

ANÁLISE DO BALANÇO SEDIMENTAR NA PRAIA BRAVA, MATINHOS-PR, A PARTIR DA MODELAGEM NUMÉRICA

Lucas de Paula Soares¹; Mauricio Almeida Noernberg ²

1 – Universidade Federal do Paraná/Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

E-mail: lucasdepsoares40@gmail.com

2 - Universidade Federal do Paraná/Centro de Estudos do Mar. E-mail: m.noernberg@ufpr.br

Abstract: *The beach environment is a complex dynamic system that responds to the action of waves and currents through a series of changes that can occur on different time scales and with the intervention of human constructions. Beach erosion poses risks in areas occupied by humans, such as Brava beach in Matinhos (Paraná state – Brazil), which is chronically affected by erosive processes. The study was carried out using the SMC (Coastal Modeling System) software as the main tool to simulate the dynamics for the coastal area of Matinhos, as well as to determine the wave climate to be applied in the simulations. Residual sediment transport showed a preferential direction from south to north with divergence of directions in the area most susceptible to erosion processes.*

Keywords – *numerical modeling, wave climate, sediment transport, SMC-Brasil.*

Resumo: *O ambiente de praia é um sistema dinâmico complexo que responde à ação das ondas e correntes através de uma série de mudanças que podem ocorrer em diferentes escalas de tempo e na intervenção de construções humanas. A erosão em praias representa riscos em regiões ocupadas por humanos, como é o caso da praia Brava em Matinhos (estado do Paraná – Brasil), cronicamente afetada pelos processos erosivos. O estudo foi realizado utilizando o software SMC (Sistema de Modelagem Costeira) como principal ferramenta para simular a dinâmica para a área costeira de Matinhos, bem como para determinar o clima de ondas a ser aplicado nas simulações. O transporte residual de sedimentos apresentou uma direção preferencial de sul para norte com divergência de direções na área mais suscetível aos processos erosivos.*

Palavras chave – *modelagem numérica, clima de ondas, transporte de sedimentos, SMC-Brasil; Keywords: numerical modeling, wave climate, sediment transport, SMC-Brasil*

1. INTRODUÇÃO

As praias arenosas apresentam grande importância como áreas de lazer, recreação, turismo e serviços ecossistêmicos, ocupando mais de um terço do litoral global (Barbier et al. 2011, Luijendijk et al. 2018). De uma perspectiva geológica, têm um valor natural atuando como sistema de defesa para a costa, exposta ao constante risco de erosão devido à ação das ondas e das marés.

A construção de edificações, avenidas beira-mar e calçadas sobre os sistemas praias ativos e de dunas frontais intensifica a ação dos processos erosivos, colocando em risco as populações litorâneas (Simó e Horn Filho 2004, Klein et al. 2006). Esses fatores combinados às características meteo-oceanográficas locais, vêm causando um crescente problema de erosão, contribuindo para a redução da resiliência das praias (Gomes e Silva 2014).

Assim como as ações antrópicas, as alterações no balanço sedimentar, o aumento do nível médio do mar e a ocorrência de fenômenos naturais intensos, como as tempestades, colocam em risco as regiões litorâneas, gerando retração na linha de costa e inundações costeiras (Ferreira et al. 2006, Masselink et al. 2016).

Segundo Nerem et al. (2018), o nível médio global do mar tem aumentado de forma acelerada nos últimos 25 anos, sendo intensificado pelas mudanças climáticas (Jevrejeva et al. 2016, Bamber et al. 2019). Essas mudanças também devem afetar as ondas e marés de tempestade (Hemer 2013, Vousdoukas et al. 2018).

O principal forçante dos processos costeiros é o clima de ondas, determinado pela ação dos ventos originados no Atlântico Sul para a costa Sul, e responsável pelo transporte longitudinal e transversal à linha de costa através das correntes litorâneas (Muehe 1998). A energia e intensidade das ondas e recorrência de fe-

nômenos naturais intensos, regem a dinâmica dos processos erosivos e acrecivos na interface oceano e continente.

O Brasil apresenta uma carência de dados de ondas, que pode ser suprida através de bancos de dados gerados a partir de modelos numéricos (dados de reanálise e com downscaling), como proposto pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria/Espanha. O modelo disponibiliza uma base de dados de ondas para o Brasil através do SM-C-Brasil, uma ferramenta computacional que combina metodologias de trabalho, base de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira.

O município de Matinhos é conhecido por suas praias arenosas e destino popular que atrai milhares de visitantes ao longo do ano, principalmente durante o verão (Angelotti e Noernberg 2010). Teve a ocupação da faixa litorânea como principal ator na degradação da vegetação nativa das dunas frontais, contribuindo com o processo de erosão costeira (Angulo et al. 2018). A ocupação da região ocorreu sem planejamento, tendo como agravante a construção de edificações muito próximas à praia, impossibilitando o desenvolvimento de um novo perfil praias que reestabeleça seu equilíbrio dinâmico. Na década de 1970, a porção central da praia Brava foi aterrada para a construção da avenida Beira Mar, interligando a orla de Caiobá ao centro da sede urbana de Matinhos, desconsiderando o arco praias existente (Angulo 2000).

Para mitigar os efeitos da erosão na infraestrutura do município, alguns planos de gestão costeira foram propostos a fim de evitar problemas relacionados (Angulo et al. 2016, Governo do Estado do Paraná 2019). No ano de 2022, a orla de Matinhos recebeu aproximadamente 3 milhões de metros cúbicos de areia, além da construção de estruturas rígi-

das (molhes e esporões) para atenuar os efeitos dos processos erosivos (Ratton 2020).

O presente trabalho foi realizado anteriormente às obras realizadas e os resultados obtidos servem de linha de base para a compreensão dos processos sedimentares (erosão/acreção) na nova configuração morfológica da área de estudo.

O estudo analisou a resposta do balanço sedimentar da Praia Brava, frente às mudanças nos padrões de onda no período de 60 anos (1948-2008), caracterizando o clima de ondas local para o intervalo de 60 anos e estimando o transporte de sedimentos médio para o período de 60 anos de dados, a partir da base de dados do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil).

1.1. Arco praial Matinhos-Caiobá

O município de Matinhos possui uma área de 118 km², limitando-se ao norte com o município de Pontal do Paraná e ao sul com Guara-

tuba. A população residente é de 41.416 habitantes (IBGE 2022), sofrendo um aumento exponencial nos períodos de verão e feriados (Angelotti e Noernberg 2010).

O arco praial Matinhos-Caiobá tem direção norte-nordeste, apresentando-se como uma das principais praias urbanas do município de Matinhos, com aproximadamente 3 km de extensão. A norte tem como limite a Ponta de Matinhos e a sul o Morro do Boi (figura 1). No setor norte do arco encontra-se a zona mais crítica de erosão (Angulo 2000, Porto Lima 2008, Novak et al. 2016).

As partes central e norte do arco praial são classificadas como oceânicas, sem a influência direta de desembocadura da baía de Guaratuba. A parte sul sofre a influência do lobo frontal do delta-de-maré vazante da baía. Na parte central, a construção da avenida Beira Mar sobre a praia, alterou a curvatura natural do arco praial, acarretando problemas erosivos (Angulo et al. 2018).

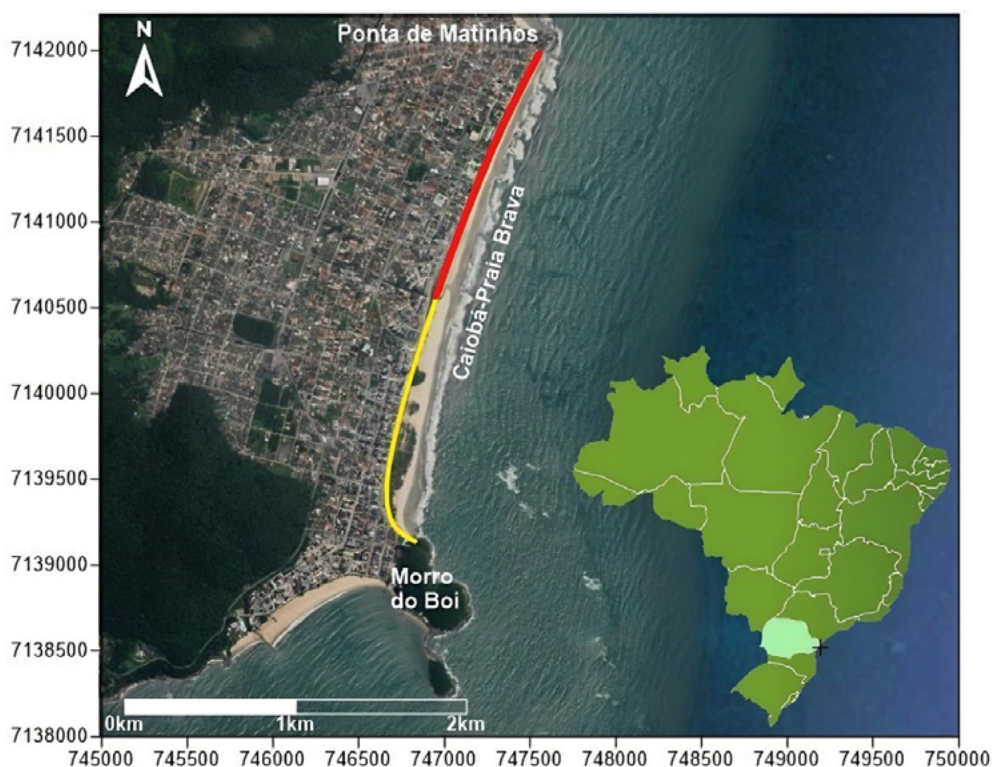


Figura 1. Localização da área de estudo. Em amarelo, a praia de Caiobá; em vermelho, a praia Brava.

2. METODOLOGIA

O arco praial Matinhos-Caiobá foi setorizado em duas áreas: setor 1, correspondente à praia de Caiobá, ao sul; e setor 2, contemplando a Praia Brava, ao norte (figura 2a).

Para análise do transporte sedimentar, 7 perfis transversais foram selecionados, sendo 3 para o setor 1; e 4 para o setor 2 (figura 2b).

