

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS DE PAULA SOARES

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

PONTAL DO PARANÁ

2019

LUCAS DE PAULA SOARES

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

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos, no curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos do Centro de Estudos do Mar, Campus Pontal do Paraná, Setor Reitoria da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg

PONTAL DO PARANÁ

2019

CATALOGAÇÃO NA FONTE:
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar
Fernanda Pigozzi – CRB 9/1151

S11a Soares, Lucas de Paula
Análise do balanço sedimentar na praia Brava, Matinhos - PR, a partir da modelagem
numérica. / Lucas de Paula Soares. – Pontal do Paraná, 2019.
37 f.: il.; 29 cm.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e
Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor Reitoria, Universidade Federal do Paraná.

1. Modelagem numérica. 2. Transporte de sedimentos. 3. Dinâmica costeira.
4. Clima – onda. I. Título. II. Noernberg, Maurício Almeida. III. Universidade Federal do
Paraná.

CDD 551

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **LUCAS DE PAULA SOARES**, intitulada: **ANÁLISE DO BALANÇO SEDIMENTAR NA PRAIA BRAVA, MATINHOS - PR, A PARTIR DA MODELAGEM NUMÉRICA**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de Mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca, e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 28 de Março de 2019.



MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG
Presidente da Banca Examinadora



CARLOS ROBERTO SOARES
Avaliador Externo (UFPR)



LAURA RIBAS DE ALMEIDA
Avaliador Externo (SEM VÍNCULO)

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. O presente trabalho é um estudo do transporte sedimentar em uma região de praia cronicamente afetada por processos erosivos. O estudo foi realizado utilizando o software SMC (Sistema de Modelagem Costeira) como principal ferramenta para simular a dinâmica costeira para a área de estudo, bem como para determinar o clima de onda a ser aplicado nas simulações. O transporte de sedimentos apresentou uma direção preferencial de sul para norte com divergência de direções na área mais suscetível aos processos erosivos.

Palavras chave: Dinâmica costeira. Modelagem numérica. Clima de ondas. Transporte de sedimentos. SMC-Brasil.

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 at different time scales and in the intervention of human constructions. The present work is a study of sedimentary transport in a beach region chronically affected by erosive processes. The study was carried out using the SMC software (Coastal Modeling System) as the main tool to simulate the coastal dynamics for the study area, as well as to determine the wave climate to be applied in the simulations. The sediment transport presented a preferential direction from south to north with divergence of directions in the area most susceptible to erosive processes.

Keywords: Coastal dynamics. Numerical modelling. Wave climate. Sediment transport. SMC-Brazil.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 ARCO PRAIAL MATINHOS-CAIOBÁ	9
2 METODOLOGIA	11
2.1 FERRAMENTAS E MODELOS NUMÉRICOS	11
2.1.1 SMC-Brasil.....	11
2.1.2 Dados Batimétricos	12
2.1.3 Base de Dados de Ondas	12
2.1.4 Clima de Ondas	13
2.1.5 Propagação de Ondas.....	13
2.1.6 Correntes.....	15
2.1.7 Transporte de Sedimentos	15
2.1.8 Perfis Altimétricos	15
3 RESULTADOS	16
3.1 AVALIAÇÃO DA CLIMATOLOGIA DE ONDAS	16
3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ASSOCIADAS ÀS CONDIÇÕES DE TEMPESTADE (HS_{12} E TP_{12}).....	19
3.3 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ASSOCIADAS ÀS CONDIÇÕES MEDIANAS....	21
3.4 CORRENTES.....	22
3.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS.....	26
3.6 PERFIS ALTIMÉTRICOS.....	26
4 DISCUSSÃO	29
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

As praias apresentam grande importância como áreas de lazer e recreação, mas de uma perspectiva geológica, a praia tem 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). A urbanização somada à ocupação e uso do solo, incluindo o aterro de áreas de mangue, a prática de impermeabilização (asfaltamentos, pavimentação), combinada às características meteo-oceanográficas locais, vêm causando um crescente problema de erosão e contribuem para a redução da resiliência das praias (Gomes e Silva, 2014).

As construções instaladas na zona pós-praia afetam a morfologia da praia por estabilizarem a areia que antes agia como reserva natural de sedimentos para esse sistema altamente dinâmico. A inexistência de uma gestão costeira integrada da urbanização costeira e o aumento da pressão imobiliária (Muehe, 2006) permitiu que edificações fossem construídas próximas à praia.

Para Short (1999) as praias arenosas são resultado da ação das ondas interagindo com os sedimentos depositados na linha de costa, com extensão e características determinadas pela ação das ondas, granulometria variação da maré e forma da praia em planta. 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).

Associadas às marés e ventos, as ondas fazem da zona costeira um ambiente de intensa dinâmica, atuando significativamente na mobilização, circulação e transporte de sedimentos, regendo as características morfológicas das praias. O principal forçante dos processos costeiros é o clima de ondas, determinado pela ação dos ventos originados no Atlântico Sul para a área a ser estudada, 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 fenômenos 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 SMC-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 teve a ocupação da faixa litorânea como principal ator na degradação da vegetação nativa das dunas frontais, contribuindo com o processo de erosão costeira. 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 praiar 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 praiar existente (Angulo, 2000).

O objetivo deste estudo é analisar a resposta do balanço sedimentar da Praia Brava, frente às mudanças nos padrões de onda no período de 60 anos (1948-2008), caracterizar o clima de ondas local para o intervalo de 60 anos e estimar 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

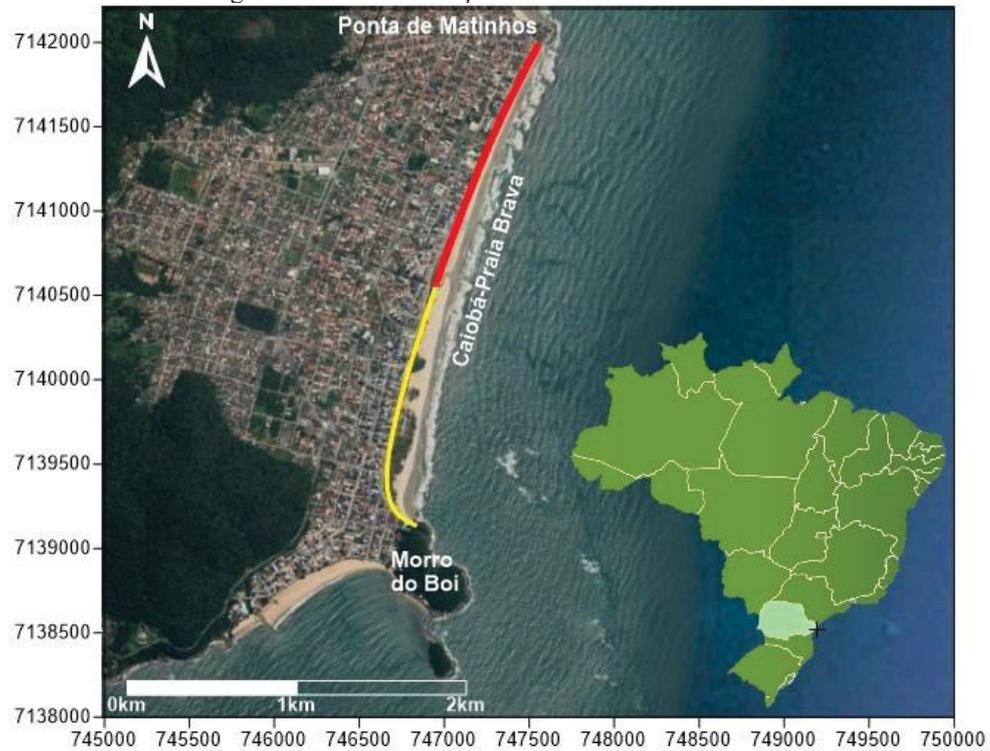
O município de Matinhos possui uma área de 118 km², limitando-se ao norte com o município de Pontal do Paraná e ao sul com Guaratuba. A população residente é de 29.428 habitantes (IBGE, 2010), sofrendo aumento nos períodos de verão e feriados, quando este número pode duplicar no município.

