

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS DA PRAIA URBANA DE TAMBAÚ, JOÃO PESSOA-PB

Antonio Rondinelly da Silva Pinheiro¹; Maria Cecilia Silva Souza² &

Celso Augusto Guimarães Santos^{3,4}

Abstract: This study investigates the coastal dynamics and wave climate of the urban beach of Tambaú, in João Pessoa, Paraíba, aiming to inform sustainable management strategies and mitigate erosive impacts. Using the Coastal Modeling System (SMC-Brasil) and Coast Analyst System from Space Imagery Engine (CASSIE) tools, bathymetric data and time series were analyzed to characterize prevailing wave patterns. The findings indicate a dominance of waves originating from the east (E) and east-southeast (ESE), accounting for 95.9% of recorded events, with significant wave heights ranging from 1.10 m to 1.35 m under median conditions, reaching up to 2.33 m during storm events. The analysis also revealed shoreline progradation along specific transects, with annual advances of up to 5.71 m/year. These results underscore the importance of continuous monitoring and highlight the need for integrated measures to preserve shoreline stability.

Keywords: Coastal dynamics; Sediment transport; Coastal management.

Resumo: Este estudo investiga a dinâmica costeira e o clima de ondas da praia urbana de Tambaú, em João Pessoa, Paraíba, com o objetivo de subsidiar estratégias de gestão sustentável e mitigar impactos erosivos. Utilizando as ferramentas *Sistema de Modelado Costero* (SMC-Brasil) e *Coast Analyst System from Space Imagery Engine* (CASSIE), foram analisados dados batimétricos e séries temporais para caracterizar os padrões predominantes de ondas. Os resultados indicam o predomínio de ondas provenientes do leste (E) e leste-sudeste (ESE), responsáveis por 95,9% dos eventos registrados, com alturas significativas variando de 1,10 m a 1,35 m em condições medianas, podendo atingir até 2,33 m durante eventos de tempestade. A análise também revelou processos de progradação da linha de costa em determinados transectos, com avanços anuais de até 5,71 m/ano. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo e evidenciam a necessidade de medidas integradas para a preservação da estabilidade costeira.

Palavras-Chave – Dinâmica litorânea; Transporte sedimentar; Gestão costeira.

1) Doutorando em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, antonio.rondinelly@academico.ufpb.br;

2) Pós-Doutoranda em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, ceciliasilvalegat@gmail.com;

3) Professor Titular, Doutor em Engenharia, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, celso@ct.ufpb.br;

4) Professor Visitante, Stokes School of Marine and Environmental Sciences, University of South Alabama, santos@southalabama.edu.

INTRODUÇÃO

A zona costeira desempenha um papel crucial no equilíbrio ambiental e na economia das regiões litorâneas, sendo uma das áreas mais dinâmicas do planeta em termos de transformações morfológicas naturais e impactos antrópicos (Zhang, 2012; Carmo, 2023). No Brasil, as praias urbanizadas são alvo de constantes pressões decorrentes de atividades humanas, como o turismo, e de processos naturais, como o transporte de sedimentos e a ação das ondas.

A urbanização acelerada dessas zonas e a implementação de estruturas rígidas verticalizadas configuram-se como fatores que intensificam a vulnerabilidade das praias em escala global (Vasconcelos *et al.*, 2024). Essa ocupação interfere diretamente nos processos naturais de transporte de sedimentos e agrava os processos erosivos (Zhang *et al.*, 2021). Nesse contexto, compreender a dinâmica costeira torna-se essencial para garantir a sustentabilidade e a preservação desses ambientes (Silva *et al.*, 2017).

A morfologia e a evolução das praias são controladas por uma complexa interação de fatores ambientais e oceanográficos, como o regime de ondas, as variações de maré, os sistemas de correntes costeiras, o aporte sedimentar e as características geológicas preexistentes (Muehe, 2006). Essa complexidade confere ao ambiente praias um caráter altamente dinâmico, com respostas rápidas às alterações hidrodinâmicas e às diversas formas de intervenção antrópica (Wang *et al.*, 2024). Nesta perspectiva, destaca-se o papel do clima de ondas e sua influência sobre a morfologia praias.

A praia de Tambaú, localizada no município de João Pessoa, no litoral central da Paraíba, é uma das mais importantes áreas urbanizadas do estado, destacando-se como polo turístico e comercial (Donegan *et al.*, 2019; Ward, 2022). Sua configuração geomorfológica, caracterizada pela transição entre os Baixos Planaltos Costeiros e a Baixada Litorânea, aliada à presença de recifes próximos à costa, influencia diretamente os processos de refração e difração das ondas, bem como o transporte sedimentar na região (Silva *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o *Sistema de Modelado Costeiro* (SMC-Brasil), adaptado às condições específicas do litoral brasileiro, oferece um conjunto integrado de ferramentas que permite simular com precisão a propagação de ondas, a hidrodinâmica costeira, o transporte de sedimentos e a evolução da linha de costa (Dalinghaus *et al.*, 2018). A versatilidade do SMC-Brasil tem sido evidenciada em diversos estudos, como na análise de processos erosivos (Laba, 2021) e na avaliação da vulnerabilidade à erosão e à inundação (Rodrigues, 2022).

