

# ONDAS DE TEMPESTADE E EROSÃO COSTEIRA NA ORLA MARÍTIMA DO NORTE FLUMINENSE: ANÁLISE DE DADOS METEOCEANOGRÁFICOS (1984-2024)

Karen de Almeida Oliveira<sup>1</sup>  
Eduardo Bulhões<sup>2</sup>

## INTRODUÇÃO

O litoral brasileiro está sujeito a agitação de ondas originados no oceano Atlântico, frequentemente influenciados por ventos locais associados a sistemas de baixa pressão na faixa equatorial (ZCIT<sup>3</sup>) e alta pressão no Atlântico Sul (ASAS<sup>4</sup>) e marcadamente à passagem de sistemas ciclônicos, sobretudo extratropicais, que geram as condições meteoceanográficas mais energéticas, ocasionando alterações na morfologia das praias e expondo infraestruturas litorâneas ao risco. A literatura define eventos de tempestade como aqueles em que a altura significativa das ondas (Hs) excede 3 metros (You; Lord, 2018, p.204) por um período superior a 12 horas (Rangel-Buitrago; Anfuso, 2011, p.4).

Estudos sobre regimes de ondas são geralmente conduzidos através de estatísticas globais e regionais baseadas em dados atmosféricos modelados em campos de ventos sobre o oceano (Bulhões, 2018), e tal perspectiva representa a reanálise. O WaveWatch III do NOAA<sup>5</sup>, sobre o qual Pianca *et al* (2010) realizaram uma leitura global do clima de ondas no país e o ERA 5<sup>6</sup>, no qual Eguchi e Klumb-Oliveira (2023), também em escala nacional, focaram em entender os padrões de ondas de tempestade são os modelos mais utilizados.

Outra abordagem importante no país, envolve o uso de dados observacionais, particularmente aqueles coletados por bóias oceânicas do PNBOIA<sup>7</sup> que, apesar da escassez de séries históricas abrangentes, tem relevância é inegável, sobretudo para a validação dos modelos. Regionalmente, Souza (1998), Parente (1999) e Pinho (2003),

---

<sup>1</sup>Mestranda do Curso de Geografia da Universidade Federal Fluminense - UFF, [karenalmeida@id.uff.br](mailto:karenalmeida@id.uff.br)

<sup>2</sup>Professor orientador: Doutor em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense - UFF, [eduardobulhoes@id.uff.br](mailto:eduardobulhoes@id.uff.br)

<sup>3</sup>Zona de Convergência Intertropical

<sup>4</sup>Alta Subtropical do Atlântico Sul

<sup>5</sup>NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

<sup>6</sup>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

<sup>7</sup>PNBOIA - Programa Nacional de Bóias

forneceram contribuições para a compreensão do clima de ondas na Baía de Campos, com enfoque nas condições meteoceanográficas em águas profundas.

Trechos em erosão e progradação no litoral brasileiro, vêm sendo estudado por grupos de pesquisadores, em sua maior parte reunidos nos dois principais diagnósticos sobre o tema organizados por Muehe (2006, 2018). Mais recentemente Luijediijk et al. (2018), utilizaram ferramentas computacionais para detectar em alta resolução espacial os segmentos em erosão, estabilidade, acreção e progradação no litoral global, a partir da análise de imagens de satélite entre 1984 e 2016. Recentemente esses trabalhos foram analisados por Silva e Bulhões (2023), que mostram que o litoral Sudeste do país tem cerca de 15% de suas praias recuando frente à erosão costeira.

Neste trabalho, o problema a ser avaliado parte desta incerteza quanto ao grau de participação das ondas oceânicas, sobretudo aquelas geradas por sistemas de tempestade, nos trechos em que o fenômeno do recuo erosivo da linha de costa vem sendo identificado. No estado do Rio de Janeiro, processos de erosão costeira resultantes de déficit sedimentar e impactos de ondas de tempestade ocorrem em alguns segmentos específicos (MUEHE et al., 2018, p.482), como é o caso do litoral do norte fluminense, ocasionando assim modificações no estoque sedimentar de praias e vulnerabilização de áreas ocupadas.