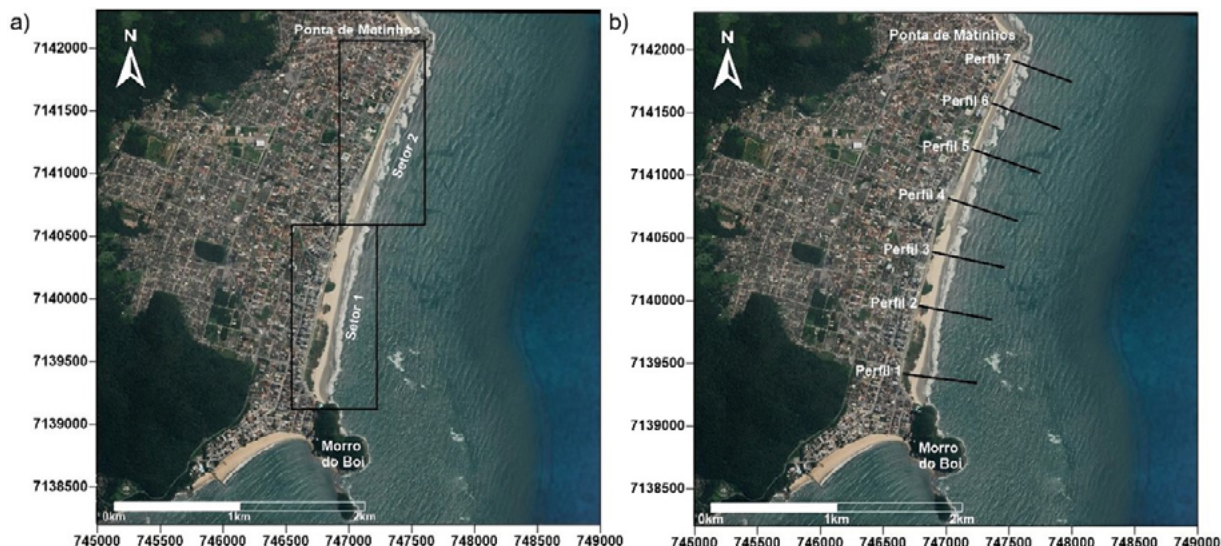


Figura 2. (a) setorização da praia Brava – setor 1 praia de Caiobá e setor 2 Praia Brava; e (b) perfis transversais.

2.1. Ferramentas e modelos numéricos

2.1.1. Modelagem numérica

A ferramenta de simulação adotada para este estudo foi o SMC-Brasil. O SMC-Brasil é um pacote de ferramentas numéricas desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria (IH Cantábria) na Universidade de Cantábria, Espanha, adaptado e transferido para o governo federal brasileiro em 2011 por meio do projeto intitulado "Transferência de metodologias e ferramentas para apoio à gestão do litoral brasileiro" (<https://smcbrasil.ihcantabria.com/presentacao/>).

O SMC-Brasil é composto por um banco de dados climático de ondas de 60 anos para a costa brasileira. Apresenta ainda um módulo hidrodinâmico, que simula a variação do nível do mar e o fluxo em resposta às interações de onda em águas rasas, e um módulo para a avaliação das taxas de transporte de sedimentos e das variações topográficas do fundo marinho,

alterações resultantes de fluxos combinados de correntes de onda.

A escolha da ferramenta numérica levou em conta a disponibilidade do banco de dados de análise do clima de ondas e as ferramentas integradas para análise estatística, propagação de ondas, fluxos de corrente gerados por ondas e transporte de sedimentos.

2.1.2. Dados Batimétricos

A batimetria utilizada neste estudo é proveniente da base de dados do SMC-Brasil, obtida a partir da digitalização das cartas náuticas da Marinha do Brasil. Para a batimetria de detalhe, foi realizado um levantamento no mês de abril de 2018, feito em frente à área de estudo até à isolinha de 10 m de profundidade. O levantamento foi realizado a partir de uma ecosonda (modelo Echomap 42dv da Garmin) e um DGPS (antenas modelo Leica GS15) no modo cinemático, para georreferenciamento dos pontos coletados.

Os equipamentos DGPS foram disponibilizados pelo Laboratório de Topografia e Geodésia do Centro de Estudos do Mar (CEM-UFPR). Os dados de batimetria foram interpolados por meio do software QGIS (versão Las Palmas, 2.18), a partir da Técnica Triangular Irregular Network (TIN), utilizando dados disponibilizados pelo Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento (CEM-UFPR).

2.1.3. Base de dados de ondas

O módulo IH-Data é composto por três bancos de dados: DOW (Downscaled Ocean Waves), associado a séries temporais de ondas; GOT (Global Ocean Tides) associado a séries temporais do nível do mar para as marés astronômicas e GOS (Global Ocean Surge) designada para as marés meteorológicas.

Estas bases de dados do clima de ondas e do nível do mar foram construídas por uma reanálise de 60 anos (de 1948 a 2008) de campos de vento e dados de satélite processados, usando os modelos numéricos Wavewatch III, Swan, Roms e TPXO (Reguero et al. 2012).

Para o clima de ondas, os dados de campo de vento fornecidos pelo projeto de reanálise NCEP / NCAR, foram modelados em águas profundas usando o Wave Watch III, versão 2.2 (Tolman 1989) com resolução de 0,25°, gerando os pontos GOW (Global Ocean Waves), posteriormente calibrado para minimizar possíveis alterações nos resultados. A metodologia utilizada para calibração é descrita em Mínguez et al. (2011).

A segunda etapa é o downscaling para atribuir características regionais a esse banco de dados. Foi realizada uma série de simulações numéricas aplicando o SWAN (Booij et al. 1999), usando uma batimetria mais detalhada e campos de vento regionais. Foram utilizadas 17 grades com resolução de 1 km distribuídas ao longo da costa brasileira, gerando os dados do DOW.

2.1.4. Clima de Ondas

O clima de ondas é obtido utilizando o módulo IH-AMEVA, uma ferramenta estatística que calcula as variáveis ambientais. O ponto DOW selecionado para a propagação de ondas até a costa encontra-se a 23,3 m de profundidade, localizado nas coordenadas 25°57'29.7"S e 48°12'50.3"O, utilizado como referência para extrair as informações do banco de dados IH-AMEVA e calcular a série dos estados de mar mais representativos.

O cálculo dos estados de mar é realizado por meio da técnica MaxDiss, uma técnica estatística que organiza e classifica espaços multidimensionais, a fim de buscar os grupos mais distintos em um conjunto de dados (Snarey et al. 1997).

A escolha do ponto DOW levou em consideração as limitações do modelo de propagação de onda, devido à necessidade de malhas muito amplas e às características do ponto, considerando a razão do comprimento de onda em função da profundidade ($L/2 > d$).

2.1.5. Propagação de Ondas

Para a propagação de ondas até a costa a partir do ponto DOW selecionado foram criadas três malhas levando-se em consideração o cálculo das variáveis ambientais obtidas a partir do módulo IH-AMEVA. A construção das malhas utilizadas levou em conta a resolução espacial adequada à longitude de onda, a direção principal de propagação de ondas restrita ao eixo X, o giro das ondas a $\pm 55^\circ$ e as instabilidades existentes nos contornos das malhas em função da ausência de variação da batimetria para as ondas que se propagam próximas a eles.

Assim as malhas foram construídas com os contornos laterais afastados da zona de interesse. A malha 001 foi utilizada para a propagação de ondas de ENE, com resolução de 25 m; para a propagação das ondas de ESE, foram utilizadas as malhas acopladas 002 e 003, com resolução de 100 m e 25 m, respectivamente; já para as

ondas de SSE, foi utilizada a malha 004, com resolução de 25 m. Os 100 casos foram propagados para os estados de maré baixa e maré alta

(maré baixa = 0 m e maré alta = 2 m). Na figura 3 são apresentadas as malhas de propagação e o ponto DOW selecionado.

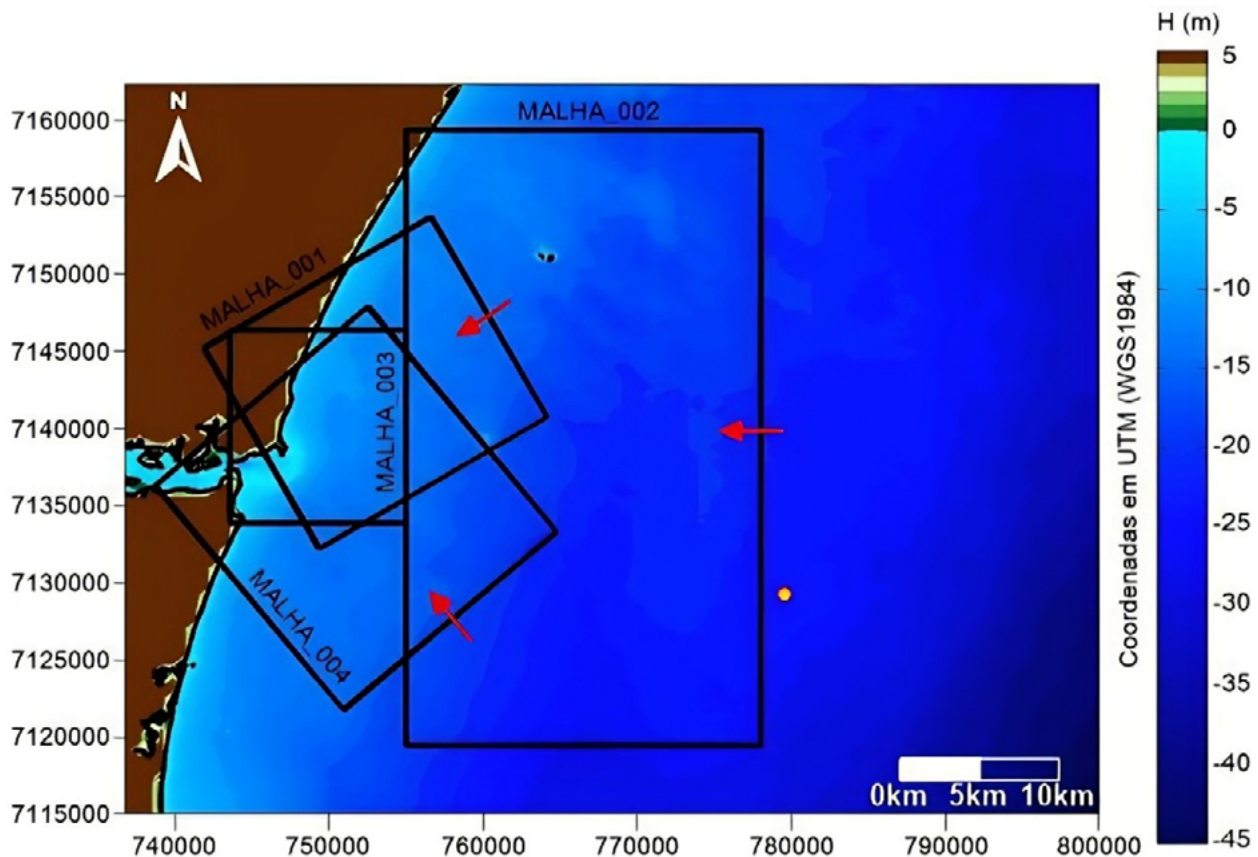


Figura 3. Localização das malhas utilizadas nos modelos de propagação de ondas. Malha_001 (ENE), Malha_002 e Malha_003 (ESE) e Malha_004 (SSE). As setas em vermelho sinalizam as entradas principais de direção de ondas no eixo X de cada malha. Em amarelo, o ponto DOW selecionado.