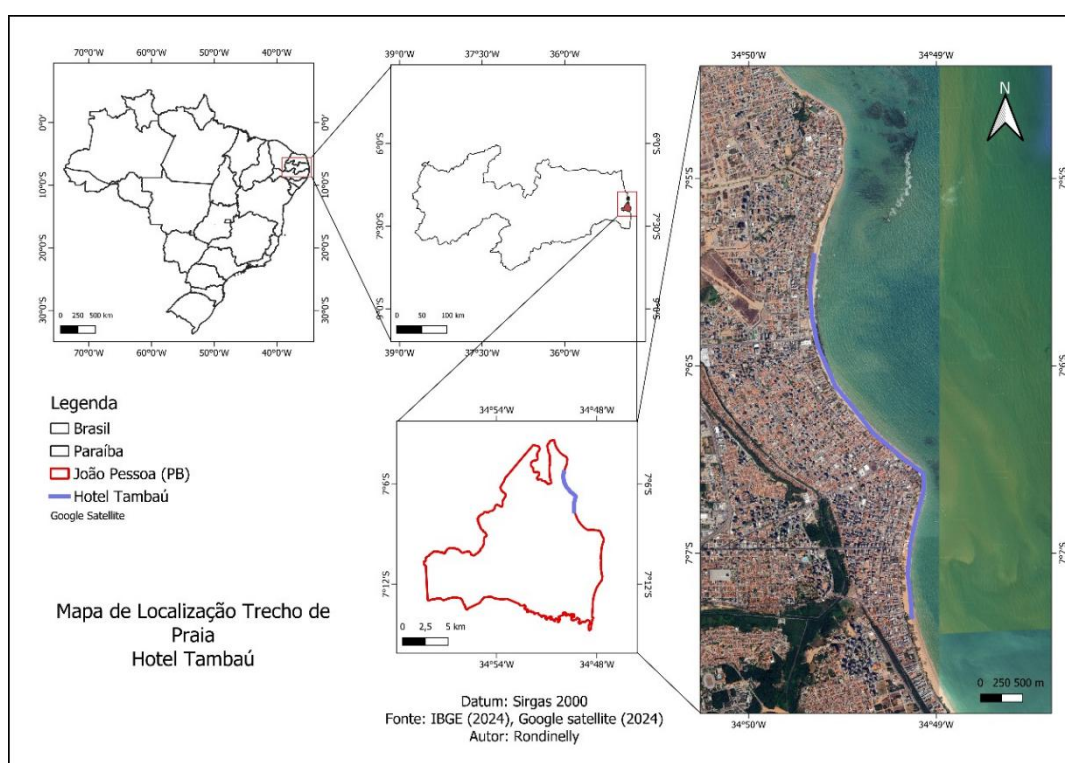
Este estudo tem como objetivo caracterizar o regime de ondas e avaliar a dinâmica costeira da praia de Tambaú, por meio da aplicação de ferramentas avançadas de modelagem, como o SMC-Brasil, associadas à plataforma *Coast Analyst System from Space Imagery Engine* (CASSIE) para a análise da evolução da linha de costa. A abordagem integrada, baseada em séries temporais e dados batimétricos, busca fornecer subsídios para a gestão costeira e o planejamento sustentável, diante dos desafios impostos pela urbanização e pelos processos naturais de erosão identificados na área.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde à praia de Tambaú, localizada no município de João Pessoa, no litoral central do estado da Paraíba (Figura 1). Trata-se de uma praia urbanizada que desempenha um papel relevante no contexto socioeconômico da região, especialmente em função do turismo e das atividades comerciais associadas. A urbanização local inclui a presença de calçadões, hotéis, restaurantes e demais equipamentos urbanos que interagem diretamente com a dinâmica costeira.

Do ponto de vista geomorfológico, a praia de Tambaú situa-se na transição entre os Baixos Planaltos Costeiros e a Baixada Litorânea, apresentando um perfil mais homogêneo em comparação a outras praias da região, como Cabo Branco (Silva *et al.*, 2024). A Baixada Litorânea, predominante na área, é composta por terrenos planos e de baixa altitude, formados por sedimentos quaternários que interagem com a dinâmica sedimentar da zona costeira. A presença de recifes próximos à linha de costa exerce influência significativa na modulação das ondas, atuando nos processos de refração e difração e afetando, consequentemente, a redistribuição de sedimentos e a estabilidade da linha de costa.