O arco praiar 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 praiar 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



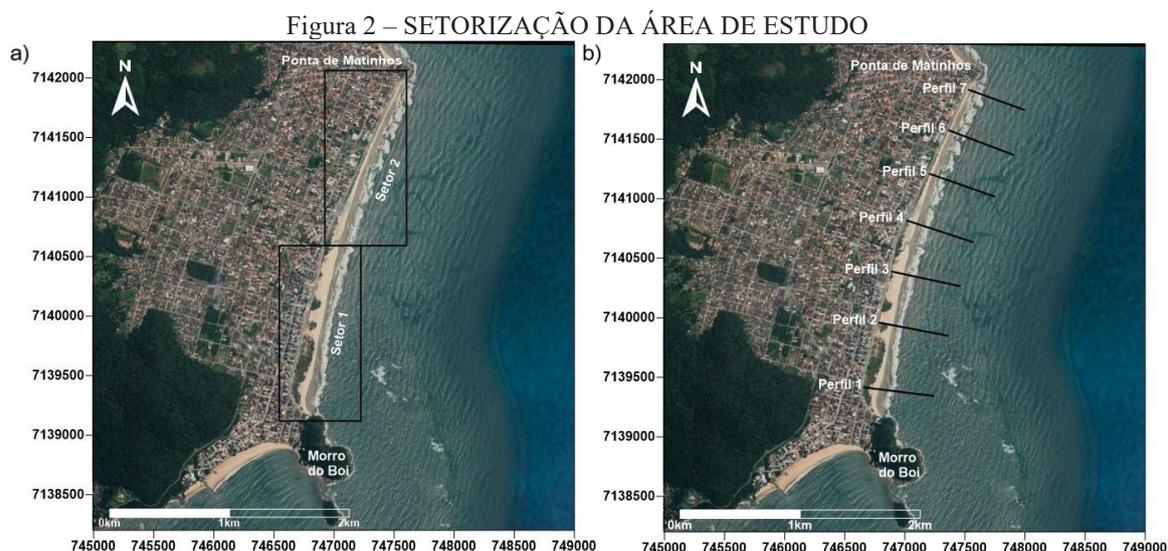
FONTE: O autor (2019).

NOTA: 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).



FONTE: O autor (2019).

NOTA: (a) setor 1 praia de Caiobá e setor 2 Praia Brava; e (b) perfis transversais.

2.1 FERRAMENTAS E MODELOS NUMÉRICOS

2.1.1 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".

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.

Levando-se 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, o SMC-Brasil foi adotado como ferramenta de simulação para este estudo.

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 com a ecosonda.

Levantamentos altimétricos foram realizados durante os meses de abril, junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2018, por meio de caminhamentos utilizando o método DGPS no modo cinemático (Antenas modelo Leica GS15). Os equipamentos DGPS foram disponibilizados pelo Laboratório de Topografia e Geodésia do Centro de Estudos do Mar (CEM). Os dados referentes aos meses de agosto e novembro apresentaram má qualidade por conta da oscilação nos sinais de satélite, não incluídos no estudo.

Os dados de altimetria e 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.

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 $0,25^\circ$, 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 7125969 e 778985 (UTM, zona 22 sul), 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, devido à necessidade de malhas muito amplas e às características do ponto, levando em consideração a razão do comprimento de onda em função da profundidade ($L/2 > d$).

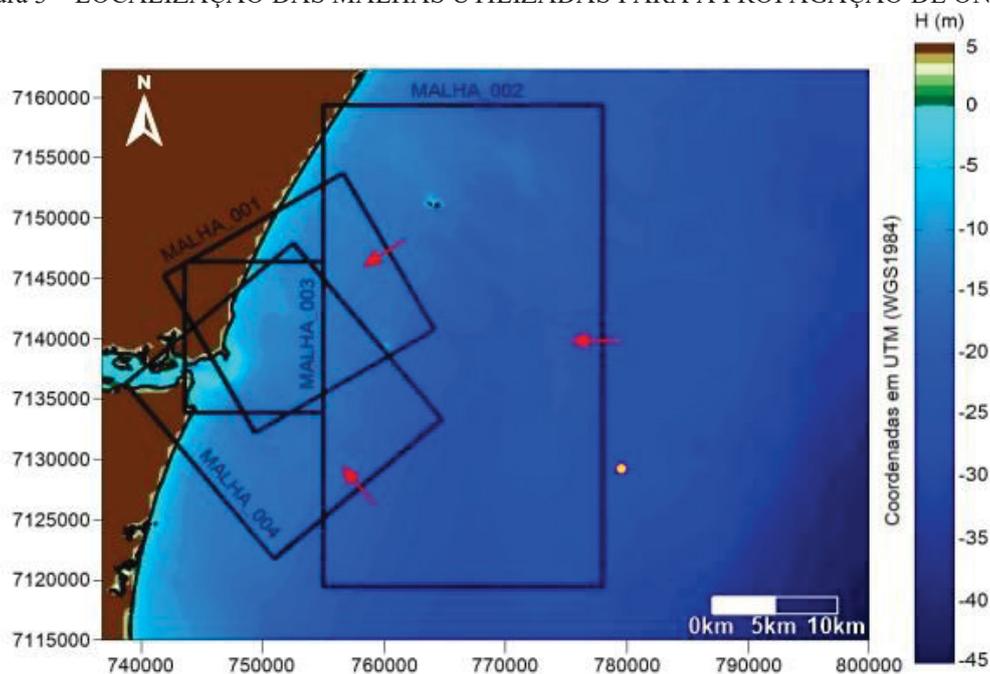
2.1.5 Propagação de Ondas

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 levaram em

consideração a resolução espacial adequada à longitude de onda, a direção principal de propagação de ondas restrita ao eixo X e o giro das ondas a $\pm 55^\circ$ e às 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, 2 com resolução de 25 m (ENE e SSE). Para as propagações do quadrante ESE foi confeccionada 1 malha exterior com resolução de 100 m, com 1 malha de melhor resolução (25 m) acoplada. 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 PARA A PROPAGAÇÃO DE ONDAS



FONTE: O autor (2019).