Para a propagação de onda até a costa foi utilizado o modelo Oluca-sp, que aplica o procedimento de Booij (1981). O Oluca-sp considera que a refração, a difração e o acúmulo de componentes discretos de onda sejam regidos pela abordagem parabólica de onda-corrente da equação de declividade (Kirby 1994), expandida para incluir os efeitos de corrente de Booij (1981) e Kirby (1983). O modelo também utiliza três diferentes modelos estatísticos de dissipação que prevêm as perdas de energia devido à quebra de ondas.

2.1.6. Correntes

O módulo Copla-sp, foi utilizado neste estudo para o cálculo das correntes próximas a praia, resolvendo as equações de fluxo dentro da

zona de arrebentação, e utilizando como dados de entrada os resultados da propagação de ondas calculados a partir do modelo Oluca-sp. O Copla-sp é um modelo bidimensional das correntes de praia que determina o tensor de radiação de onda a partir dos resultados obtidos de altura e direção da propagação de onda, calculando o campo de correntes e níveis em tensores de radiação por meio de um modelo não linear que resolve as equações integradas de Navier – Stokes.

2.1.7. Transporte de Sedimentos

Para o cálculo do transporte de sedimentos foi utilizado o Mopla, uma ferramenta de modelagem morfodinâmica para o cálculo do transporte sedimentar e evolução da batimetria de uma

praia. O Mopla utiliza o cálculo de correntes do módulo Copla como entrada. A formulação utilizada no estudo foi a do CERC (USACE 1984).

A fórmula do CERC foi elaborada pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA para cálculos de transporte de sedimentos. Ela relaciona a taxa de transporte de sedimentos ao longo da praia com o fluxo da energia das ondas por unidade de comprimento da costa, sendo amplamente adotada e calibrada (Komar e Inman 1970, Kraus et al. 1982). Para este estudo foi utilizada a fórmula do CERC aplicando-se o coeficiente de Del Valle et al. (1993).

Os valores do diâmetro médio de sedimento utilizados para a simulação foram de 0,2 mm para a área de estudo, conforme observado por Quadros (2002).

3. RESULTADOS

3.1. Avaliação da climatologia de ondas

As direções de ondas mais frequentes obtidas a partir da base de dados do SMC-Brasil são provenientes dos quadrantes leste (E), leste-sudeste (ESE), sudeste (SE) e sul-sudeste (SSE), perfazendo 98% das ondas incidentes no ponto DOW escolhido. Há também ocorrência de ondulações oriundas dos quadrantes leste-nordeste (ENE) e sul (S), correspondentes a 1,46% das direções de onda, como apresentado na tabela 1.

Direção (°N)	Probabilidade de Direção (%)	Hs50% (m)	Tp50% (s)	Hs12 (m)	Tp12 (m)
ENE	0,36	1,1401	7,3091	2,7377	10,8760
E	12,14	1,3698	7,1297	2,7690	11,4212
ESE	47,33	1,5885	7,0921	3,0359	12,7639
SE	29,17	1,7690	8,3379	3,5267	13,9954
SSE	9,36	2,0618	9,8572	4,0899	14,0824
S	1,10	2,1135	9,4685	3,7710	13,3567

Tabela 1. Caracterização do clima de ondas calculado com o módulo AMEVA.

As cinco principais direções (E, ESE, SE, SSE e S) somadas, representam 99,10% da ondulação incidente no ponto DOW, das quais para as condições medianas, a altura significativa de onda (Hs50% = altura significativa de onda mediana) variou de 1,14 m a 2,11 m com o período de pico (Tp50%) entre 7,0 s e 9,8 s (tabela 1).

Para as condições de regime extremo (Hs12 = altura significativa de onda superada 12 h ao ano) os valores médios variaram entre 2,73 m e 4,08 m. Os períodos de pico para condições de evento extremo (Tp12) foram de 10,8 s para as ondas de tempestade do quadrante ENE a 14,0

s para as ondas de tempestade do quadrante SSE (tabela 1).

Na Figura 4 são apresentadas as rosas direcionais de Hs para as estações do ano. Nota-se que há predomínio das ondas provenientes de ESE em todas as estações do ano. Para os períodos de verão, primavera e outono as ondulações que atingem o município de Matinhos têm contribuição de menor altura de onda vindas de E, SE e S. Durante o inverno, observa-se um aumento das ondulações provenientes do quadrante SE, bem como de NE e S.

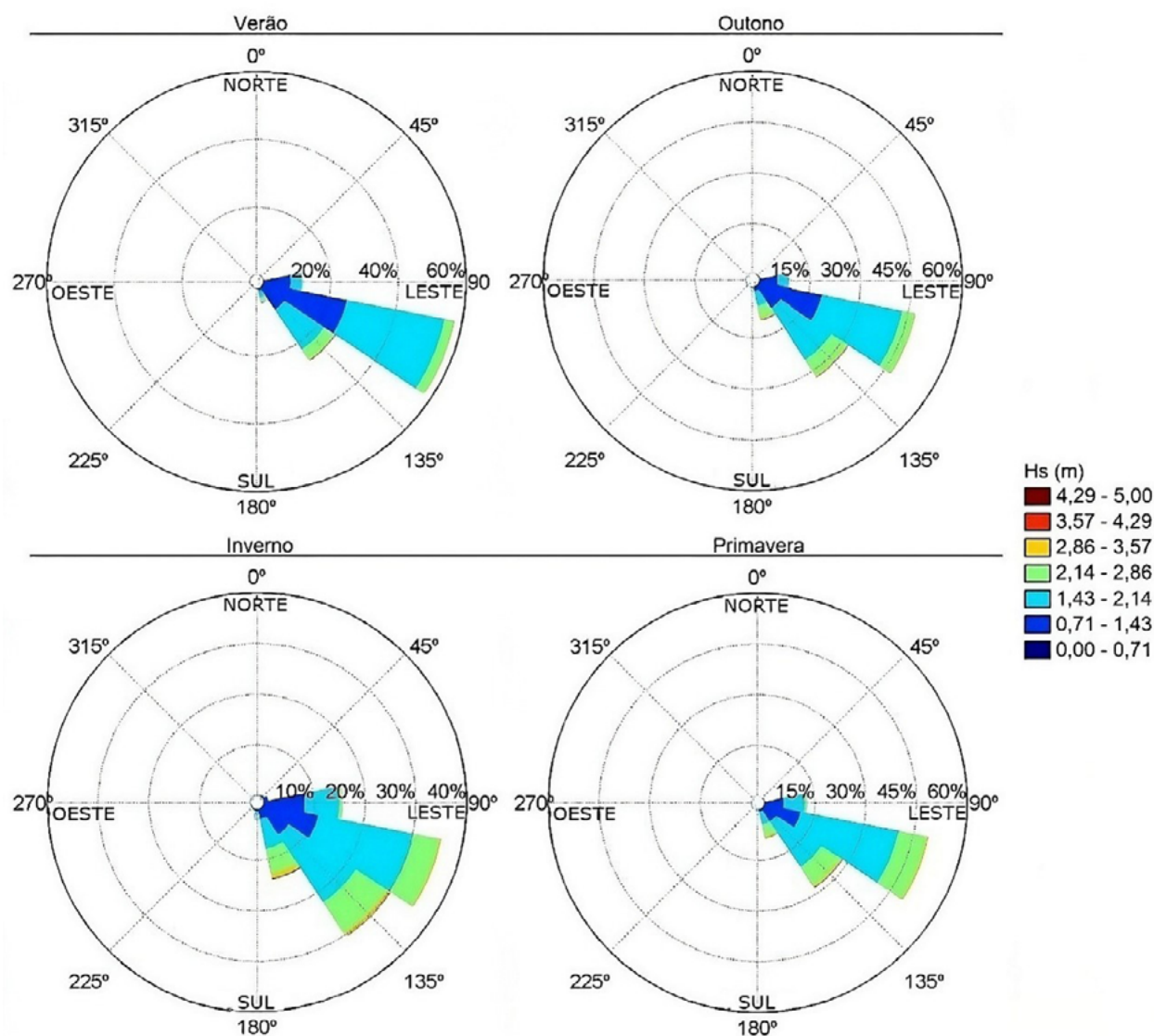


Figura 4. Rosas direcionais de altura significativa para cada estação do ano (período de 60 anos).

A altura significativa de onda na zona externa da área de estudo apresenta variação entre 0,50 m e 4,20 m, onde 75% dos estados de mar apresentam ondas inferiores a 1,9 m (figura 5a). O período de pico varia entre 2 s e 16 s, onde 75% dos estados de mar apresentam valores inferiores a 9,0 s (figura 5b).

Por meio da Distribuição de Valores Extremos Generalizados (GEV; Fisher & Tippett, 1928) observa-se que para um período de retorno de

10 anos a altura significativa de onda supera os 4,2 m no ponto DOW, com o período de pico de acima dos 15 s (figuras 5c e 5d).

A relação entre a altura significativa de onda, período de pico e direção indica que as ondas mais frequentes no ponto DOW apresentam altura significativa de onda entre 1,3 m e 1,9 m, período de pico de aproximadamente 7 s e direção de ondas de 120° (figura 6).