Figura 1 - Praia de Tambaú, João Pessoa-PB.



Fonte: Autores (2025).

A intensa urbanização da praia de Tambaú exige monitoramento constante, uma vez que os impactos das ondas, do transporte sedimentar e das correntes costeiras podem representar riscos à infraestrutura instalada e à integridade da linha de costa. Assim, a análise da dinâmica costeira torna-se fundamental para subsidiar ações de manejo sustentável e mitigação de processos erosivos na área.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho constitui um estudo de caso, fundamentado em pesquisa aplicada, com o objetivo de gerar conhecimento sobre a área de estudo por meio da modelagem costeira. A caracterização do regime de ondas na praia urbana de Tambaú foi realizada utilizando o SMC-Brasil. Trata-se de uma ferramenta computacional que integra metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos, desenvolvida para abordar questões relacionadas à zona costeira.

Originalmente criado pelo Instituto Hidráulico Ambiental da Cantábria (IH Cantabria), vinculado à Universidade da Cantábria, o sistema contou com o apoio do Ministério do Meio Ambiente da Espanha. Posteriormente, foi adaptado e incorporado à administração pública brasileira por meio do projeto “Transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão do litoral brasileiro”, realizado em parceria com o Ministério do Meio Ambiente (MMA), a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e outras instituições (IH-Cantabria, 2013a; IH-Cantabria, 2013b).

A modelagem de ondas utilizou a base de dados batimétricos obtida a partir do módulo IH-DATA (BACO) do SMC-TOOLS, um dos módulos do SMC-Brasil, que emprega dados fornecidos pelas cartas náuticas brasileiras (IH-Cantabria, 2013a; IH-Cantabria, 2013b).

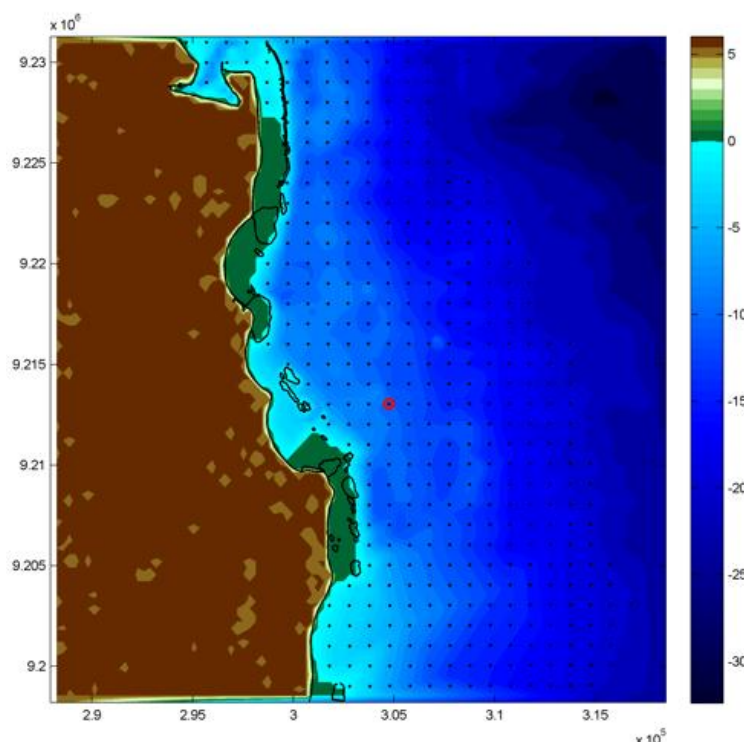
A metodologia adotada foi composta por duas etapas:

- (i) levantamento bibliográfico e estudo capacitivo para a utilização das ferramentas do SMC-Brasil, com base nos manuais de instrução e na literatura especializada;
- (ii) aplicação do SMC-Brasil para analisar a interação do regime de ondas com a zona costeira.

O SMC-Brasil disponibiliza duas interfaces principais: o SMC Tools e o SMC 3.0. O SMC Tools integra bases de dados batimétricos, de ondas e de nível do mar, além de ferramentas para o processamento de dados, como o IH-AMEVA, que realiza análises estatísticas de variáveis ambientais, e o IH-DYNAMICS, que permite a propagação de séries de ondas de águas profundas até a linha de costa. O SMC 3.0, por sua vez, contém um conjunto de modelos numéricos que dão suporte à aplicação das metodologias documentadas nos manuais da ferramenta (Silva *et al.*, 2017).