NOTA: 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. 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 de sedimentos 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 (Shore Protection Manual, 1984).

A fórmula do CERC foi elaborada pelo Corpo de Engenharia do Exército dos EUA para cálculos de transporte de sedimentos e é amplamente adotada e calibrada (Komar e Inman, 1970; Kraus *et al.*, 1982). Relaciona a taxa de transporte de sedimentos ao longo da praia com o fluxo da energia das ondas por unidade de comprimento da costa. 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 (2016, no prelo).

2.1.8 Perfis Altimétricos

Com base nos resultados dos levantamentos altimétricos realizados nos meses de abril, junho, julho, setembro, outubro e dezembro, foram extraídos 7 perfis transversais à linha de costa, correspondentes aos perfis escolhidos para o cálculo do transporte sedimentar por meio da modelagem.

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 (ESSE), 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.

Tabela 1 – CARACTERIZAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS (AMEVA)

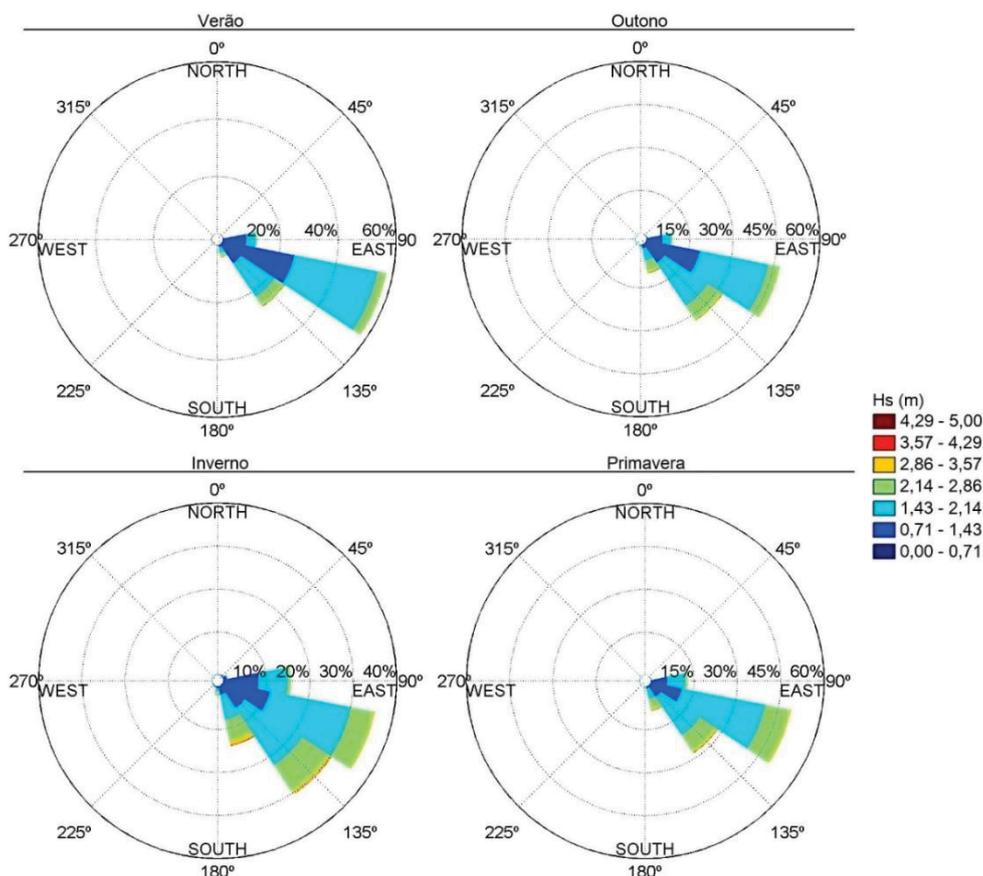
Direção (°N)	Probabilidade de Direção (%)	Hs _{50%} (m)	Tp _{50%} (s)	Hs ₁₂ (m)	Tp ₁₂ (m)
ENE	0,36	1,1401	7,3091	2,7377	10,8760
E	12,14	1,3698	7,1297	2,7690	11,4212
ESSE	47,33	1,5885	7,0921	3,0359	12,7639
SE	29,17	1,7690	8,3379	3,5267	13,9954
SSE	9,36	2,0618	9,8572	4,0899	14,0824
S	1,10	2,1135	9,4685	3,7710	13,3567

As cinco principais direções (E, ESSE, 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 (Hs_{50%} = altura significativa de onda mediana) variou de 1,14 m a 2,11 m com o período de pico (Tp_{50%}) 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 a 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 ESSE em todas as estações do ano. Para os períodos de verão, primavera e outono as ondulações que atingem a costa do Paraná 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



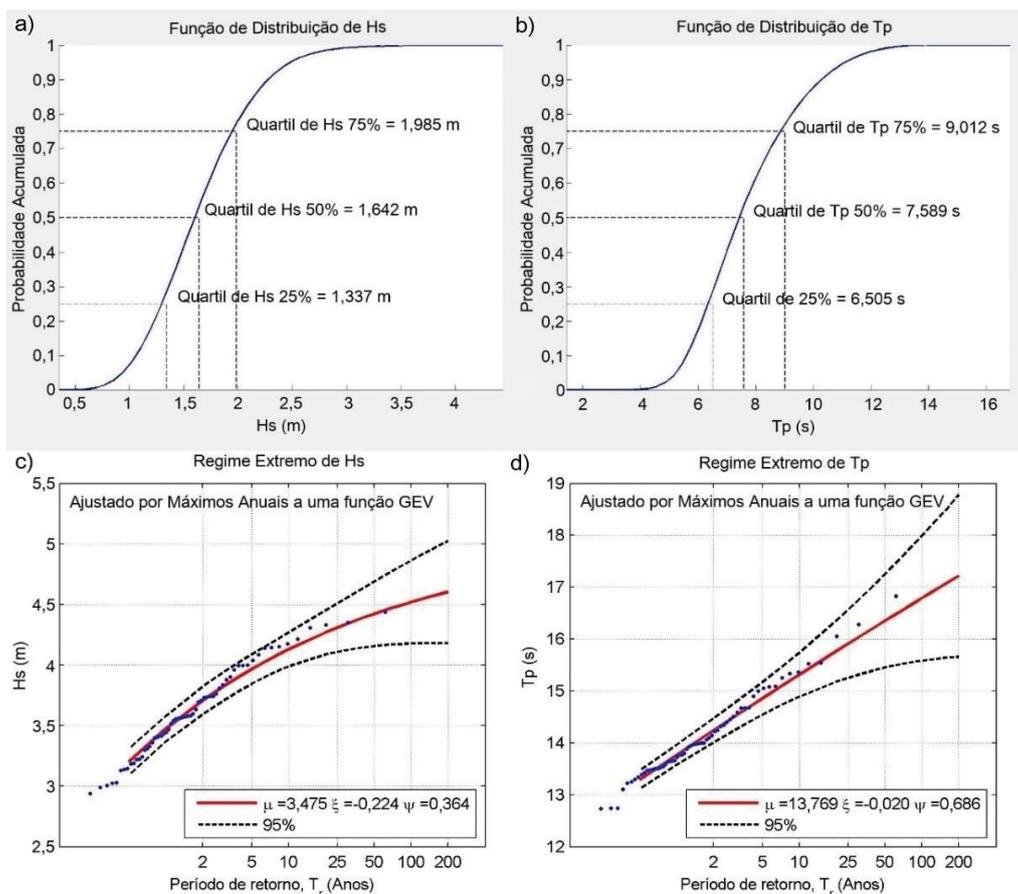
FONTE: O autor (2019).
 NOTA: Período de 60 anos.