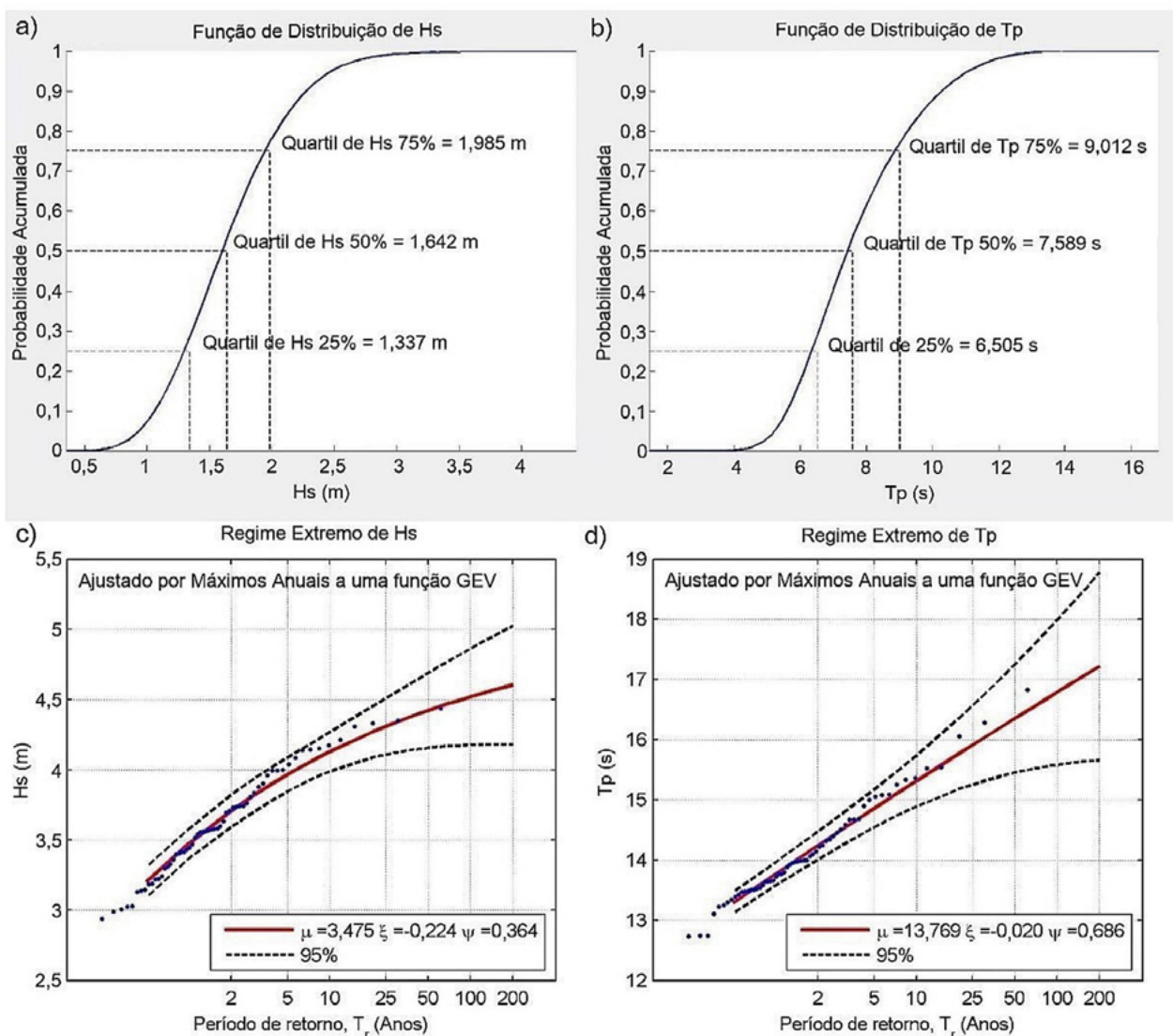


Figura 5. Características de distribuição da altura de onda significativa (a), período de pico (b) e regime extremo (c e d).

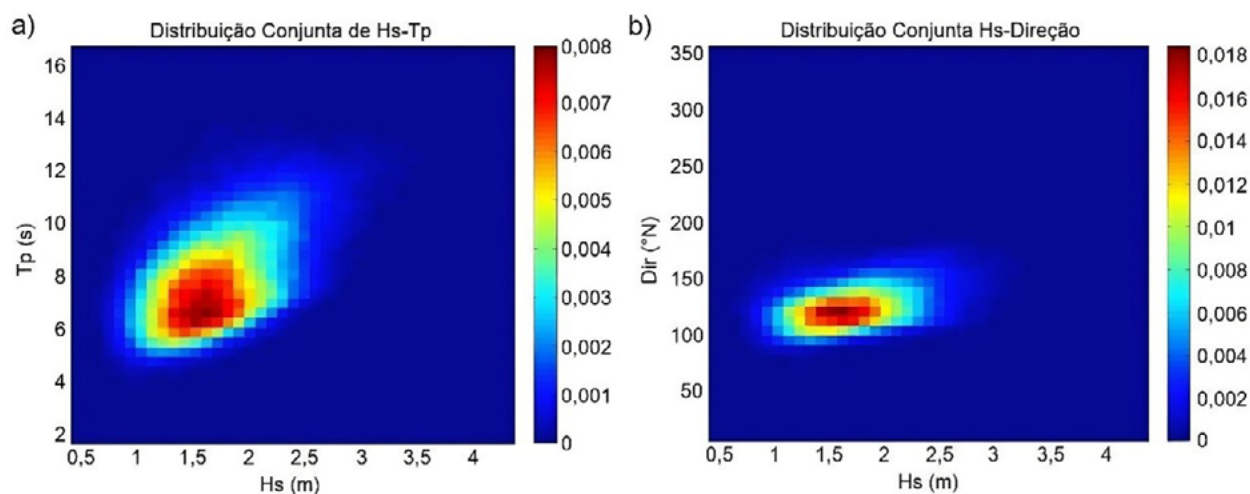


Figura 6. Distribuição conjunta da altura significativa de onda em função do período (a) e distribuição conjunta da altura significativa em função da direção (b).

3.2. Propagação de ondas associadas às condições de tempestade (HS12 e TP12)

As ondas provenientes do quadrante ENE incidem paralelamente às linhas batimétricas,

sofrendo o processo de refração nos setores 1 e 2, mais ao sul, em função de uma alteração na orientação das linhas de batimetria (figura 7). Esse processo faz com que o trem de ondas tenda a incidir paralelamente às linhas batimétricas.

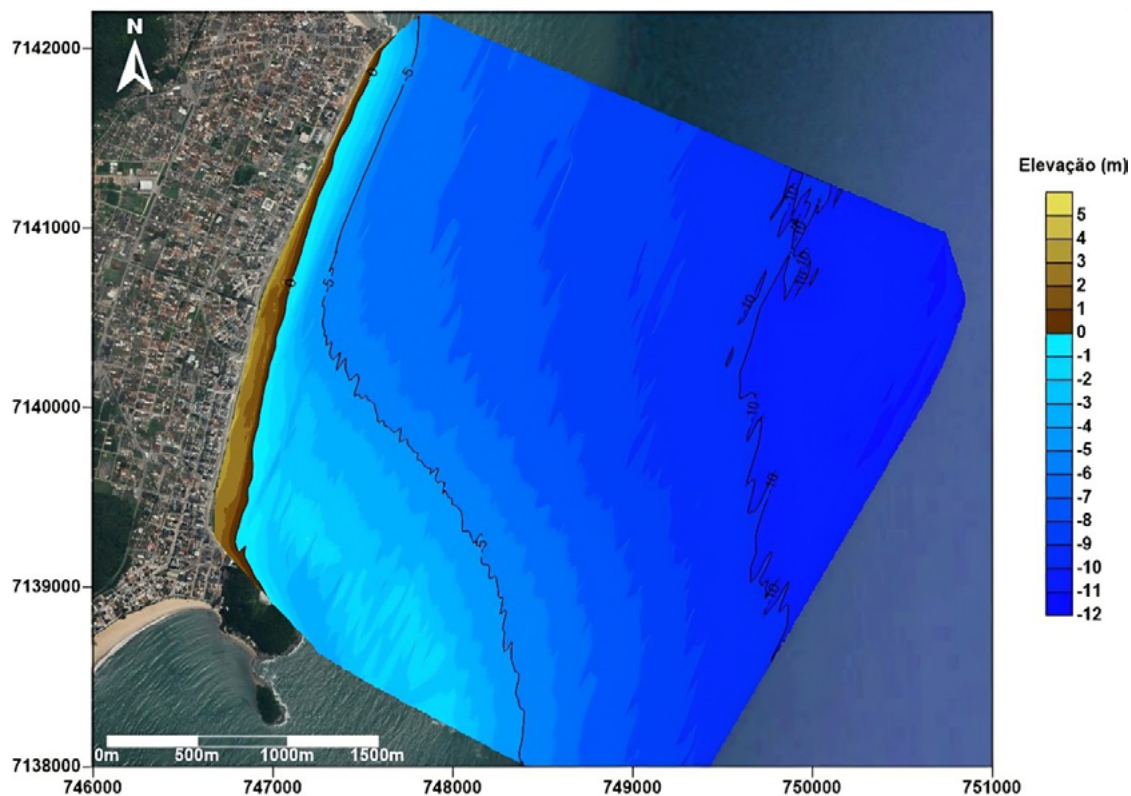


Figura 7. Batimetria de detalhe interpolada, utilizando os dados coletados e os dados disponíveis no SMC-Brasil.

Processo semelhante ocorre com a ondulação de tempestade oriunda de E, a qual perfaz 12,1% dos estados de mar avaliados, observando-se o processo de refração na região mais ao sul da praia, com diminuição da altura significativa de onda próximo à praia. As ondas chegam quase perpendicularmente à linha de costa no setor 2.

A ondulação de ESE, que apresenta a maior frequência de ocorrência na região, totalizando 47,3% dos estados de mar, sofre o efeito de refração decorrente da variação na batimetria, incidindo perpendicularmente às isóbatas no setor 2 (altura de onda de até 2,4 m) mais exposto à ação das ondas quando comparado ao

setor 1, mais ao sul (figura 8). Essa variação é responsável pelas correntes geradas, associado à diferença das alturas de ondas.

As ondas provenientes de SE sofrem com o efeito da refração, apresentando menores alturas significativas de onda quando comparadas às ondulações que atingem o setor 2, na porção mais a norte da região de estudo. Pode-se notar que a ondulação de SSE apresenta um importante efeito de difração ocasionada pela presença do promontório onde está localizado o Morro do Boi, atingindo o setor 1 com menor altura de onda quando comparada à ondulação que chega até o setor 2.