Para a análise estatística de ondas, foi utilizada a base de dados *Downscaled Ocean Waves* (DOW), derivada de reanálise (downscaling) para águas intermediárias e rasas. Este conjunto compreende uma série temporal de 60 anos (1948–2008), com resolução horária, gerada por modelagem numérica em malha global (IH-Cantabria, 2013a; 2013b). Durante a execução do trabalho, foi necessário ajustar a batimetria de forma detalhada, ponto a ponto, pois a base de dados disponível não abrangia completamente a área de estudo. Esse ajuste foi realizado com base nos dados do próprio programa e refinado dentro do modelo, de forma a completar as lacunas batimétricas até a linha de costa. Neste estudo, o ponto DOW selecionado encontra-se em águas intermediárias, a uma profundidade de 9,70 m, nas coordenadas geográficas 34° 0' 0,16" O e 7° 0' 0,021" S (Figura 2).

Figura 2 - Área de estudo, pontos batimétricos e ponto DOW.



Fonte: Autores (2025).

Para a propagação dos casos, visando reduzir o esforço computacional e representar os diferentes estados de mar, aplicou-se o algoritmo de seleção por máxima dissimilaridade (MaxDiss). Nesse contexto, o módulo **IH-AMEVA** foi utilizado tanto no pré-processamento quanto na análise estatística das variáveis ambientais dos bancos de dados de ondas e níveis. Foram identificadas as frentes de onda mais representativas para a região, e duas malhas foram geradas para propagação de ondas provenientes dos quadrantes leste (E) e leste-sudeste (ESE).

A propagação dessas frentes de onda até a linha de costa foi realizada com o módulo MOPLA 3.0 do SMC-Brasil, considerando dez casos representativos, listados na Tabela 1 apresentados conforme ID (caso representativo), Hs (altura significativa de onda em metros), Tp (período de pico em segundos), Dir (direção de onda em graus) e Prob (probabilidade de ocorrência em porcentagem). Esses casos foram selecionados pelo programa com base na ocorrência mais representativa de altura significativa (Hs) e direção das ondas no ponto DOW, para situações de preamar e maré baixa.

Paralelamente, a plataforma CASSIE foi utilizada para a análise da evolução da linha de costa, com base em imagens de satélite. Foram filtradas imagens do satélite Sentinel-2 referentes ao período de 2019 a 2024. O critério de seleção incluiu imagens com cobertura de nuvens inferior a 1%, assegurando a visibilidade adequada da linha costeira. A análise baseou-se em séries temporais e na criação de transectos com intervalos de 100 metros e comprimento de 1.500 metros, possibilitando o cálculo dos indicadores End Point Rate (EPR) e Linear Regression Rate (LRR). Tais indicadores permitiram avaliar as tendências de avanço ou recuo da linha de costa ao longo do período analisado.

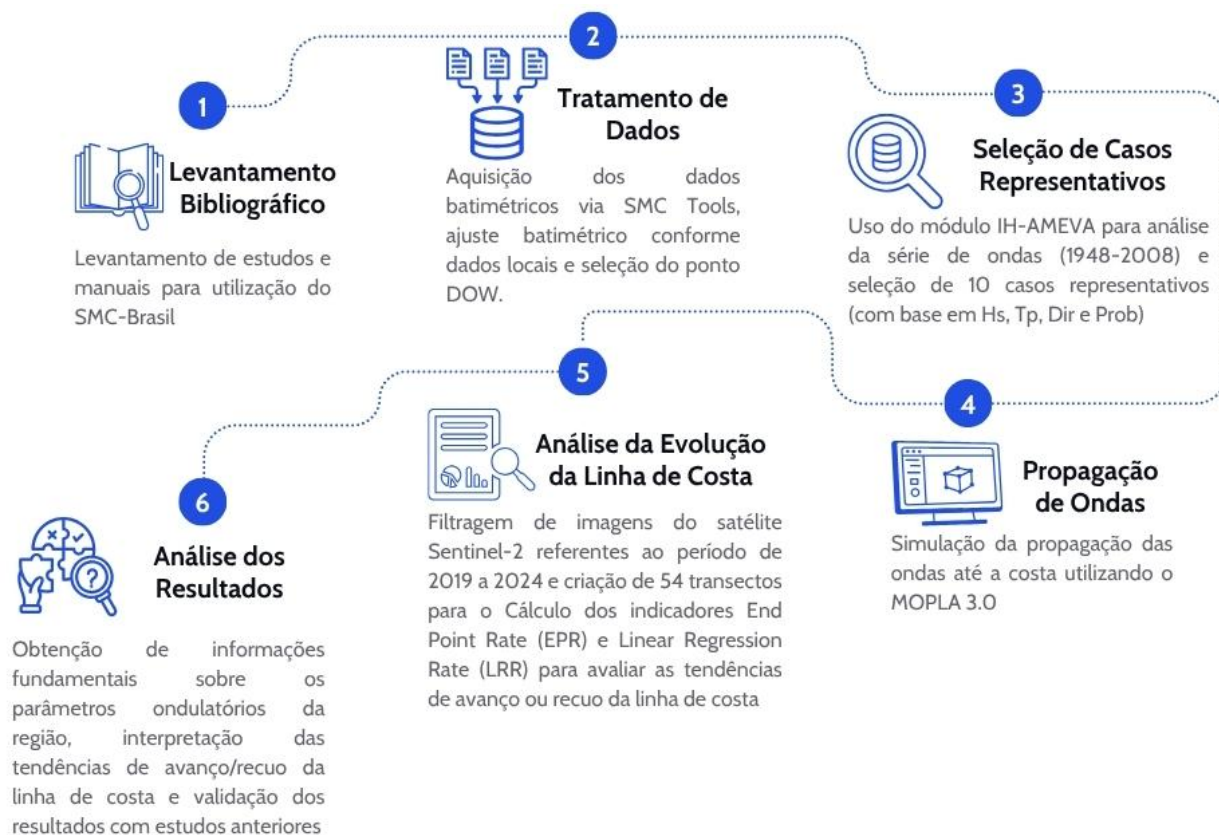
Tabela 1 - Casos Propagados.

