation, Writing–review, editing.

M.S.R: Investigation, Methodology.

L.A.R.: Conceptualization, Data curation, Formal Analysis, Investigation, Resources, Supervision, Methodology, Writing–review, Supervision.

Referências

- ALESHEIKH, A. A., GHORBANALI, A., NOURI, N. 2007. Coastline change detection using remote sensing. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 4(1), p. 61-66.
- ANTHONY, E. J., GRATIOT, N., PROISY, C., WELTJE, G. J. 2010. The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank-shoreline interactions. *Earth-Science Reviews*, v. 103, p. 99-121.
- BARROS, E. L., PINHEIRO, L. de S., GUERA, R. G. P., MOURA, F. J. M. de., PAULA, D. P. de., NETO, A. R. X., LEISNER, M. M., MORAIS, J. O. de. 2024. Shoreline Change and Coastal Erosion: An Analysis of Long and Short-Term Alterations and Mitigation Strategies on the Coast of Icapuí, Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 25, n. 4.
- BHARADWAJ, G. S. V. S. A., PAL, I., MOZUMDER, C., AHMAD, M. M. 2025. Assessing dynamic coastal vulnerability to climate hazards: A geospatial approach in Kakinada District, Andhra Pradesh, India. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 26, n. 100622.
- BOX, J. E., HUBBARD, A., BAHR, D.B., COLGAN, W.T., FETTWEIS, X., MANKOFF, K.D., WEHRLE, A., NOEL, B., VAN DEN BROEK, M.R., WOUTERS, B., BJØRK, A.A., FAUSTO, R.S. 2022. Greenland ice sheet climate disequilibrium and committed sea-level rise. *Nature Climate Change*, v. 12, p. 808-813.
- BRAGA, R. C., PIMENTEL, M. A. S., COELHO, C., SZLAFSZTEIN, C. F., ROLLNIC, M. 2019. Vulnerabilidade diante da ação energética do mar: Estudo de caso no município de Salinópolis, Zona Costeira Amazônica, Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, v. 19, n. 4, p. 245-264.
- BRAND, E., MONTREUIL, A.L., HOUTHUYNS, R., CHEN, M. 2020. Relating Hydrodynamic Forcing and Topographic Response for Tide-Dominated Sandy Beaches. *Journal of Marine Science and Engineering*. V. 8, n. 3, p. 151.
- CAMPOS, A. O., FERNÁNDEZ, E., MARTÍNEZ, G. M. 2022. Land cover changes in the NW Spanish coastal zone: Drivers and impact on ecosystem services, *Estudios Geográficos*, v. 83, n 292, p. 100.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., HELDER, D. L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903.