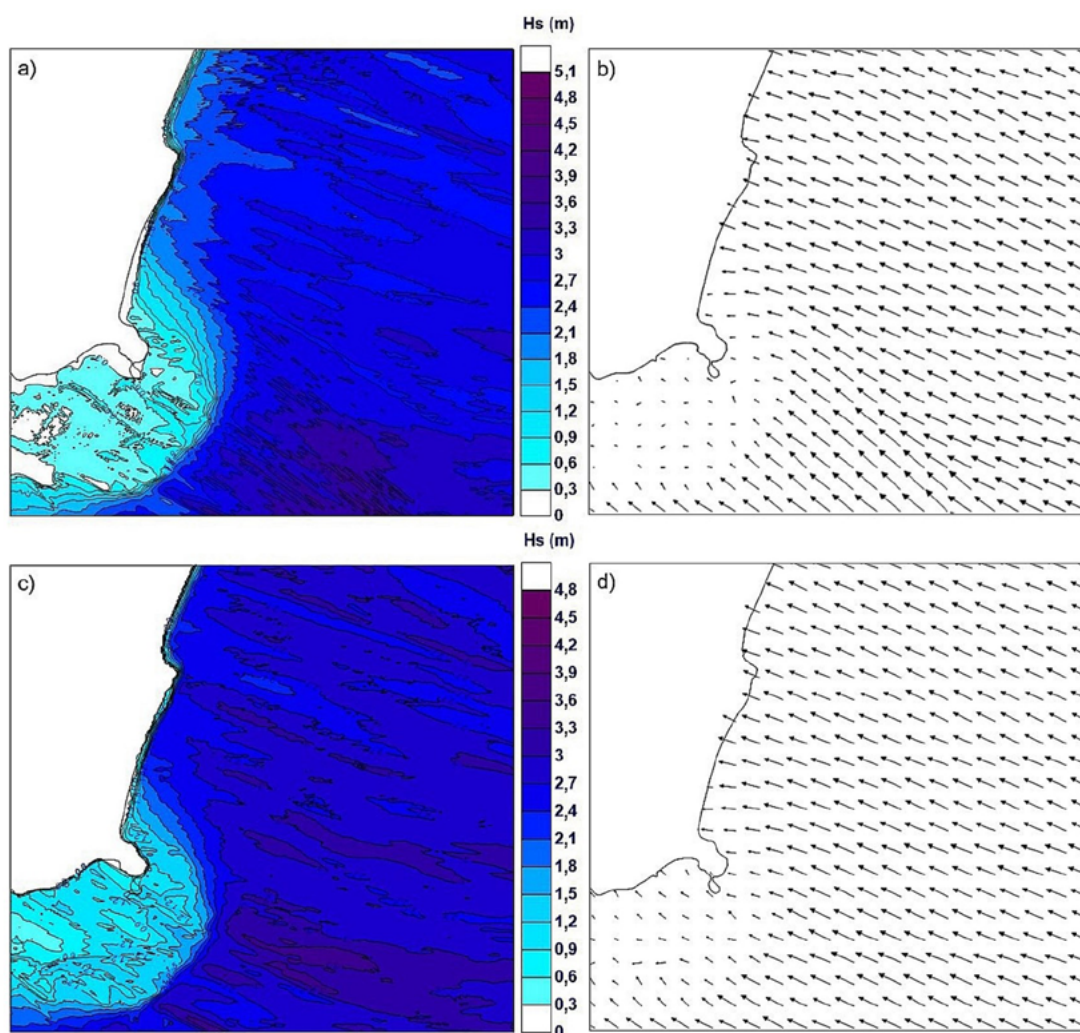


Figura 8. Isolinhas de altura de onda e vetores de direção para as ondas de ESE, associados aos eventos de tempestade: (a) e (b) em baixamar; (c) e (d) em preamar.

3.3. Propagação de ondas associadas às condições medianas

Os efeitos de refração, difração e arrebentação observados nas ondulações associadas às condições de tempestade afetam igualmente as ondas de condições medianas, causando perda de energia em função da diminuição da profundidade, chegando à linha de costa com valores de altura de onda significativa menores.

As ondulações provenientes de E incidem perpendicularmente à costa, sofrendo refração

pela variação da batimetria no setor 1, apresentando maiores alturas de onda no setor 2. Na maior parte dos casos (ondas do quadrante ESE, SE e SSE) pode-se observar que a região mais ao sul do setor 1 se encontra mais protegida.

As propagações de ondas associadas às condições medianas, provenientes de ESE, são mostradas na figura 9.

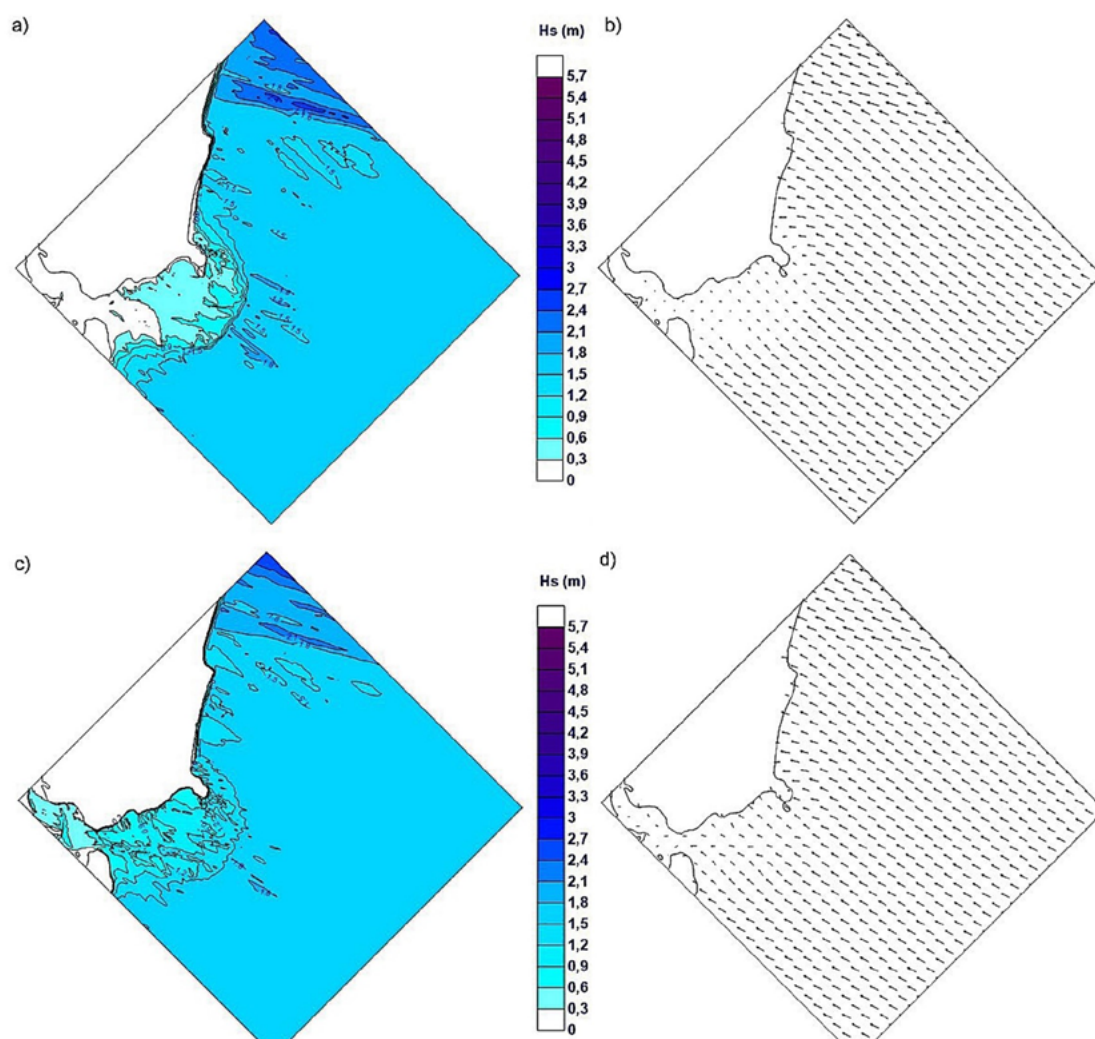


Figura 9. Isolinhas de altura de onda e vetores de direção para as ondas de ESE, associados às condições medianas: (a) e (b) em baixamar; (c) e (d) em preamar.

3.4. Correntes

Os resultados de propagação de correntes para a Praia Brava são apresentados com 1 caso para cada malha, representando as diferentes direções de propagação de ondas. A malha com direções de ondas provenientes de ENE (figura 10a) geram correntes para a direção sul. As ondas de ESE geram correntes de menor intensidade próximo à praia, no sentido de sul para norte (figura 10b).

Os casos de ondas de direção de SSE geram correntes em direção ao norte, próximo ao setor 2, em função da obliquidade com que as ondas incidem à costa (figura 10c). Junto ao promontório (Morro do Boi) é possível observar correntes em direção ao sul (na direção do promontório). Estas correntes são geradas devido ao gradiente de altura de onda na zona da praia mais próxima ao promontório, sendo atingida por ondas de menor energia.

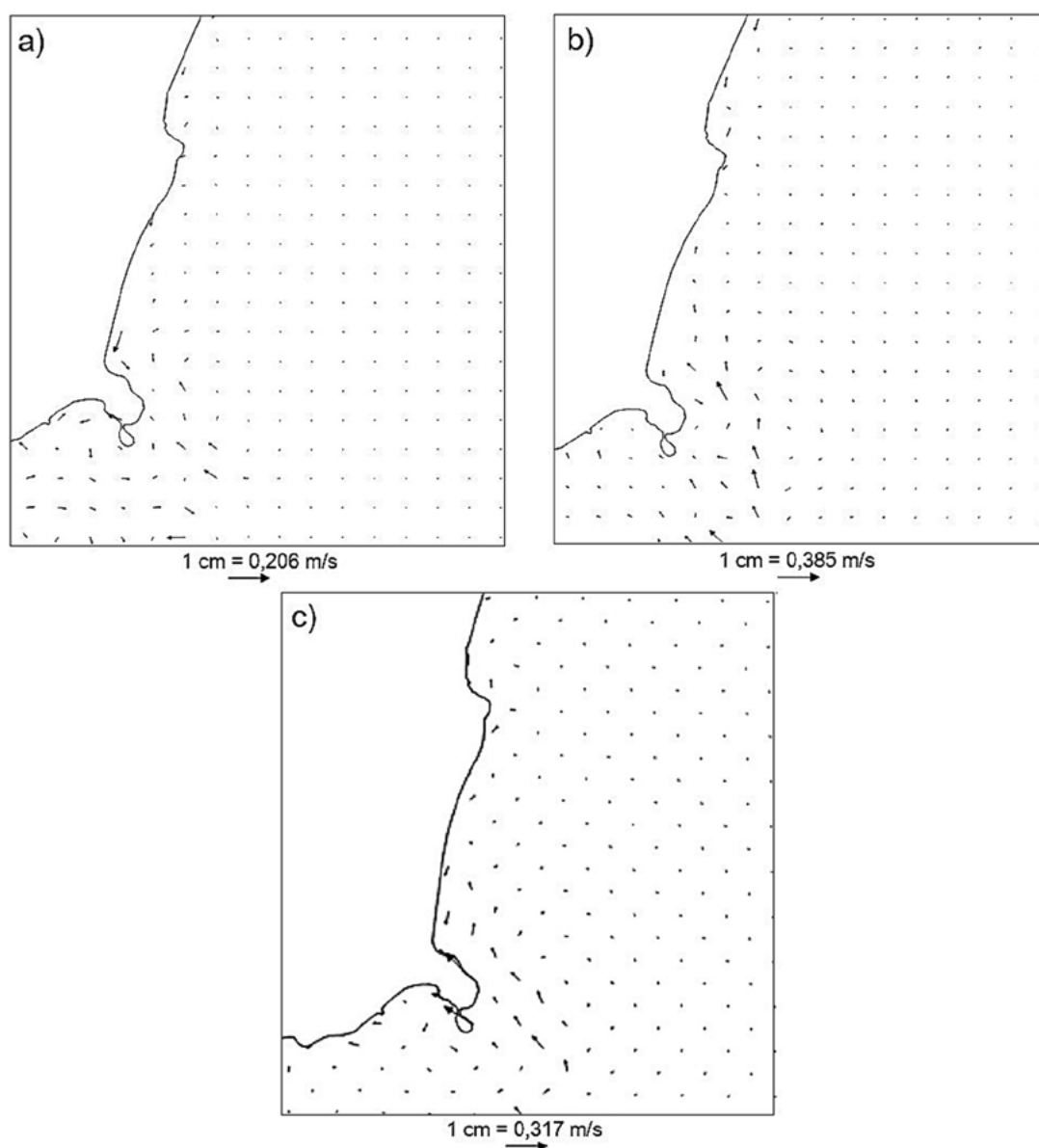


Figura 10. Vetores de correntes geradas próximas à costa – exemplos de caso de ondas vindas de ENE (a), ESE (b) e SSE (c).