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).

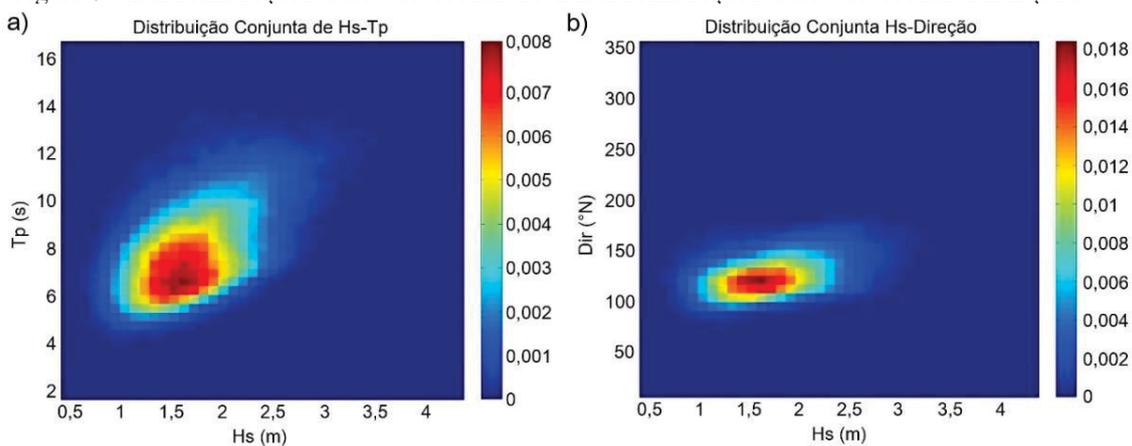
Figura 5 – CARACTERÍSTICAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ONDA



FONTE: O autor (2019).

NOTA: (a) altura de onda significativa, (b) período de pico e (c e d) regime extremo.

Figura 6 – DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA HS-TP E DISTRIBUIÇÃO CONJUNTA HS-DIREÇÃO

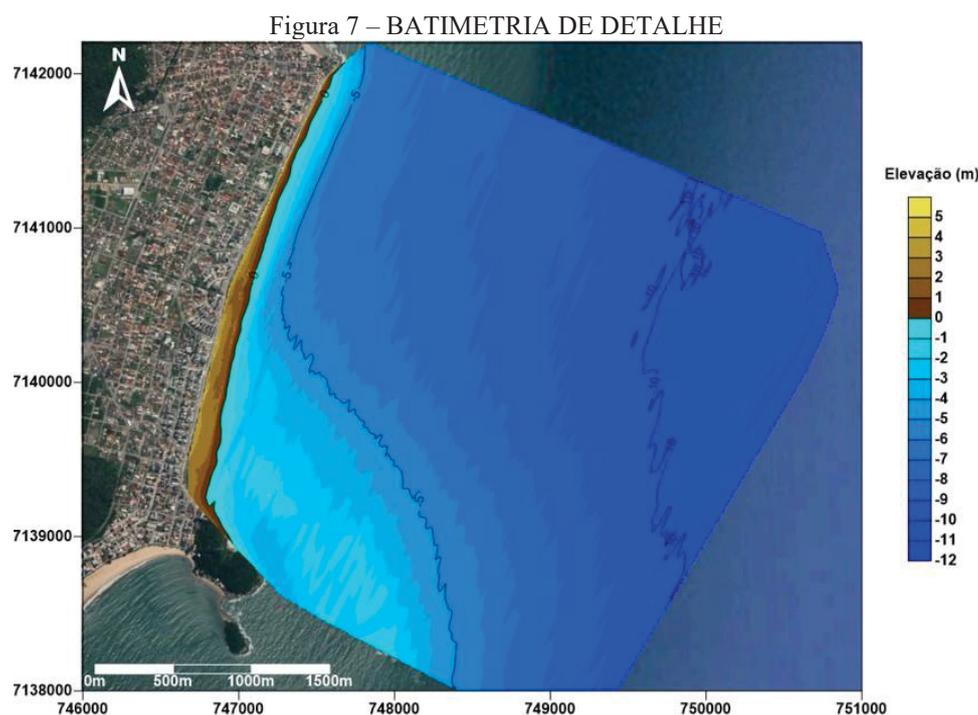


FONTE: O autor (2019).

NOTA: (a) altura significativa de onda (Hs) em função do período (Tp) e (b) altura significativa de onda (Hs) em função da direção (°N).

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.



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Na interpolação foram utilizados os dados coletados e os dados disponíveis no SMC-Brasil.

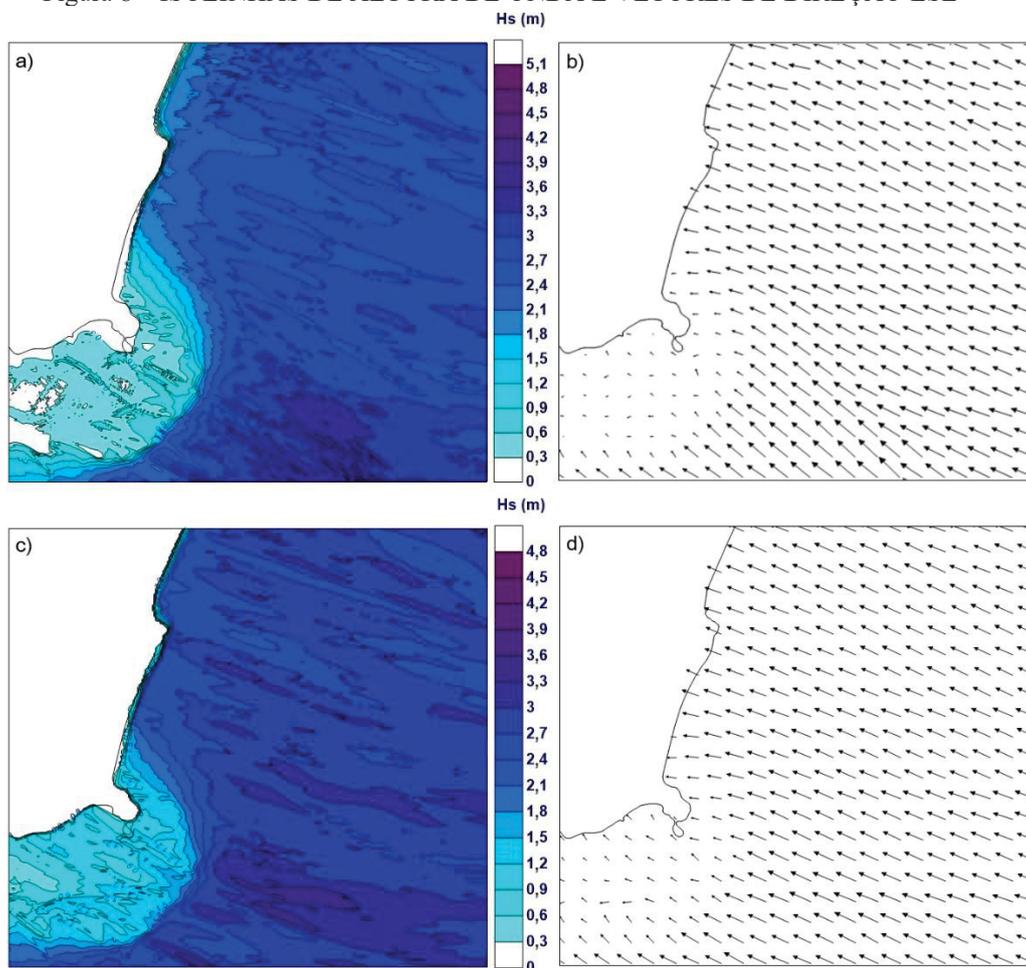
Processo semelhante ocorre com a ondulação de tempestade oriunda de E, a qual perfaz 12,1% dos estados de mar avaliados, observando-se o processo de refração na região mais ao sul da praia, com diminuição da altura significativa de onda próximo à praia. As ondas chegam quase perpendicularmente à linha 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.