Este estudo tem como objetivo geral avaliar o comportamento das ondas oceânicas que chegam com maior energia nas áreas identificadas como em erosão ao longo do litoral Norte Fluminense e detectar o grau de correlação com as áreas identificadas como em erosão costeira.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A estratégia metodológica subdivide-se em três etapas técnicas: análise exploratória do clima de ondas e configuração dos cenários; simulações de ondas em águas rasas; e análise dos padrões de ondas em áreas de erosão costeira. Segue um detalhamento inicial de cada uma delas.

**Etapa 1.** Análise exploratória do clima de ondas: Todos os procedimentos de extração, manipulação e geração de resultados estatísticos foram executados em ambiente R. Os dados do modelo ERA5, que oferece dados horários na superfície desde 1940 até o presente, estão disponíveis no produto de reanálise do *Copernicus Climate Data Store*. As variáveis específicas analisadas incluem a velocidade e direção do vento a 10 metros acima da superfície, a direção média das ondas, a altura significativa das

ondas combinadas de vento e swell, a altura máxima individual das ondas e o período médio das ondas. Esses dados, extraídos para a latitude  $-22,05^\circ$  e longitude  $-40,5^\circ$ , em perspectiva histórica, permitem a identificação de padrões e a construção de cenários de ondas de tempestade para as simulações em águas rasas.

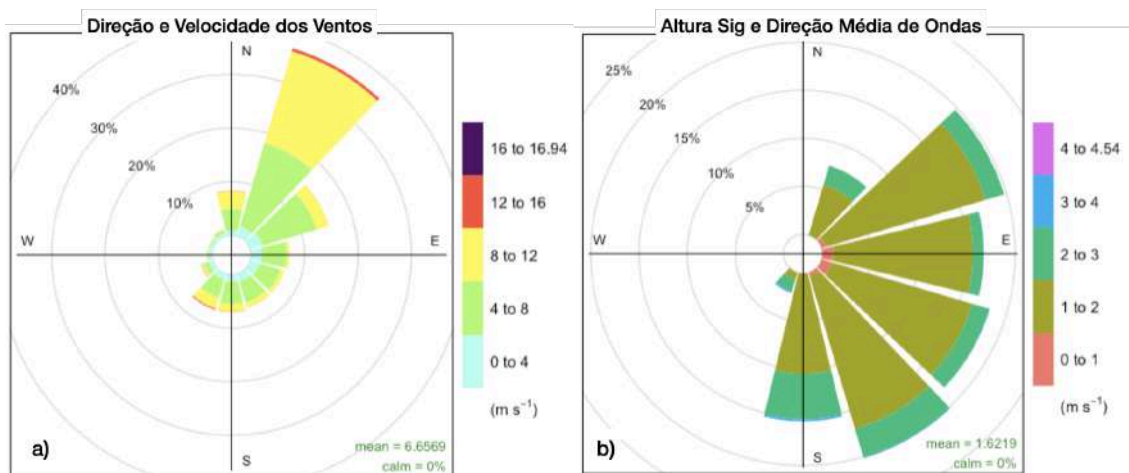
**Etapa 2.** Simulações de ondas em águas rasas: Com os cenários definidos é possível a realização das simulações para águas rasas. O *Mike21*, versão 2024, é um pacote de modelagem que faz diferentes tipos de simulações bidimensionais em ambientes aquáticos e será utilizado para modelagem de ondas no domínio oceânico. O pacote de modelagem se divide em diversos módulos, sendo o módulo *Mike Zero* utilizado para a pré-simulação, o que inclui a construção dos limites de terras emersas, de quadrante e o desenho da malha irregular de pontos e a acoplagem de dados batimétricos xyz (longitude, latitude e profundidade). Adicionalmente, o módulo *Mike21 SW* que é um modelo espectral de ondas oceânicas simula o crescimento, ou decaimento e transformação de ondas do tipo vaga e ondas do tipo marulho (*swell*) para as áreas litorâneas. O mesmo pode utilizar duas equações distintas para resolver a propagação de ondas oceânicas para águas rasas, uma sendo a equação de conservação de energia de ondas de forma parametrizada e a outra de forma completa, em que estas variam basicamente em termos de custos computacionais e refinamento dos resultados (Bulhões, 2011; Oliveira Filho, 2016).