Os fluxos médios de energia para o período de 60 anos obtidos a partir do SMC-Brasil apresentaram uma tendência de direção de ESE, de

110° a 112° no setor 1 (figura 11). No setor 2 nota-se a variação na direção de onda para SE durante os últimos anos, de 121° a 125° (figura 12).

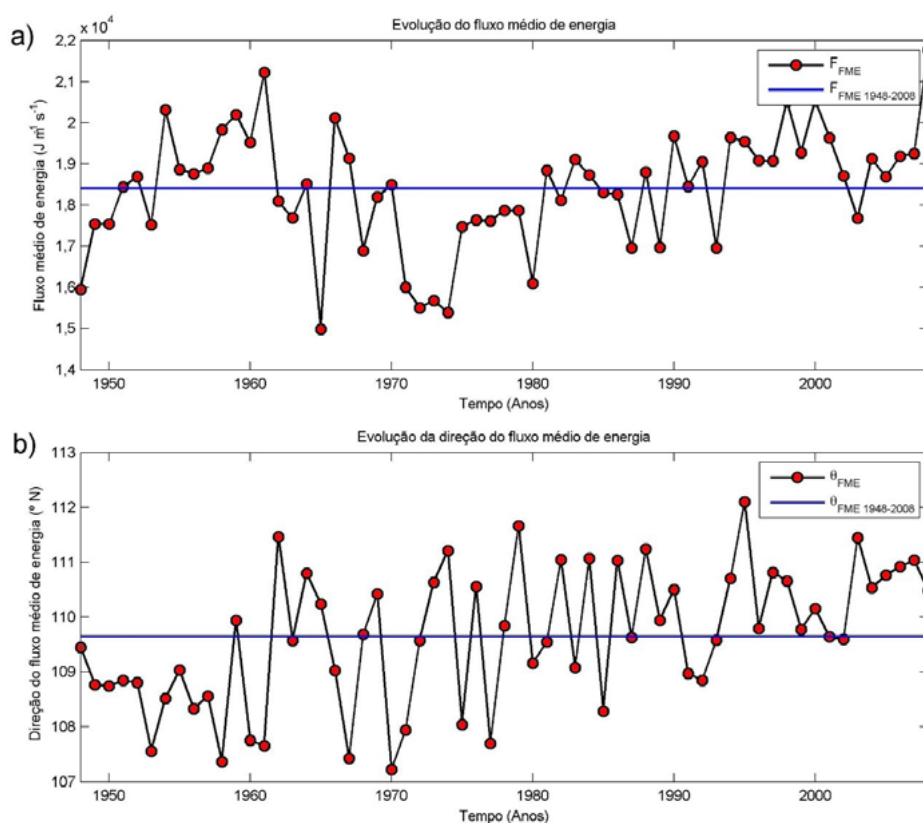


Figura 11. Evolução do Fluxo Médio de Energia (a) e Direção do Fluxo Médio de Energia (b) para o setor 1.

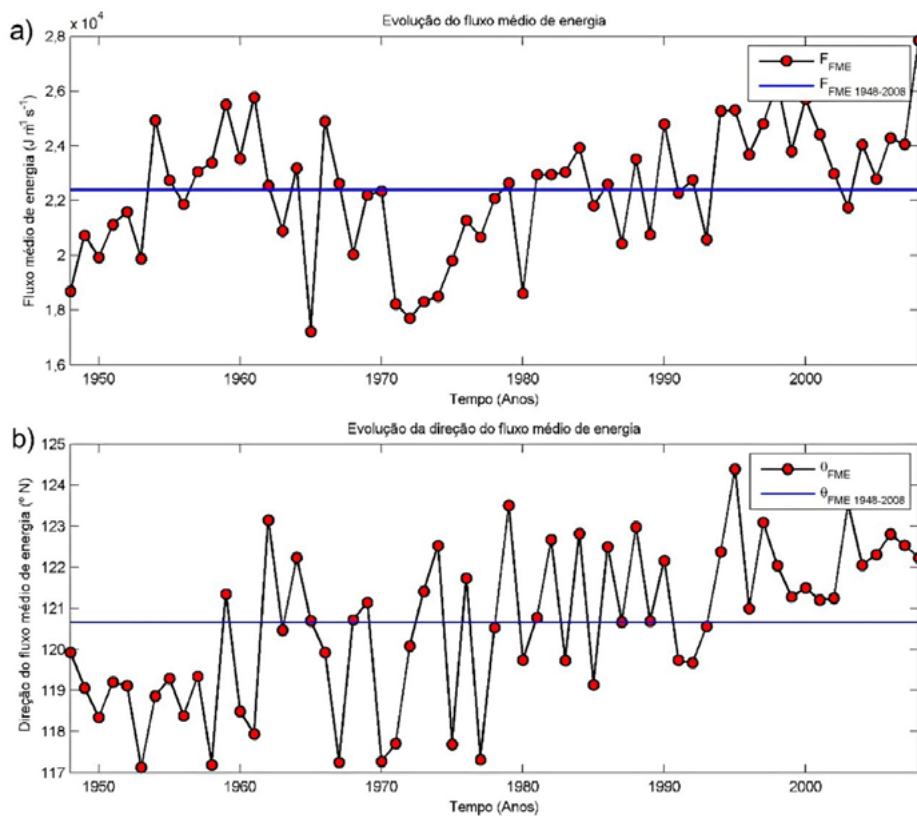


Figura 12. Evolução do Fluxo Médio de Energia (a) e Direção do Fluxo Médio de Energia (b) para o setor 2.

A análise dos fluxos médios de energia sazonais apresenta maiores valores para o setor 1 (perfil 2), com o outono sendo a estação com ondas mais energéticas; e para o setor 2 (perfil 7), a primavera apresenta ondas de maior energia, nos perfis até a isóbata de 4 m de profundidade

(figura 13a). Os maiores valores do fluxo médio nos perfis até a isóbata de 2 m de profundidade ocorreram no setor 2 (perfil 7), com a primavera apresentando ondas de maior energia (figura 13b).

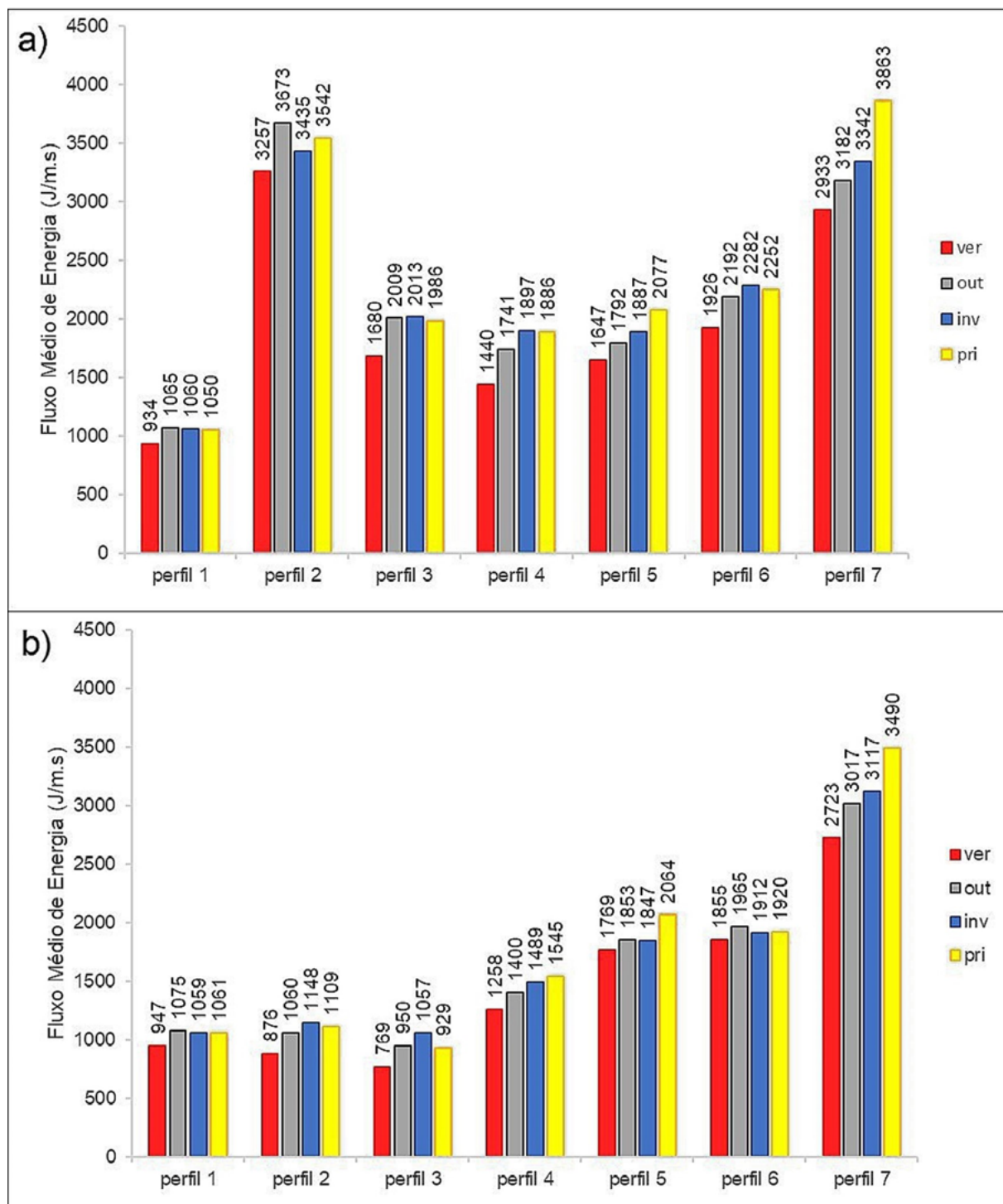


Figura 13. Fluxo Médio de Energia sazonal para os dois setores da Praia Brava. Figura (a) corresponde aos perfis extraídos até a profundidade de 4 m e (b) até a profundidade de 2 m.