ID	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°)	Prob (%)
1	2,70	9,67	94,21	2,08
2	0,59	14,89	74,99	4,46
3	1,38	2,28	109,74	17,49
4	1,88	18,18	72,72	1,39
5	1,44	11,22	115,92	19,55
6	0,70	6,51	65,20	1,35
7	1,96	6,56	110,66	30,95
8	2,13	13,47	107,65	3,45
9	0,89	6,62	126,45	3,43
10	1,22	16,84	95,60	16,15

Fonte: Autores (2025).

Na Figura 4 tem-se o fluxograma metodológico das etapas realizadas no presente trabalho.

Figura 4 – Fluxograma Metodológico.



Fonte: Autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise realizada para a caracterização do regime de ondas na praia de Tambaú, com o uso do SMC-Brasil e da plataforma CASSIE, forneceu informações fundamentais sobre os parâmetros ondulatórios da região.

Com base nos dados obtidos para o ponto DOW selecionado, referentes ao período de 1948 a 2008, observou-se que as ondas predominantes na área de estudo são oriundas, majoritariamente, das direções leste (E) e leste-sudeste (ESE), que juntas representam 95,9% das ocorrências registradas. Ondas provenientes de nordeste (NE), leste-nordeste (ENE) e sudeste (SE) têm contribuição marginal, somando apenas 4,1% dos eventos. A menor frequência foi registrada para ondas de nordeste (NE), com uma incidência de apenas 0,05%, conforme demonstrado na Tabela 2.

Na Tabela 2, são apresentadas as condições medianas de ondas ($H_{s50\%}$), com alturas significativas variando entre 1,10 m e 1,35 m e períodos de pico ($T_{p50\%}$) oscilando entre 6,47 s e 11,71 s. Em condições extremas (H_{s12} – Altura significativa da onda superada 12 horas ao ano), as alturas variam de 1,56 m a 2,33 m, enquanto os períodos de pico (T_{p12} – Período de onda associado ao H_{s12}) situam-se entre 9,54 s e 19,51 s.

Tabela 2 - Probabilidade de ocorrência de cada direção de ondas e suas respectivas alturas e períodos, para o ponto DOW selecionado (módulo IH-AMEVA).