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.

Figura 8 – ISOLINHAS DE ALTURA DE ONDA E VETORES DE DIREÇÃO ESE



FONTE: O autor (2019).

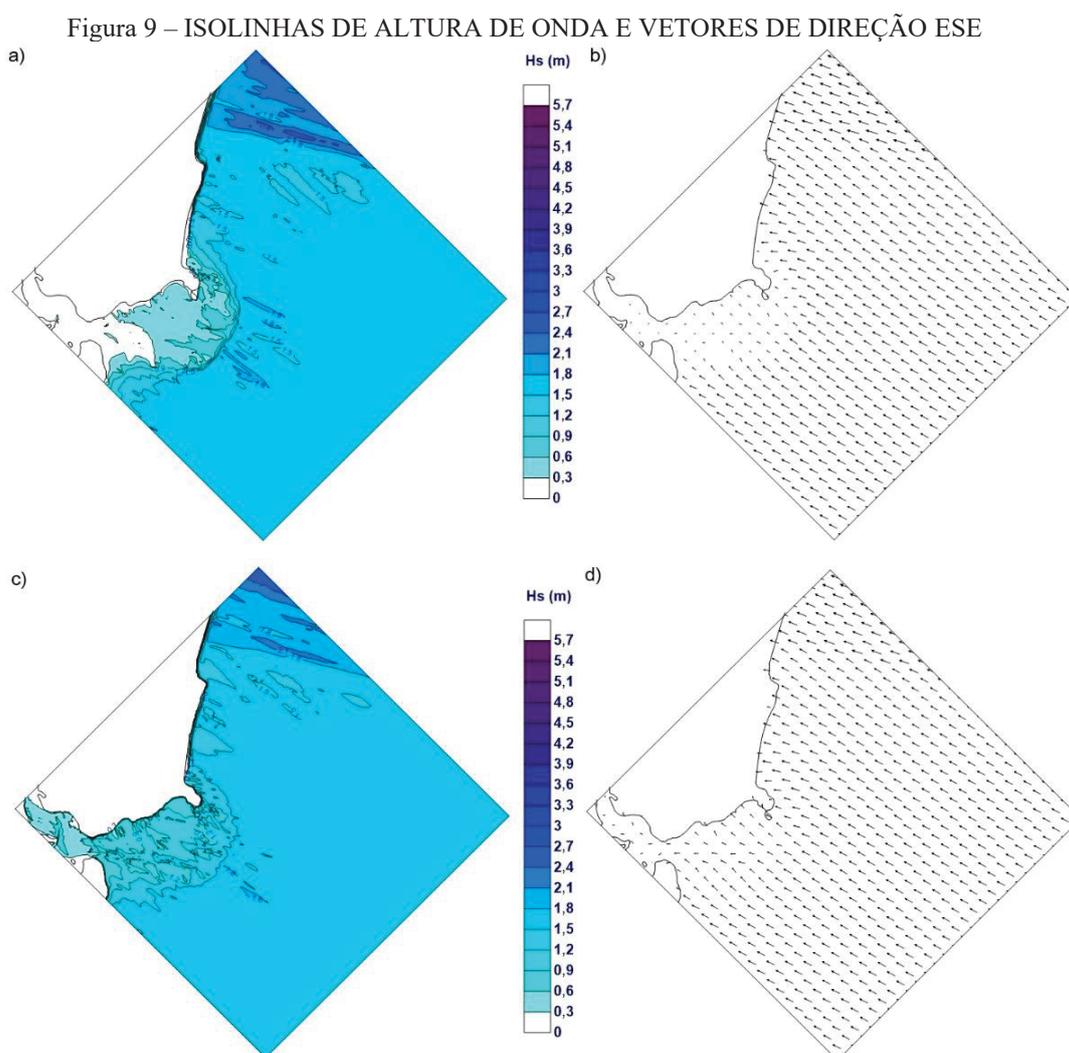
NOTA: Direções de onda leste-sudeste associadas a eventos de tempestade: (a) e (b) em baixamar; (c) e (d) em preamar.

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.



FONTE: O autor (2019).