- CONGEDO, L. 2021. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Disponível em: <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/>
- DAL CIN, R., SIMENONI, U. 1994. A model for determining the Classification, Vulnerability and Risk in the Southern Coastal Zone of the March (Italy). *Journal of Coastal Research*, v. 10, n. 1, p. 18-29.
- DWARAKISH, G. S., VINAY, S. A., NATESAN, U., ASANO, T., KAKINUMA, T., VENKATARAMANA, K., JAGADEESHA, P., BABITA, M. K. 2009. Coastal Vulnerability Assessment of the Future Sea Level in Udupi Coastal Zone of Karnataka State, West Coast of India. *Ocean & Coastal Management*, v. 52, p. 467-478.
- EL-ROBRINI, M., RANIERI, L.A., SILVA, P.V.M., ALVES, M.A.M.S., GUERREIRO, J.S., OLIVEIRA, R.R.S., SILVA, M.S.F., AMORA, P.B.C., EL-ROBRINI, M.H.S., FENZL, N. 2018. Pará. In MUEHE, D. (Ed.). Panorama da erosão costeira no Brasil. Brasília: MMA. p. 65-166.
- FOODY, G. M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185-201.
- FRANÇA, C. F., SOUZA FILHO, P. W. M. 2003. Análise das mudanças morfológicas costeiras de médio período na margem leste da Ilha do Marajó (PA) em imagem LANDSAT. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 33, p. 127-136.
- FRANÇA, C. F., SOUZA FILHO, P. W. M. 2006. Compartimentação morfológica da margem leste da Ilha do Marajó: zona costeira dos municípios de Soure e Salvaterra – Estado do Pará. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Ano 7, n. 1, p. 33-42.
- GASPARINETTI, P. 2018. The values of ecosystem services of Brazilian mangroves, economic instruments for their conservation and the case study of Salgado Paraense. Conservation Strategy Fund (CSF).
- GORNITZ, V. M. 1991. Global coastal hazards from future sea level rise. *Global and Planetary Change*. v. 3, n. 4, p. 379-398.
- GORNITZ, V. M., DANIELS, R. C., WHITE, T. W., BIRDWELL, K. R. 1994. The Development of Coastal Risk Assessment Database: Vulnerability to Sea-Level Rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research*, n. 12, p. 327-338.
- GOSLEE, S. C. 2011. Analyzing remote sensing data in R: the landsat package. *Journal of Statistical Software*, 43(1), 1-25.
- HENRIQUES, R. J., OLIVEIRA, F. S., SCHAEFER, C. E. G. R., LOPES, P. R. C., SENRA, E. O., LOURENÇO, V. R., FRANCELINO, M. R. 2024. Impacts of anthropocene sea-level rise on people, environments, and archaeological sites in Marajó Island, Brazilian Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 136, 104836.
- HERNANI, L. C., FREITAS, P. L., PRUSKI, F. F., DE MARIA, I. C., CASTRO FILHO, C., LANDERS, J. N. 2002. A erosão e seu impacto. *Repositório de Informação da Embrapa*, v. 5, p. 47-60.
- IPCC. 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, NY, USA.
- IPCC. 2019. Technical Summary [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, V. MASSON-DELMOTTE, P. ZHAI, E. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, M. TIGNOR, A. ALEGRIA, M. NICOLAI, A. OKEM, J. PETZOLD, B. RAMA, N.M. WEYER (eds.)]. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.- O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 39-69.
- JENSEN, J. R. 2015. Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 4th ed. Pearson.
- KOROGLU, A., RANASINCHE, R., JIMÉNEZ, J. A., DASTGHEIB, A. 2019. Comparaison of Coastal Vulnerability Index Applications for Barcelona Province. *Ocean and Coastal Management*, v. 178, n. 104799, p. 1-14.
- LIMA, A.M., OLIVEIRA, L.L., FONTINHAS, R.L., LIMA, R.J.S. 2005. Ilha do Marajó: Revisão Histórica, Climatológica, Bacias Hidrográficas e Propostas de Gestão. HOLOS Environment, v.5 n.1, p. 65.
- LU, D., WENG, Q. 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823-870.
- MAITI, S., BHATTACHARYA, A. 2009. Shoreline Change Analysis and Its Application to Prediction: A Remote Sensing and Statistics Based Approach. *Marine Geology*, v257, p. 11-23.
- MAPBIOMAS. 2024. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). MapBiomas General “Handbook”, v. 1, collection 9.
- MARENKO, J. A., ALVES, L. M., ALVALÁ, R. C. S., CUNHA, A. P., BRITO, S., MORAES, O. L. L. 2018. Climatic characteristics of the 2010–2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 90, suppl. 1, p. 1973-1985.
- MENEZES, R. A. A., GUIMARÃES, D. K. M., EL-ROBRINI, M. 2024. Variations of the coastline in a medium period (1985-2017) of a tropical island: the case of Soure (Marajó – Pará/Brazil). *Boletim Paulista de Geografia*, n. 112.
- MISHRA, M., CHAND, PATTNAIK, N., KATTEL D. B., PANDA, G. K., MOHANTI, M., BARUAH, U. D., CHANDNIHA, S. K., ACHARY, S., MOHANTY, T. 2019. Response of long- to Short-term changes of the Puri Coastline of Odisha (India) to natural and anthropogenic factors: a remote sensing and statistical assessment. *Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 338, p. 1-23.
- MUEHE, D., FERNANDEZ, G. B., BULHÕES, E. M. R., AZEVEDO, I. F. 2011. Avaliação da Vulnerabilidade Física da Orla Costeira em Nível Local, Tomando como Exemplo o Arco Praial entre Rio das Ostras e o Cabo Búzios/RL. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 12, n. 2, p. 45-58.
- MUZIRAFUTI, A. 2025. Assessing Coastal Vulnerability Index in Mediterranean Areas: A Case Study of Casablanca. Preprints.
- NGUYEN, T. T. X., BONETTI, J., ROGERS, K., WOODROFFE, C. D. 2016. Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: a review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean Coast Manag*, v. 123, p. 18-43.
- NICHOLLS, R. J., HANSON, S. E., LOWE, J. A., WARRICK, R. A., LU, X., LONG, A. J. 2014. Sea-level scenarios for evaluating coastal impacts. *WIREs Clim Change* [Online] 5.
- NOAA. 2017. Administração Oceânica e Atmosférica Nacional. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.
- NOVAES, G. de O., LOBO, F. C., RANIERI, L. A. 2024. Geoindicadores de vulnerabilidade à erosão e risco costeiro em praias estuarinas da costa amazônica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 25, n. 2.
- NOVAK, L. P., LAMOUR, M. R. 2021. Avaliação do Risco à Erosão Costeira em Praias Urbanizadas do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 22, n. 1, p. 163-185.
- OPPENHEIMER, M., GLAVOVIC, B. C., HINKEL, J., VAN DE WAL, R., MAGNAN, A. K., ABD- ELGAWAD, A., CAI, R., CIFUENTES-JARA, M., DECONTI, R. M., GHOSH, T., HAY, J., ISLA, F., MARZEION, B., MEYSSIGNAC, B., SEBESVARI, Z. 2022. Sea Level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In: P'ORTNER, H.-O., ROBERTS, D. C., MASSON- DELMOTTE, V., ZHAI, P., TIGNOR, M., POLOCZANSKA, E., MINTENBECK, K., ALEGRIA, A., NICOLAI, M., OKEM, A., PETZOLD, J., RAMA, B., WEYER, N. M. (Eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, p. 321-445.
- OSILIERI, P. P. G., SEOANE, J. C. S., DIAS, F. B. 2020. Coastal Vulnerability Index Revisited: A Case Study from Maricá, RJ, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 1, p. 81-99.
- PENDLETON, E. A., BARRAS, J. A., WILLIAMS, S. J., TWICHELL, D. C. 2010. Coastal vulnerability assessment of the Northern Gulf of Mexico to sea-level rise and coastal change. *Geological Survey Open-File Report*, v. 2010-1146, p. 1-26.
- PENDLETON, E. A., HAMMAR-KLOSE, E. S., THIELER, E. R., WILLIAMS, S. J. 2004. Coastal Vulnerability Assessment of Gulf Islands National Seashore (GUIS) to Sea-Level Rise. *Geological Survey Open-File Report*, v. 03-188, p. 1-18.
- RANIERI, L. A., EL-ROBRINI, M. 2015. Evolução da linha de costa de Salinópolis, Nordeste do Pará, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 42, n. 3, p. 207-226.
- RANIERI, L.A., EL-ROBRINI, M. 2016. Condição oceanográfica, uso e ocupação da costa de Salinópolis (Setor Corvina – Atalaia), Nordeste do Pará, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v.16, n. 2, p. 133-146.
- RIAHI, K., GRUBLER, A., NAKICENOVIC, N. 2007. Scenarios of long-term socioeconomic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 74, n. 7, p. 887-935.