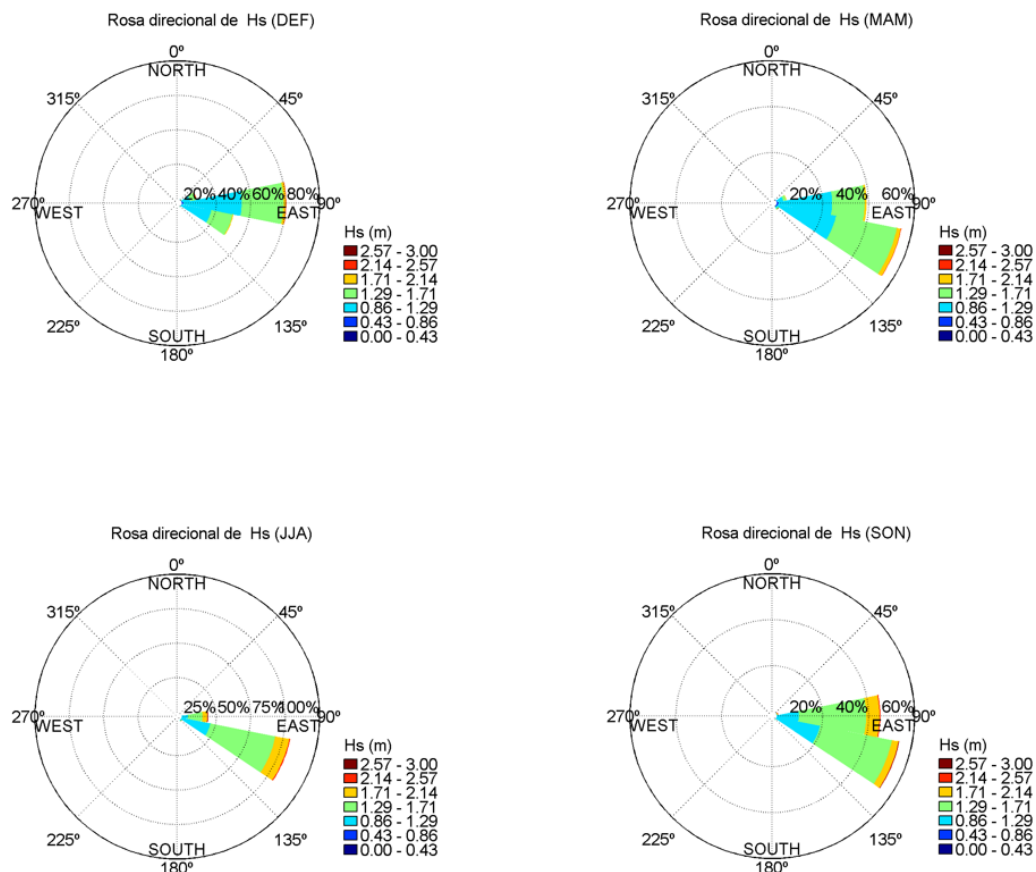
Direção	Probabilidade (%)	$H_{s50\%}$ (m)	H_{s12} (m)	$T_{p50\%}$ (s)	T_{p12} (s)
NE	0,05	1,10	1,56	10,77	19,51
ENE	3,34	1,22	2,33	11,71	19,35
E	40,71	1,32	2,26	8,78	17,47
ESE	55,18	1,35	2,23	8,04	13,61
SE	0,72	1,26	1,83	6,47	9,54

Fonte: Autores (2025).

As rosas direcionais elaboradas para cada estação do ano evidenciam a predominância das direções e alturas significativas das ondas (H_s). Observou-se uma maior ocorrência de ondas provenientes do leste-sudeste (ESE) nos meses de junho, julho e agosto, enquanto, entre dezembro e fevereiro, as ondas de leste (E) apresentaram maior frequência. Essa variação sazonal nas direções predominantes e nas características das ondas é apresentada na Figura 5.

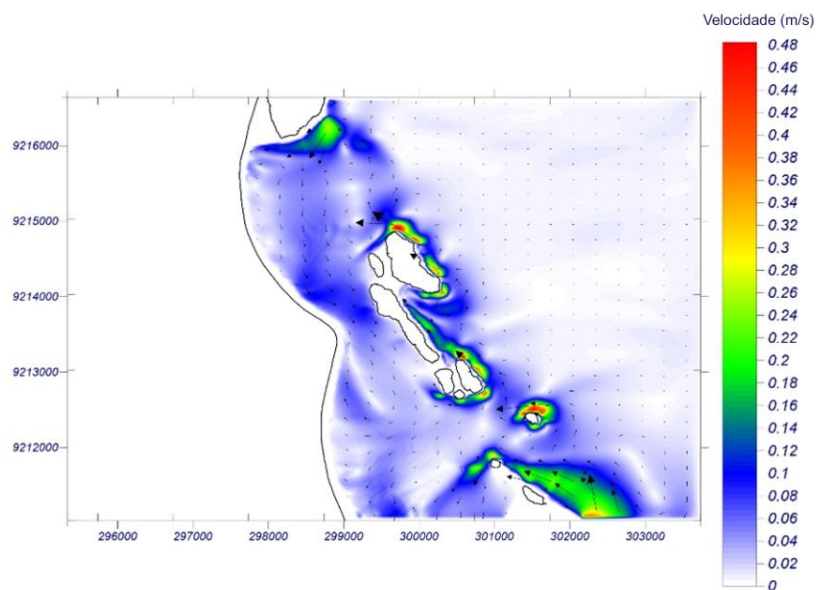
Esses gráficos evidenciam a variação sazonal do regime de ondas e permitem identificar as direções e alturas mais frequentes, o que contribui para uma análise detalhada da dinâmica costeira. Ressalta-se a importância da relação entre o regime de ondas e a morfodinâmica litorânea. Segundo Silva et al. (2024), a corrente de deriva litorânea ao longo da costa da Paraíba possui direção predominante de sul para norte, influenciando diretamente a dinâmica sedimentar e resultando em zonas com tendência à erosão e outras à deposição. Essa interação é ilustrada na Figura 6.