**Etapa 3.** Padrões de ondas em áreas de erosão costeira: Uma aproximação bem aceita na comunidade acadêmica hoje são os dados de mobilidade da linha de costa gerados por Luijendijk et al. 2018. Tais autores utilizaram rotinas automatizadas de extração da posição da linha de costa entre 1984 e 2016 a partir de imagens *Landsat*, e posteriormente produziram transectos o que permitiu a obtenção de dados espaçados a cada 500m o que possibilitou acompanhar a posição da linha de costa, no geral duas vezes ao ano, e calcular as tendências positivas (acrecção em direção ao oceano) e negativas (erosão em direção ao continente) do deslocamento da linha de costa para todo o perímetro litorâneo global. Tais resultados corroboram o já identificado por Muehe (2006 e 2018) e permitem identificar níveis de erosão que correspondem a taxas de deslocamento inferiores a  $-0,5$  m/ano e nessa classe incluem-se ainda uma subclassificação em *erosão intensa* (entre  $-1$  e  $-3$ m/ano), *erosão severa* (entre  $-3$  e  $-5$ m/ano) e *erosão extrema* quando as taxas de erosão são inferiores a  $-5$ m/ano. Tais posições serão extraídas para detectar padrões interanuais de ondas de tempestade que se relacionem com as taxas de erosão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste momento, o estudo ainda em andamento permite a apresentação de resultados preliminares. A extração da base de dados meteoceanográficos foi concluída, e os resultados do modelo entre 1940 e 2023 indicam que a direção média dos ventos é de leste ( $92,8^\circ$ ) com velocidades médias de  $6,7\text{m/s}$  e máximas de  $17\text{m/s}$ . O desvio padrão da direção dos ventos é de  $83,7^\circ$  indicando a prevalência de ocorrência de ventos desde a direção norte até a direção sul (Figura 1a). Quanto às ondas, as direções médias apontam para leste-sudeste ( $113,8^\circ$ ) com desvio padrão de  $47,5^\circ$  o que indica majoritariamente ondas entre as direções sul-sudeste e leste-nordeste (Figura 1b). Quanto à altura significativa a média é de  $1,6\text{m}$  ( $\text{sd} = 0,4$ ), sendo a máxima de  $4,5\text{m}$ . Quanto às alturas máximas a média é de  $3,1\text{m}$  ( $\text{sd} = 0,4$  chegando a uma máxima de  $8,4\text{m}$ ). O período médio de ondas é de  $7,4\text{s}$  com o mínimo de  $4,5\text{s}$  e o máximo de  $15\text{s}$ .

**Figura 1.** Composição básica do clima de ventos e ondas para posição representativa da Baía de Campos, com dados entre 1940 e 1983 gerados pelo modelo ERA5.