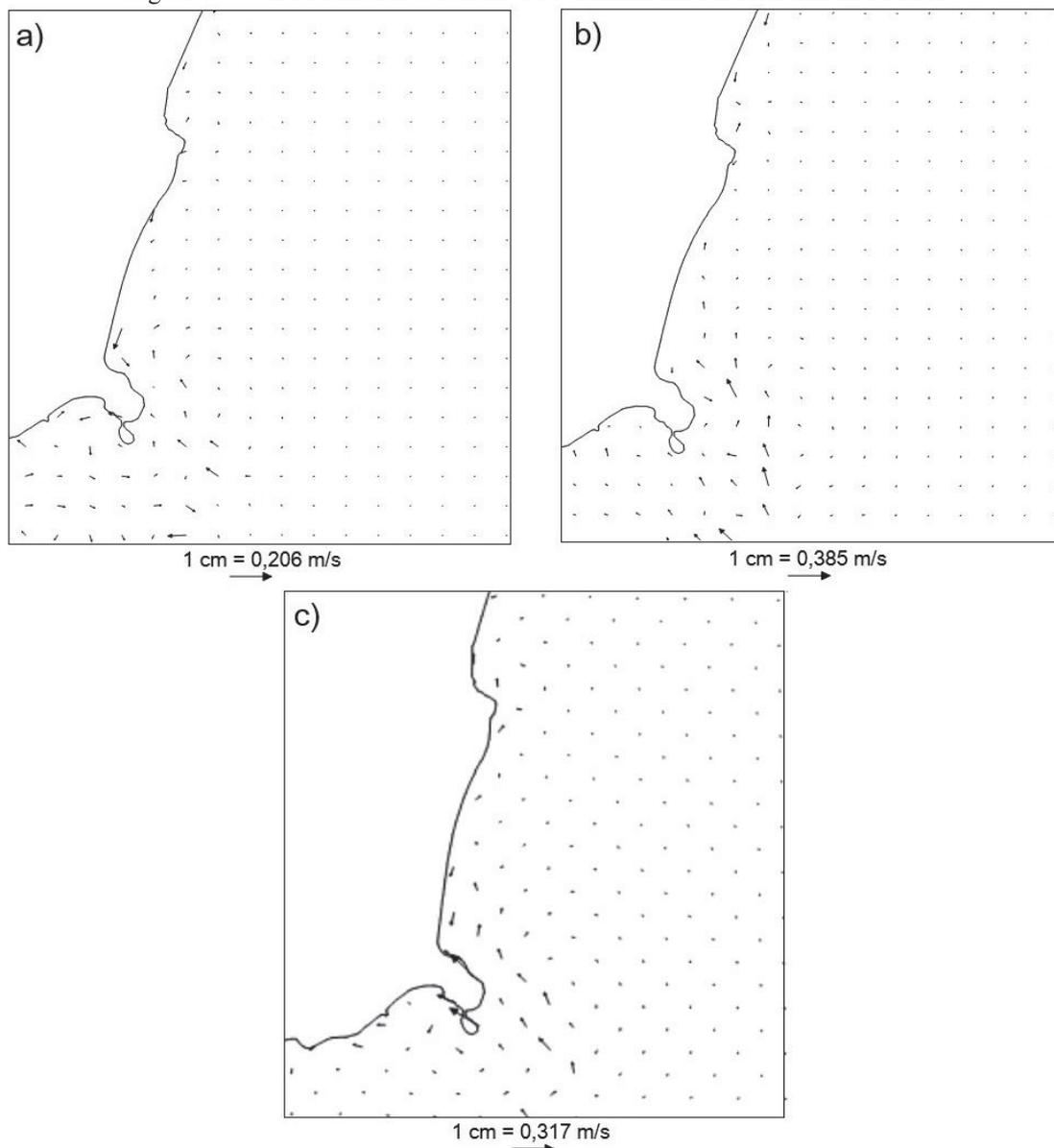
NOTA: Direções de onda leste-sudeste associadas a condições medianas: (a) e (b) em baixamar; (c) e (d) em preamar.

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

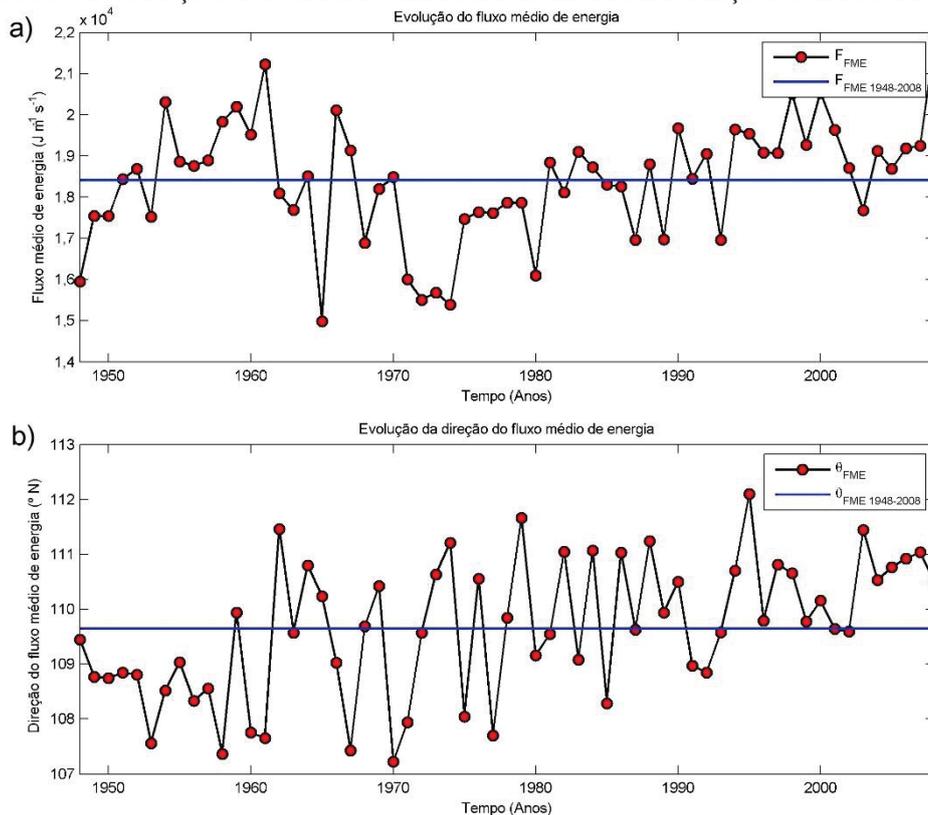


FONTE: O autor (2019).

NOTA: 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 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).

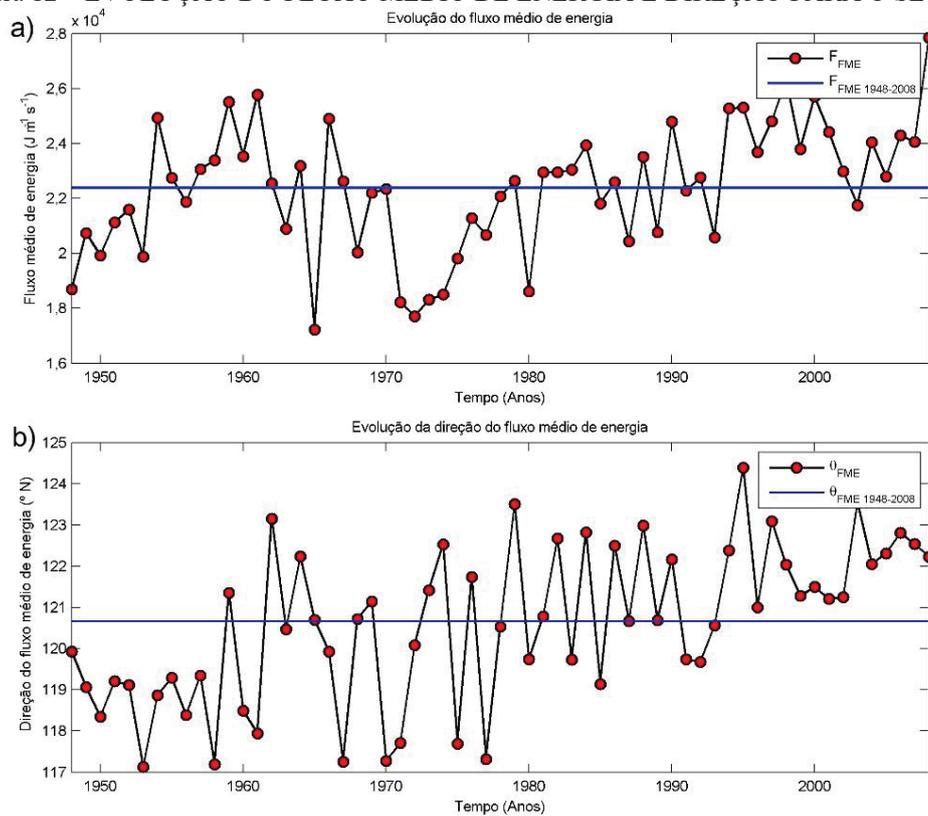
Figura 11 – EVOLUÇÃO DO FLUXO MÉDIO DE ENERGIA E DIREÇÃO PARA O SETOR 1



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Fluxo médio de energia (a) e direção do fluxo médio de energia (b).