Figura 5 - Rosas direcionais (DEF: dezembro, janeiro e fevereiro; MAM: março, abril e maio; JJA: junho, julho e agosto; SON: setembro, outubro e novembro).



Fonte: Autores (2025).

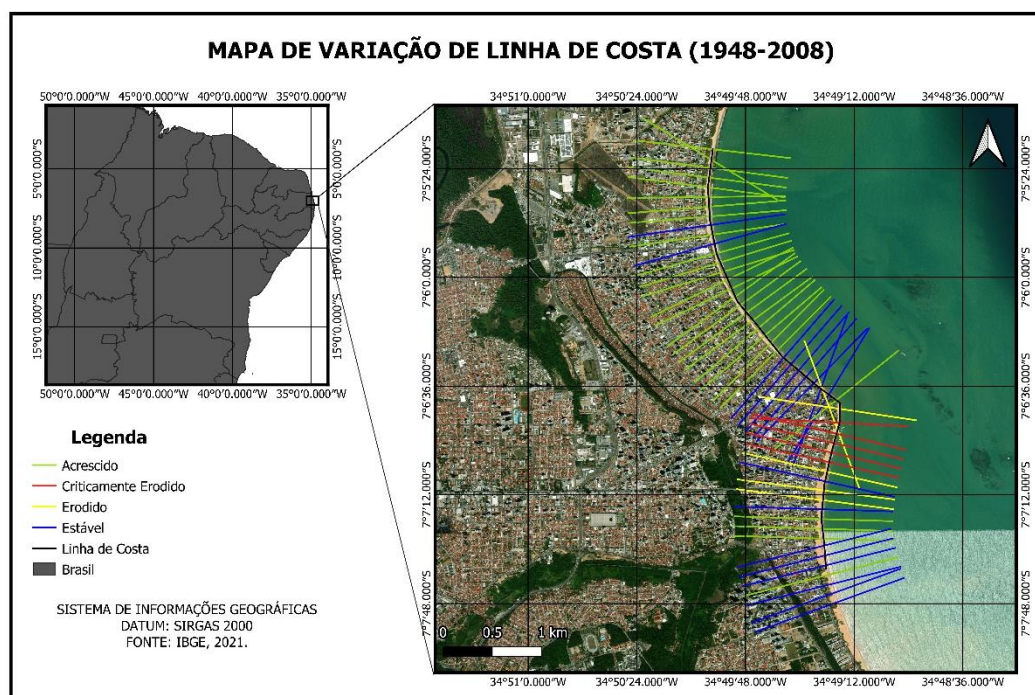
Figura 6 - Vetores de corrente e magnitude – malha de detalhe leste.



Fonte: Autores (2025).

Os dados simulados reforçam esse comportamento e evidenciam, especialmente na Figura 5, a influência dos recifes costeiros na morfologia da linha de costa, promovendo a dissipação da energia das ondas e contribuindo para o recorte sinuoso da costa, com reentrâncias associadas a zonas de menor energia. No âmbito da plataforma CASSIE, a análise da dinâmica da linha de costa foi conduzida com base em 54 transectos. Para cada transecto, foram obtidos valores de End Point Rate (EPR) variando entre 3,51 m/ano e 5,71 m/ano, e Linear Regression Rate (LRR) entre 0,94 m/ano e 1,60 m/ano, indicando, de forma geral, uma tendência de acréscimo na faixa praial. Os resultados estão representados na Figura 7.

Figura 7 - Dinâmica costeira obtida por meio da ferramenta CASSIE.



Fonte: Autores (2025).

Os dados revelam variações espaciais expressivas no avanço da linha de costa, com destaque para zonas de maior deposição sedimentar. Ressalta-se, ainda, que a área com maior ocorrência de erosão coincide com a presença da maior intervenção antrópica na costa do estado da Paraíba: um hotel construído na ponta da enseada, ainda na década de 1970, cuja edificação pode ter induzido modificações no comportamento morfodinâmico da praia.

A validação dos resultados encontra respaldo em estudos anteriores. Silva et al. (2024) identificaram padrões semelhantes nas praias do Cabo Branco e Seixas, em João Pessoa-PB, com predominância de ondas provenientes do leste (E) e leste-sudeste (ESE). Além disso, Vasconcelos (2008) já havia apontado a intensificação de processos erosivos ao sul da costa, associados à interferência antrópica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado na praia de Tambaú, em João Pessoa-PB, evidenciou a relevância de ferramentas como o SMC-Brasil e o CASSIE para a caracterização da dinâmica costeira e para a análise do regime de ondas. Os resultados demonstraram a predominância de ondas provenientes das direções leste (E) e leste-sudeste (ESE), que correspondem a mais de 95% das ocorrências registradas.

Também foi observada uma variação sazonal significativa, com ondas mais intensas nos meses de junho a agosto e maior frequência de ondas de leste entre dezembro e fevereiro.