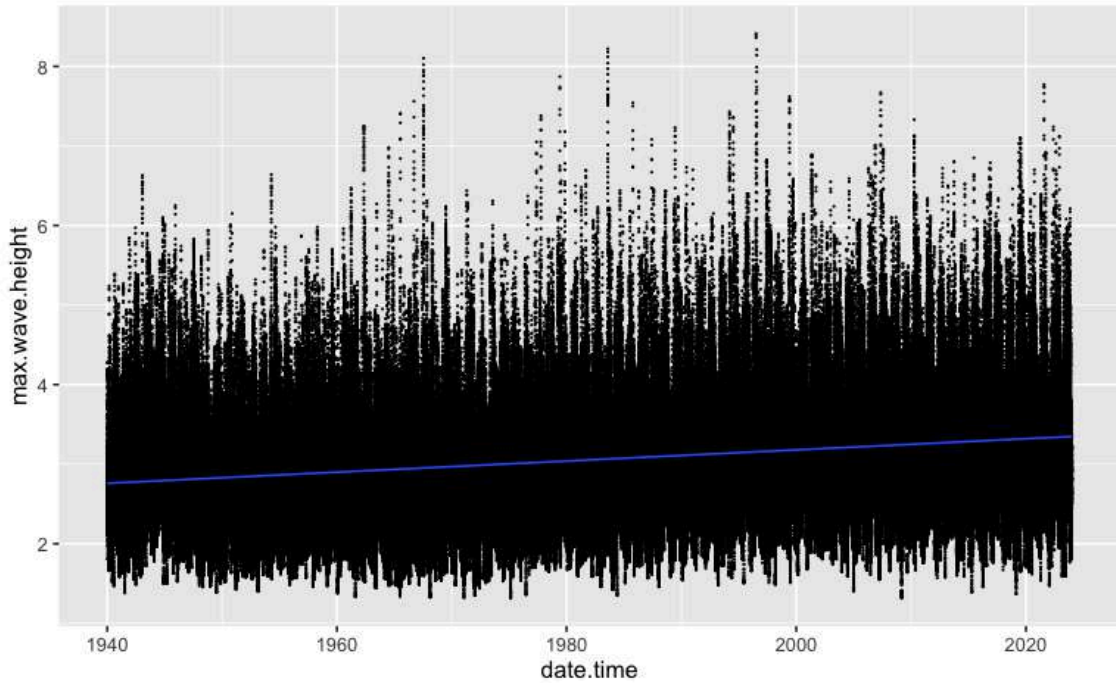


Fonte: Elaborado pela autora

O gráfico da Figura 2, ilustra a altura máxima das ondas ao longo de um período de oito décadas (1940 a 2023). A linha de tendência indica elevação na altura máxima das ondas com o passar do tempo e o incremento é de  $0,01$  por ano. A distribuição dos dados representa uma ampla variabilidade, com  $83\%$  das ondas entre  $2$  e  $4$  metros e  $11\%$  entre  $4$  e  $6$  metros, enquanto eventos extremos ocasionalmente ( $0,2\%$ ) ultrapassam os  $6$  metros. Contabilizando valores médios ano a ano o crescimento foi de  $12,8\%$ . Eguchi e Klumb-Oliveira (2023) em uma análise interanual dos dados de alturas de

ondas de tempestade por regressão linear encontraram taxas semelhantes de crescimento.

**Figura 2.** Valores e tendência da variável Altura Máxima de Ondas para a Bacia de Campos, com dados entre 1940 e 1983 gerados pelo modelo ERA5.



Fonte: Elaborado pela autora

Análise Preliminar de Áreas em Erosão: Os dados sobre a mobilidade da linha de costa, gerados por Luijedijk et al. (2018), foram extraídos para a área de estudo, entre a foz do rio Macaé, ao sul, e a foz do rio Itabapoana, ao norte (Figura 3), representando a cada 500 metros as taxas de erosão, estabilidade ou acreção costeira. Nesses aproximados 200 km de linha de costa, 35% dos perfis analisados encontram-se em acreção, 34% em estabilidade e 31% encontram-se em erosão. Dentre os em erosão, 14% apresentam taxas erosivas entre 0,5 e 1 m/ano, 14% com taxas erosivas (intensas) entre 1 e 3 m/ano, 2% em taxas erosivas (severas) entre 3 e 5 m/ano e apenas 1,5% com taxas erosivas extremas acima de 5 m/ano.