- RICHARDS, J. A., JIA, X. 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer.
- SHARPLES, C., WATSON, C. 2025. An abrupt change in long-term shoreline behaviour at Roches Beach, Tasmania: An early response to contemporary climate change-induced sea-level rise? *Marine Geology*, v. 480, 107475.
- SHERMAN, D.J. Praias Dissipativas. Em: FINKL, C.W., MAKOWSKI, C. 2019. (eds) Enciclopédia de Ciência Costeira. Série Enciclopédia de Ciências da Terra. Springer, Cham.
- SHORT, A. D., JACKSON, D. W. T. 2013. Beach morphodynamics. In: SHRODER, J. (ed.) Treatise on Geomorphology. San Diego: Academic Press. v. 10, p. 106–129.
- SOUZA, M. B. P. de, RANIERI, L. A. 2023. Morfodinâmica de praias estuarinas da costa leste da Ilha do Marajó, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, 24(3).
- SOUZA FILHO, P. W. M. 2005. Costa de manguezais de macromaré da Amazônia: cenários morfológicos, mapeamento e quantificação de áreas usando dados de sensores remotos. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 4, p. 427-435.
- SOUZA FILHO, P. W. M., LINS-DE-BARROS, F. M., COHEN, M. C. L. 2009. The role of mangroves in coastal dynamics of the Amazon estuary. *Journal of Coastal Research*, v. 56, p. 393–397.
- SOUZA, E. M. S., ANDRADE, M. M. N. 2024. Dinâmica da linha de costa na Zona Costeira Amazônica: estudo de caso na ilha de Atalaia (Salinópolis, PA). *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 4, p. 2911-2929.
- SPECIAL REPORT ON THE OCEAN AND CRYOSPHERE IN A CHANGING. 2019. Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low Lying Islands, Coasts and Communities. IPCC - SR Ocean and Cryosphere (SROCC), p. 1-169.
- TANO, R. A., AMAN, A., KOUADIO, K. Y., TOUALY, E., ALI, K. E., ASSAMOI, P. 2016. Assessment of the Ivorian Coastal Vulnerability. *Journal of Coastal Research*, v. 32, n. 6, p. 1495-1503.
- THIELER, E. R., HAMMAR-KLOSE, E. S. 1999. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the U.S. Gulf of Mexico Coast. U.S. Geological Survey Open-File Report, v. 00-179, p. 1-15.
- UNITED NATIONS. 2017. Ocean Factsheet Package. Presented at the The Ocean Conference, New York, USA, p. 7.
- VAN VUUREN, D.P., DEN ELZEN, M.G., LUCAS, P.L., EICKHOUT, B., STRENGERS, B.J., VAN RUIJVEN, B., VAN HOUDT, R. 2007. Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, v. 81, n. 2, p 119–159.
- VAN VUUREN, D.P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., HURTT, G.C., KRAM, T., KREY, V., LAMARQUE, J.F., MASUI, T., MEINSHAUSEN, M., NAKICENOVIC, N., SMITH, S.J., ROSE, S.K. 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, [S. l.], v. 109, n. 1-2, p. 5.