A análise das séries temporais revelou alturas significativas de ondas ($H_{s50\%}$) variando entre 1,10 m e 1,35 m, com períodos de pico ($T_{p50\%}$) entre 6,47 s e 11,71 s. Em condições extremas, os valores aumentaram substancialmente, com H_{s12} atingindo até 2,33 m. Esses dados são essenciais para a compreensão da dinâmica sedimentar local, fortemente influenciada pelas correntes de deriva litorânea, cuja direção predominante é de sul para norte. Tal padrão resulta na formação de zonas com tendência à erosão ou à deposição ao longo da linha de costa.

A aplicação da ferramenta CASSIE indicou uma tendência de progradação da linha de costa em diversos transectos, com taxas anuais de avanço (EPR) variando entre 3,51 m/ano e 5,71 m/ano. Esses resultados reforçam o papel dos processos de deposição sedimentar na estabilização de setores específicos da linha costeira.

Os resultados deste estudo oferecem subsídios importantes para o planejamento costeiro sustentável, ressaltando a necessidade de monitoramento contínuo e de medidas de manejo integrado para mitigar os impactos da urbanização e dos processos naturais sobre a praia de Tambaú. A pesquisa também destaca a importância de estudos futuros que aprofundem a compreensão da interação entre processos morfodinâmicos e intervenções antrópicas, contribuindo para a conservação e gestão eficaz deste recurso natural estratégico.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L. R. et al. “Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira”. Revista da Gestão Costeira Integrada, v. 15, p. 135-151, 2014. Disponível em: <https://www.aprh.pt/rgci/rgci532.html>. Acesso em: 25 set. 2020. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci532>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). “Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil: Documento Temático – Ondas”. Brasília: MMA, 2018.

CARMO, J. S. A. D. “Living on the Coast in Harmony with Natural Processes”. Journal of Marine Science and Engineering, [s. l.], 2023.

DALINGHAUS, C. et al. (Org.). “Sistema de Modelagem Costeira do Brasil: estudos de caso”. Florianópolis: Editora da UFSC, 2018.

DONEGAN, L.; SILVEIRA, J. A. R.; SILVA, G. J. A. “Under and over: location, uses and discontinuities in a centrally located neighbourhood in João Pessoa city reflecting current urban planning effects”. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, p. e20180123, 2019.

IH-CANTABRIA. “SMC 3.0: Manual do Usuário”. IHCANTABRIA, Universidad de Cantabria/UFSC/IO-USP. p.18. 2013a.

IH-CANTABRIA. “SMC Tools: Manual do Usuário”. IHCANTABRIA, Universidad de Cantabria/UFSC/IO-USP. p.20. 2013b.

LABA, P. H. “Análise dos processos erosivos na praia central de Matinhos-PR utilizando o SMC-Brasil”. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

MUEHE, D. Geomorfologia Costeira. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. p. 253-308.

RODRIGUES, L. I. C. “Modelagem da dinâmica costeira e avaliação da vulnerabilidade à erosão e inundação na praia do Pecém, São Gonçalo do Amarante - CE, utilizando o sistema SMC-Brasil”. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SILVA, I. R. et al. “Avaliação da dinâmica litorânea da região de Baixo/Barra do Itariri, litoral norte do Estado da Bahia, utilizando o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil)”. Pesquisas em Geociências, [S. l.], v. 44, n. 2, p. 221–234, 2017. DOI: 10.22456/1807-9806.78272. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/78272>. Acesso em: 12 dez. 2024.

SILVA, N. C. F. et al. “Caracterização do clima de ondas das praias do Cabo Branco e Seixas, João Pessoa (PB)”. In Anais do XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, João Pessoa, 2024.

VASCONCELOS, Y. G. et al. “Contrasting short-term shoreline behaviour after the construction of sinusoidal groynes in NE Brazil”. Journal of South American Earth Sciences, v. 137, 104863, 2024.

VASCONCELOS, G. F. “*Dinâmica costeira das praias de Tambaú e Manaíra/PB*”. 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Centro de Ciências Exatas e da Natureza, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2008.

WARD, I. “*A Geotouristic Coastal Itinerary in the Municipality of João Pessoa, Paraíba*”. Geografia, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 53, 2022.

WANG, C. et al. “*The response of sediment transport and morphological evolution to storms with different characteristics*”. Science of The Total Environment, v. 946, p. 173987, 2024.

ZHANG, K. et al. “*A review on coastal erosion and protection: A global perspective*”. Ocean & Coastal Management, v. 212, 105793, 2021.

ZHANG, Y. “*Coastal Environmental Studies: Importance, Problem and Prospect*”. Journal of Geography & Natural Disasters, [s. l.], v. 2012, n. 4, 2012.