3.5. Transporte de sedimentos

As taxas médias do transporte de sedimentos apresentou menores valores no setor 1 (perfis 1, 2 e 3), com transporte residual de norte para sul; já no setor 2 (perfis 4, 5, 6 e 7), a taxa média do transporte de sedimentos apresentou os maiores valores, com o transporte residual de sul para norte, tendo o perfil 6 os maiores volumes.

Considerando os setores 1 e 2, a taxa média do transporte de sedimentos na praia Brava, apresentam transporte residual de sul para norte, com a maior intensidade no fluxo médio de energia próximo à costa foi observada para o perfil 6 (figura 14).

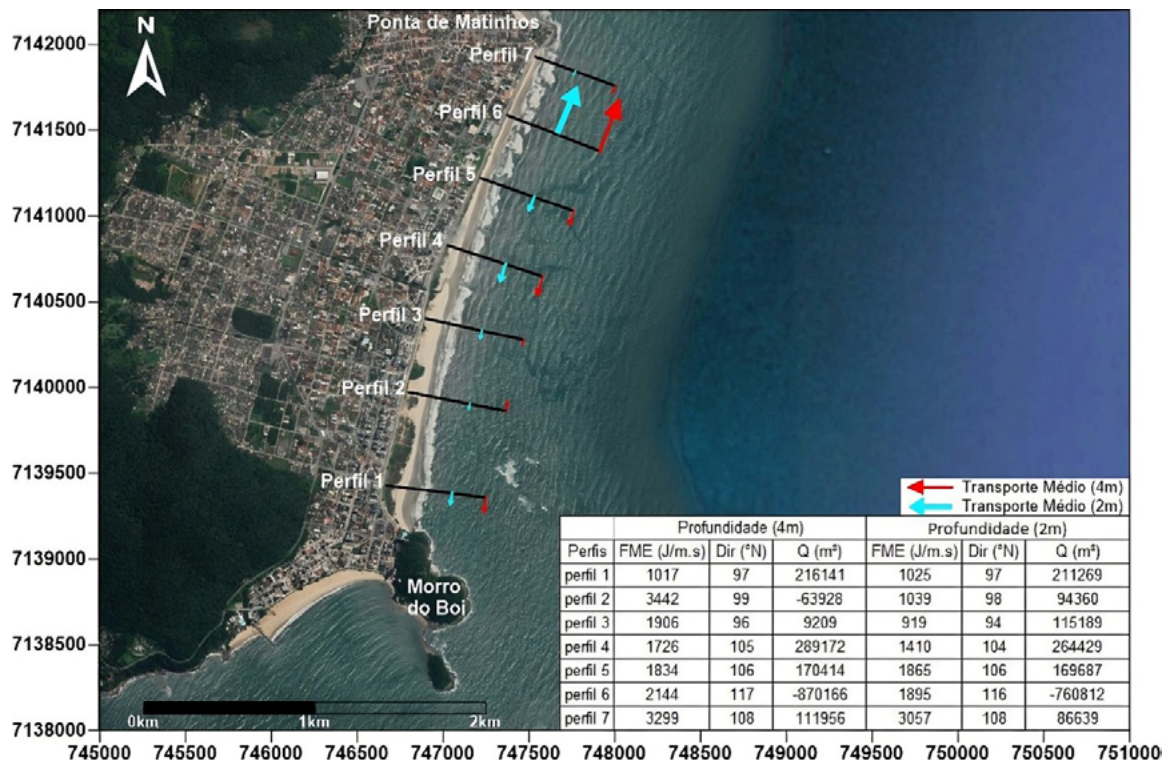


Figura 14. Taxas médias anuais de transporte de sedimento para os 2 setores da Praia Brava; setor 1 (perfis 1, 2 e 3), setor 2 (4, 5, 6 e 7).

4. DISCUSSÃO

O clima de ondas na área de estudo apresenta como direção principal as ondulações provenientes do quadrante ESE, perfazendo 47% da ondas vindas desse quadrante, tanto para os climas de onda associados às condições de tempestade quanto para condições medianas. A segunda direção mais frequente de incidência de ondas é de SE, com 29% de probabilidade.

Há ocorrência de ondulações secundárias do quadrante ENE, porém com menor frequência. Tal ocorrência deve-se a resolução dos dados de

ventos utilizada na construção das séries DOW (ventos de reanálise NCEP/NCAR I) (Gomes da Silva et al. 2015). A presença de ventos locais responsáveis pela formação das ondas de condições medianas nem sempre são resolvidas pelo modelo de ondas Wave Watch III, utilizado para a confecção da base de dados GOW, que serve de dado de entrada para a base de dados DOW (Espejo et al. 2014).

Os maiores valores de ondas associados aos eventos de tempestade foram de 2,7 m e 1,5

m para condições de ondas medianas na região mais ao sul da Praia Brava (perfil 4). Em direção ao norte (perfil 7) estes valores aumentam para 2,9 m em condições de tempestade.

O arco praial Caiobá – Praia Brava apresenta um gradiente de altura de onda, com os menores valores atingindo a região sul, aumentando em direção à Praia Brava. Esse gradiente ocorre pela variação na batimetria (Bittencourt et al. 2010). As ondas provenientes das direções ESE, SE, SSE e S estão suscetíveis ao processo de refração no setor sul do arco, em função da presença de um banco de areia do delta de maré vazante da Baía de Guaratuba (Porto Lima 2008, Angulo et al. 2016).

O promontório onde situa-se o Morro do Boi favorece a ocorrência do processo de refração, com o trem de ondas dissipando energia e rotacionando, tendendo a atingir a costa paralelamente. As ondas vindas de ENE e E também são afetadas pelo gradiente de altura de onda devido à perda de energia em função da arrebentação de um mesmo trem de ondas ocorrer em diferentes tempos (Melville 1994).

Em condições de preamar, as ondas de maior altura atingem a estrutura urbana da Praia Brava, quando comparadas às condições de baixamar. Pode-se confirmar esta diferença analisando a extensão entre os perfis dos setores 1, ao sul do arco praial, e 2, ao norte. Enquanto no setor 1 os perfis apresentam distâncias entre 120 m (perfil 3) e 160 m (perfil 1), o setor norte apresenta extensão de aproximadamente 45 m (perfil 7).

Os fluxos de energia das ondas apresentaram maior intensidade na porção norte da praia Brava. Como verificado em CEPAL – ONU (2015), há uma tendência de rotação na direção de fluxo médio de energia em direção ao sul em função da configuração das praias e do transporte de sedimentos, para o hemisfério sul.

A batimetria mais suave no setor 2 é a responsável pela diferença maior entre os fluxos mé-

dios de energia nas profundidades de 4 m e 2 m, onde após os 4 m de profundidade em sentido à praia, as ondas passam a sofrer influência do fundo, arrebentando e assim perdendo energia.

A partir dos resultados para o transporte de sedimento obtidos na modelagem, o setor 1 apresentou as menores taxas médias anuais de transporte de sedimentos, com a tendência do transporte residual de norte para sul, pela presença do delta de maré vazante, que provoca a refração das ondas mesmo vindas das direções S-SE (Gobbi, 2001). Já no setor 2, as taxas médias apresentaram os maiores valores, com o transporte residual de sul para norte. O transporte observado para o perfil 6 é o mais intenso; tal fato pode ser explicado pela incidência mais frequente do trem de ondas vindo de ESE (117°). Nota-se a divergência de vetores entre os perfis 5 e 6, caracterizando a tendência erosiva, já relatada em trabalhos anteriores (Angulo 2000, Novak et al. 2016).

As taxas médias de transporte de sedimentos na praia Brava, considerando os setores 1 e 2, apresentam uma direção de transporte residual de sul para norte, causado pela direção predominante do clima de ondas e orientação do arco praial. A maior taxa de transporte de sedimento no perfil 6 está associada à exposição desse perfil à ação das ondas mais energéticas, com valores de H_s de 1,56 m, atingindo 2,90 m de altura máxima.

A divergência dos vetores de transporte observada nos resultados obtidos evidencia a suscetibilidade do setor 2 do arco praial à ação dos processos erosivos, perdendo sedimentos para o setor 1 e para a praia Central de Matinhos, como encontrado por Gobbi (2001). O setor mais ao sul do arco apresenta-se estável, situação visualizada em campo, com a presença de dunas com vegetação e maior extensão nos perfis transversais.

5. CONCLUSÃO

O transporte residual de sedimentos na praia Brava apresentou direção predominante para norte a partir das médias anuais analisadas, com os setores com maior exposição à frente de ondas aqueles com maior taxa de transporte litorâneo. A dinâmica sedimentar da área de estudo mostrou-se estável no setor 1, com a configuração dos perfis transversais mais extensos e presença de dunas vegetadas na porção subaérea da praia. Tal fato se deve à incidência de ondas de menor altura na área, abrigada pela presença do banco de areia, com maior probabilidade de acúmulo de sedimentos.

A análise dos perfis no arco praial demonstrou equilíbrio dinâmico na maior parte dos perfis, com uma região de erosão no setor 2, causada pela baixa concentração de sedimentos na área. Levando-se em conta que ondas com maiores valores de H_s e maior capacidade de remobilização de sedimentos atingem o setor 2, maiores serão as respostas no transporte de sedimento líquido e na variação da morfologia do perfil. Neste setor, a suscetibilidade aos processos erosivos é evidenciada pela divergência nos vetores de transporte no perfil 6, onde o volume de sedimentos e a intensidade do transporte foram maiores.

No ano de 2022, posteriormente à realização deste trabalho, o Projeto de Recuperação da Orla de Matinhos (Ratton 2020) contemplou a engorda do setor 2 da área de estudo, a mais afetada pelos processos erosivos (figura 14). Mesmo com a existência de casos bem-sucedidos da combinação de engorda da praia e construção de esporões (Galgano 2004, Bocamazo et al. 2011, Nordstrom 2014), a variação na direção da corrente litorânea pode ser esperada ao longo do tempo, o que traz incerteza em relação às áreas de erosão e acreção após a execução das intervenções; assim como constatado em outro trabalho realizado nas

proximidades da área de estudo (Luersen et al. 2024), caso esse fator não seja adequadamente abordado, poderá causar um desequilíbrio na dinâmica sedimentar local, ocasionando a diminuição da disponibilidade de sedimentos, e consequentemente, agravando o problema. Os resultados obtidos neste estudo, servem de linha base para a compreensão dos processos erosivos/sedimentares na nova configuração morfológica da praia Brava.