Figura 12 – EVOLUÇÃO DO FLUXO MÉDIO DE ENERGIA E DIREÇÃO PARA O SETOR 2

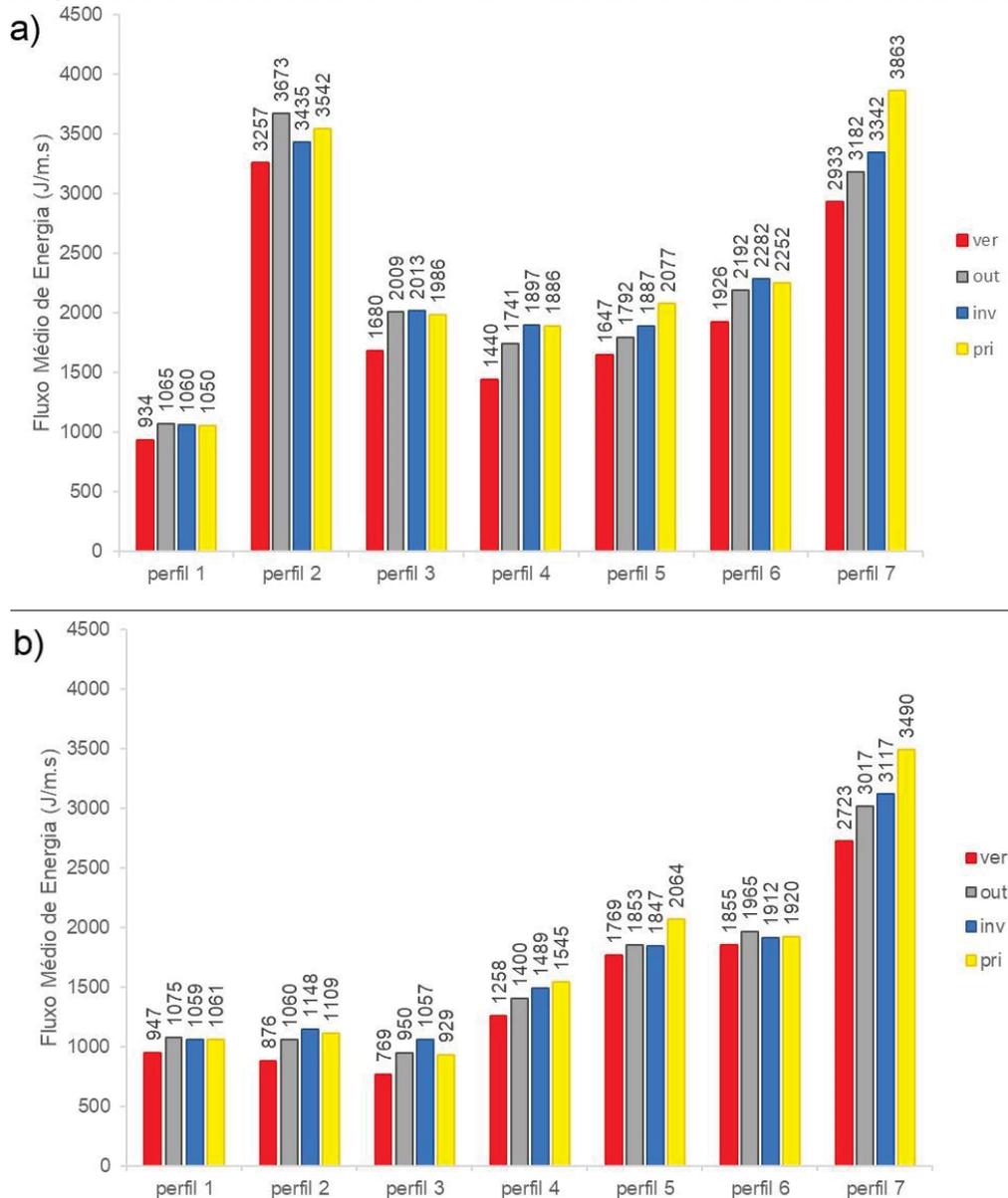


FONTE: O autor (2019).

NOTA: Fluxo médio de energia (a) e direção do fluxo médio de energia (b).

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 2 SETORES DA PRAIA BRAVA



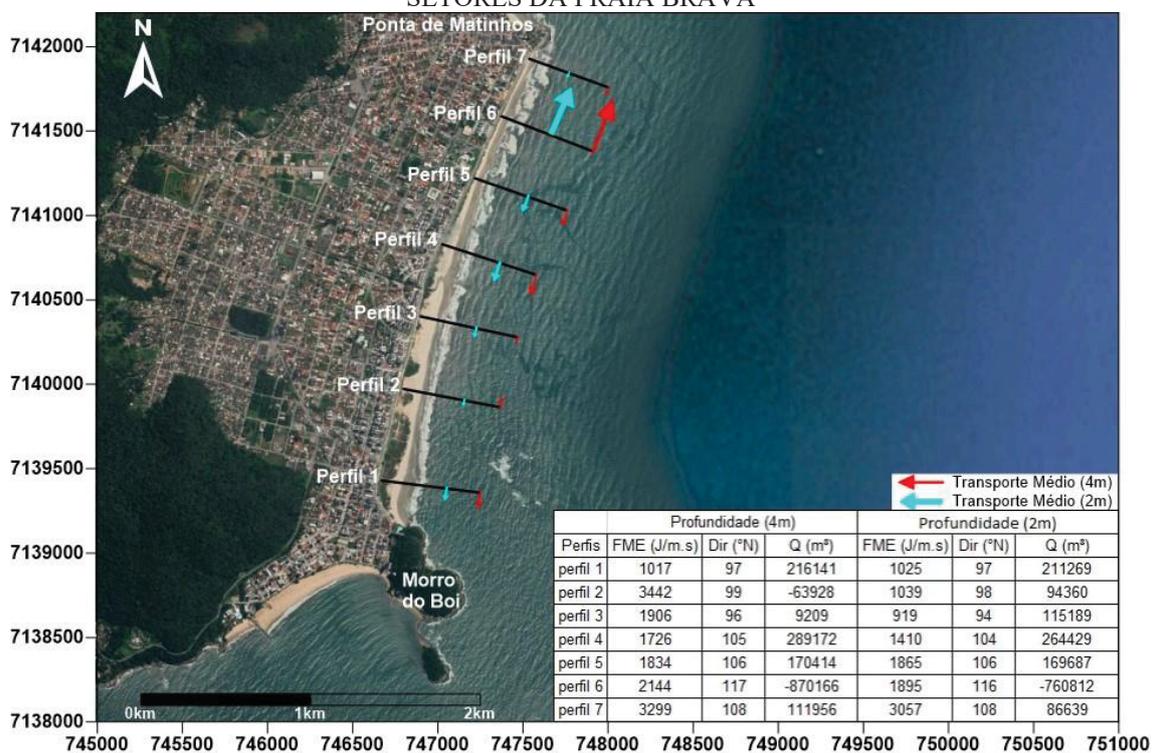
FONTE: O autor (2019).