**Figura 3.** Mapa representativo da área de estudo, entre a foz do rio Macaé, ao sul, e a foz do rio Itabapoana ao norte. São também ilustradas a posição da bóia virtual ERA5 representando a fonte de obtenção de dados do modelo e as posições de cada um dos 405 perfis a cada 500m extraídos para avaliar as taxas de mobilidade da linha de costa.





Fonte: Elaborado pela autora com dados de Luijendijk et al. (2018)

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo enfatiza a importância de compreender o comportamento das ondas oceânicas de alta energia, principalmente as geradas por sistemas de tempestade, no contexto do litoral do Norte Fluminense e sua relação com o fenômeno de erosão costeira. A pesquisa, ainda em fase de desenvolvimento, visa estabelecer correlações entre a dinâmica dessas ondas e os fenômenos erosivos observados na região neste trecho da linha de costa.

Embora os resultados finais ainda estejam em processo de consolidação, as análises preliminares sugerem que as ondas de alta energia desempenham um papel determinante na modificação da linha de costa, especialmente em episódios de tempestade. A utilização de simulações oceânicas e dados meteoceanográficos tem se mostrado uma abordagem eficaz para a construção de um panorama detalhado das interações entre as ondas e a morfologia costeira.

À medida que o estudo avança, espera-se que os resultados contribuam de forma significativa para o desenvolvimento de estratégias de mitigação mais precisas e eficazes, além de abrir novas perspectivas para investigações futuras, ampliando o conhecimento sobre a dinâmica costeira em outras regiões do litoral brasileiro.

**Palavras-chave:** Dinâmica costeira; Processos litorâneos; Geografia marinha.

## REFERÊNCIAS

- BULHÕES E. Exposição de Praia, Clima de Ondas e Processos Físicos em Praias de Enseada. Estudo de Caso em Armação de Búzios, Rio de Janeiro. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geofísica Marinha, Universidade Federal Fluminense, 217p. 2011.
- EGUCHI, B. M. M.; KLUMB-OLIVEIRA, L. Clima de ondas de tempestades na costa brasileira utilizando 41 anos de dados da reanálise ECMWF ERA5. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 544-565, 2023.
- KLUMB-OLIVEIRA, Leonardo; DA SILVEIRA PEREIRA, Nair Emmanuela; LEÃO, Rafael Rocha. Morfodinâmica multitemporal em praia refletiva no litoral centro-norte do RJ, em resposta ao clima de ondas regionais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, n. 1, p. 73-85, 2015.
- LOUREIRO, C.; FERREIRA, Ó.; COOPER, J. A. G. Contrasting morphologic behaviour at embayed beaches in Southern Portugal. **Journal of Coastal Research**, v. 56, p. 83-87, 2009.
- LUIJENDIJK, A.; HAGENAARS, G.; RANASINGHE, R.; BAART, F.; DONCHYTS, G.; AARNINKHOF, S. The state of the world's beaches. **Nature Scientific Reports**, v. 8, n. 6641, 2018.
- MUEHE, D. Aspectos Gerais da Erosão Costeira no Brasil. *Revista Mercator*, v. 4, p. 1-110, 2005.
- MUEHE, D. (Org.). Erosão e progradação do litoral brasileiro. 1. ed. Brasília: **MMA**, 2006. 46 p.
- MUEHE, D. (Org.). Panorama da Erosão Costeira no Brasil. 1. ed. Brasília: **MMA**, 2018. 5 p.
- NORDSTROM, Karl F. Recuperação de praias e dunas. São Paulo: **Oficina de Textos**, 2010. 263 p.
- OLIVEIRA FILHO, S. R.; SANTOS, R. A.; FERNANDEZ, G. B. Erosão e recuperação de praias refletivas de alta energia impactadas por ondas de tempestade geradas por ciclone tropical. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 21, n. 2, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i2.1455.