Considerando que uma intensificação da frequência de eventos climáticos extremos implicará em um aumento na periodicidade e magnitude de ondas e marés meteorológicas, é provável que os processos de erosão costeira também sejam intensificados nos trechos mais vulneráveis, como é o caso da praia Brava. Nesse contexto, o SMC-Brasil é uma ferramenta de gestão de grande relevância para a realização de estudos voltados à mitigação dos impactos da erosão costeira, bem como a caracterização do clima de ondas local e o transporte de sedimentos litorâneo.

A limitação na inserção de dados de entrada nos modelos e no processo de modelagem pode ocultar alguns processos reais de menor escala pelos resultados mais frequentes; a inexistência de dados de ondas medidos em águas rasas na área de estudo impossibilitou realizar a validação do modelo.

A partir das conclusões obtidas neste trabalho e das limitações encontradas, recomenda-se: a utilização de dados de vento de reanálise mais recentes para o cálculo do clima de ondas, e assim realizar uma nova caracterização do clima de ondas local; a validação do modelo de ondas com dados medidos *in situ*; e a comparação dos perfis praias de equilíbrio calculados com perfis medidos.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) brasileiro, à Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e à Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID) através do financiamento do Projeto SMC – Brasil, pela disponibilização da ferramenta, bem como sua base de dados. Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) pela concessão de bolsa de mestrado.

Ao Laboratório de Topografia e Geodésia (CEM-UFPR) e ao Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento (CEM-UFPR) pela disponibilização dos dados e equipamentos.

E por fim, os autores agradecem também ao Prof. Carlos Roberto Soares (in memorian) por sua toda sua contribuição e generosidade como cientista, professor e amigo.

REFERÊNCIAS

- ANGELOTTI, R.; NOERNBERG, M. A. Análise Dos Riscos Ao Banho De Mar No Município De Pontal Do Paraná - PR – Temporada 2003/2004. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 14, n. 1, p. 65, 7 jun. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.14210/bjast.v14n1.p65-75>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- ANGULO, R. J. As praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada. *Revista Paranaense de Desenvolvimento*, [S. l.], n. 99, p. 97–103, 2000. Disponível em: <https://ipardes.emnuvens.com.br/revistaparanaense/article/view/238>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- ANGULO, R. J. et al. The State of Paraná Beaches. In: SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. (eds.). *Brazilian Beach Systems*. Springer International Publishing, 2016. p. 419-464. ISBN 9783319303925. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_16. Acesso em: 8 ago. 2025.
- ANGULO, R. J. et al. Panorama da erosão costeira - Paraná. In: Muehe, D. (Org.). *Panorama da erosão costeira no Brasil* (vol. 1, pp. 586-640). Brasília, DF: MMA, 2018.
- BAMBER, J. L. et al. Ice sheet contributions to future sea-level rise from structured expert judgment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 23, p. 11195-11200, 20 maio 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1817205116>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, v. 81, n. 2, p. 169-193, maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- BITTENCOURT, A. C. da S. P. et al. Tendência de longo prazo à erosão costeira num cenário perspectivo de ocupação humana: litoral norte do estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 1, p. 125-137, 1 mar. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010401125137>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- BOCAMAZO, L. M.; GROSSKOPF, W. G.; BUONUIATO, F. S. Beach Nourishment, Shoreline Change, and Dune Growth at Westhampton Beach, New York, 1996-2009. *Journal of Coastal Research*, v. 59, p. 181-191, mar. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/si59-019.1>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- BOOIJ, N. Gravity waves on water with non-uniform depth e current. 1981. Thesis (Doctoral in Civil Engineering and Geosciences) – Department of Hydraulic Engineering, Delft University of Technology, Delft, 131 p.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 15 abr. 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/98jc02622>. Acesso em: 8 ago. 2025.
- CEPAL-ONU. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. Documento 1 del estudio de “Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe”, 2015.

DEL VALLE, R; MEDINA, R; LOSADA, M. A. Dependence of Coefficient K on Grain Size. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, v. 119, n. 5, p. 568-574, set. 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-950x\(1993\)119:5\(568\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-950x(1993)119:5(568)). Acesso em: 8 ago. 2025.

ESPEJO, A. et al. Spectral Ocean Wave Climate Variability Based on Atmospheric Circulation Patterns. *Journal of Physical Oceanography*, v. 44, n. 8, p. 2139-2152, 1 ago. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/jpo-d-13-0276.1>. Acesso em: 8 ago. 2025.

GALGANO, F. A. Jr. Long-Term Effectiveness of a Groin and Beach Fill System: A Case Study Using Shoreline Change Maps. *Journal of Coastal Research*, v. 33, p.3-18, 2004.

GOBBI, E. F. A erosão nas praias Mansa e Brava de Caiobá, litoral do estado do Paraná. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Novembro de 2001. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=12425>.

GOMES, G.; DA SILVA, A. C. Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil). *Journal of Coastal Research*, v. 71, p. 30-40, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/si71-004.1>. Acesso em: 8 ago. 2025.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ. Paraná entrega projeto da orla de Matinhos em Brasília. 22 maio 2019. Disponível em: <https://www.parana.pr.gov.br/aen/Noticia/Parana-entrega-projeto-da-orla-de-Matinhos-em-Brasilia>. Acesso em: 9 ago. 2025.

HEMER, M. A. et al. Projected changes in wave climate from a multi-model ensemble. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 5, p. 471-476, 13 jan. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/nclimate1791>. Acesso em: 9 ago. 2025.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico de 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pr/matinhos.html>. Acesso em: agosto. 2025.

JEVREJEVA, S. et al. Coastal sea level rise with warming above 2 °C. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 47, p. 13342-13347, 7 nov. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1605312113>. Acesso em: 9 ago. 2025.

KENDALL MELVILLE, W. Energy Dissipation by Breaking Waves. *Journal of Physical Oceanography*, v. 24, n. 10, p. 2041-2049, out. 1994. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1994\)024%3C2041:edbbw%3E2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1994)024%3C2041:edbbw%3E2.0.co;2). Acesso em: 9 ago. 2025.

KIRBY, J.T. Propagation of weakly-nonlinear surface water waves in regions with varying depth and current. Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, ONR Technical Report 14, Res. Rept. CE-83-37, 327p, 1983.

KIRBY, J.T., e ÖZKAN, H.T. Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions. Ref/Dif s version 1.1. Center Applied Coastal Research, University of Delaware, Documentation and user's manual, report No. CACR-94-04, 1994.

KOMAR, P. D.; INMAN, D. L. Longshore sand transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, v. 75, n. 30, p. 5914-5927, 20 out. 1970. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/jc075i030p05914>. Acesso em: 9 ago. 2025.

KRAUS, N. C. et al. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone. *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 18, p. 61, 29 jan. 1982. Disponível em: <https://doi.org/10.9753/icce.v18.61>. Acesso em: 9 ago. 2025.

LUERSEN, D. M. et al. Sediment transport trend in an erosive sandy beach: the case of Matinhos Beach, south coast of Brazil. *Ocean and Coastal Research*, v. 72, suppl 1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2675-2824072.23093>. Acesso em: 10 ago. 2025.

LUIJENDIJK, A. et al. The State of the World's Beaches. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, 27 abr. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MASSELINK, G. et al. Extreme wave activity during 2013/2014 winter and morphological impacts along the Atlantic coast of Europe. *Geophysical Research Letters*, v. 43, n. 5, p. 2135-2143, 15 mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2015gl067492>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MÍNGUEZ, R. et al. Directional Calibration of Wave Reanalysis Databases Using Instrumental Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 28, n. 11, p. 1466-1485, 1 nov. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/jtech-d-11-00008.1>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MUEHE, D. Estado morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 46, n. 2, p. 157-169, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1679-87591998000200005>. Acesso em: 9 ago. 2025.

MUEHE, D. Erosão e progradação do litoral brasileiro. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 475 p. ISBN 8577380289. Disponível em: https://erosioncostera.furg.br/images/PDFs/livro_dietter_2006.pdf

NEREM, R. S. et al. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, n. 9, p. 2022-2025, 12 fev. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>. Acesso em: 9 ago. 2025.

NOERNBERG, M. A.; ALBERTI, A. L. Oceanographic variability in the inner shelf of Paraná, Brazil: spring condition. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 32, n. 2, p. 197, 1 jul. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.22564/rbgf.v32i2.451>. Acesso em: 9 ago. 2025.

NORDSTROM, K. F. Living with shore protection structures: A review. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 150, p. 11-23, out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.11.003>. Acesso em: 9 ago. 2025.

NOVAK, L. P.; LAMOUR, M. R.; CATTANI, P. E. Vulnerabilidade aos processos erosivos no litoral do Paraná estabelecido pela aplicação da análise multicritérios. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*,

v. 38, p. 195, 12 dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/raega.v38i0.42955>. Acesso em: 9 ago. 2025.

PORTO LIMA, M.G. Controle da erosão em praias arenosas pelo método de recifes artificiais submersos- praia Brava de Matinhos- PR. 2006. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 92p.

QUADROS, C. J. L. Variações morfológicas e volumétricas associadas à incidência de sistemas frontais em duas praias arenosas do litoral paranaense. 2002. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos) – Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 69p.

RATTON, E. Parecer técnico sobre a recuperação da orla de Matinhos, controle de cheias e revitalização urbanística. 2020. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 59p. Disponível em: <https://itti.org.br/wp-content/uploads/2020/11/parecer-tecnico-recuperacao-da-orla-de-matinhos.pdf>

REGUERO, B. G. et al. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. *Coastal Engineering*, v. 65, p. 38-55, jul. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.03.003>. Acesso em: 9 ago. 2025.

SILVA, P. G. et al. Performance assessment of the database downscaled ocean waves (DOW) on Santa Catarina coast, South Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 87, n. 2, p. 623-634, 8 maio 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201520140329>. Acesso em: 8 ago. 2025.

SIMÓ, D. H. & HORN FILHO, N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. *Gravel*, v. 2, p. 93-103. 2004 ISSN 1678-5975

SNAREY, M. et al. Comparison of algorithms for dissimilarity-based compound selection. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, v. 15, n. 6, p. 372-385, dez. 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s1093-3263\(98\)00008-4](https://doi.org/10.1016/s1093-3263(98)00008-4). Acesso em: 9 ago. 2025.

TOLMAN, H.L. The numerical model WAVEWATCH: a third-generation model for the hindcasting of wind waves on tides in shelf seas, Communications on Hydraulic and Geotechnical Engineering, Delft Univ. of Techn., ISSN 0169-6548, 89(2), 72p, 1989.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Shore Protection Manual. Engineer Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Washington. D.C., 1984.

VOUSDOUKAS, M. I. et al. Global probabilistic projections of extreme sea levels show intensification of coastal flood hazard. Nature Communications, v. 9, n. 1, 18 jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w>. Acesso em: 9 ago. 2025.