NOTA: (a) corresponde aos perfis extraídos até a profundidade de 4 m e (b) até a profundidade de 2 m.

3.5 TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

O transporte sedimentar apresentou tendência de norte para sul, exceto no perfil e 6, o qual apresenta sentido de sul para norte. Observa-se que no perfil 6 há intensidades maiores no volume de sedimento transportado, enquanto o perfil 7 apresenta os menores valores. 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



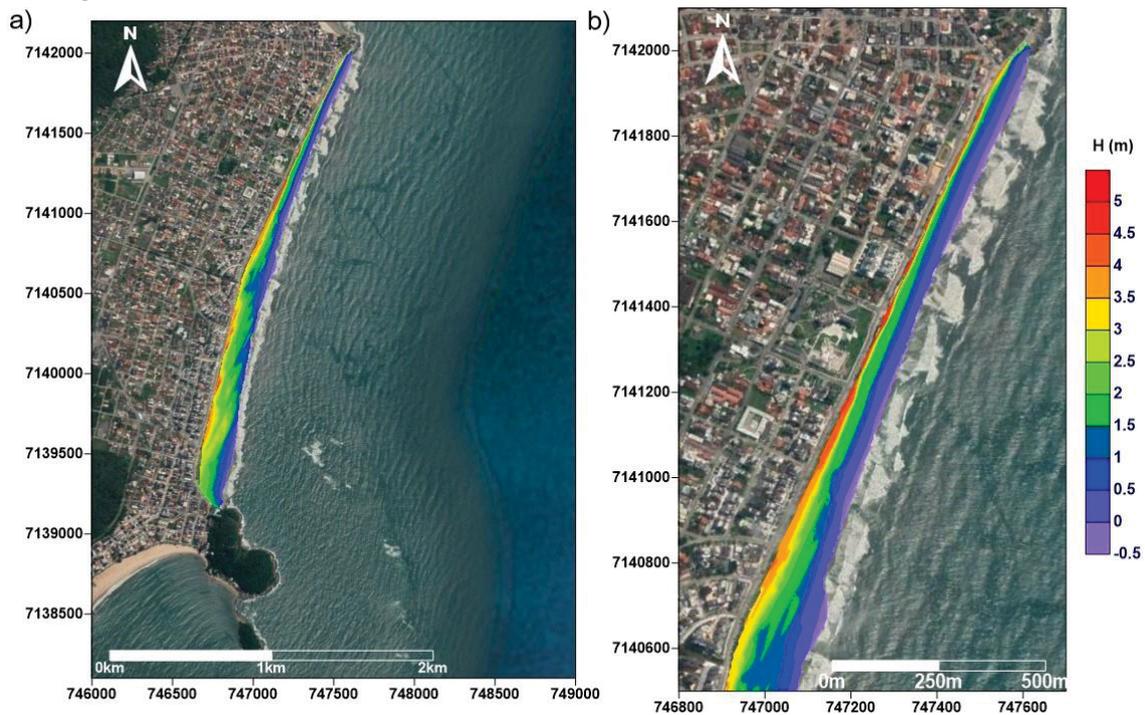
FONTE: O autor (2019).

NOTA: setor 1 (perfis 1, 2 e 3), setor 2 (4, 5, 6 e 7).

3.6 PERFIS ALTIMÉTRICOS

Os levantamentos altimétricos realizados de abril (Figura 15) a dezembro (Figura 16) apresentaram variação significativa ao longo da Praia Brava, com tendência erosiva ao longo da área de estudo. As variações ficaram em torno de 0,5 m; levando-se em conta a precisão do método utilizado nos levantamentos (0,2 m) a média foi de aproximadamente 0,3 m. Os perfis extraídos dos levantamentos evidenciam a variação no volume de sedimentos (Figura 17).

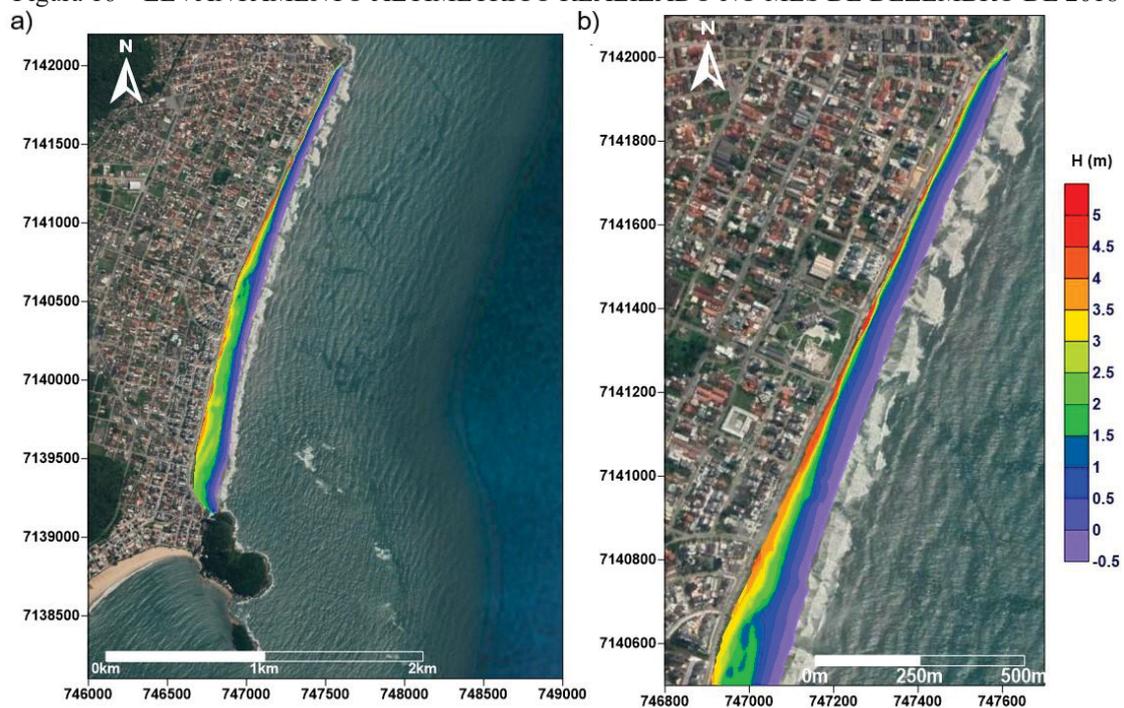
Figura 15 – LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO REALIZADO NO MÊS DE ABRIL DE 2018



FONTE: O autor (2019).

NOTA: (a) levantamento altimétrico e (b) detalhe do levantamento para a Praia Brava.

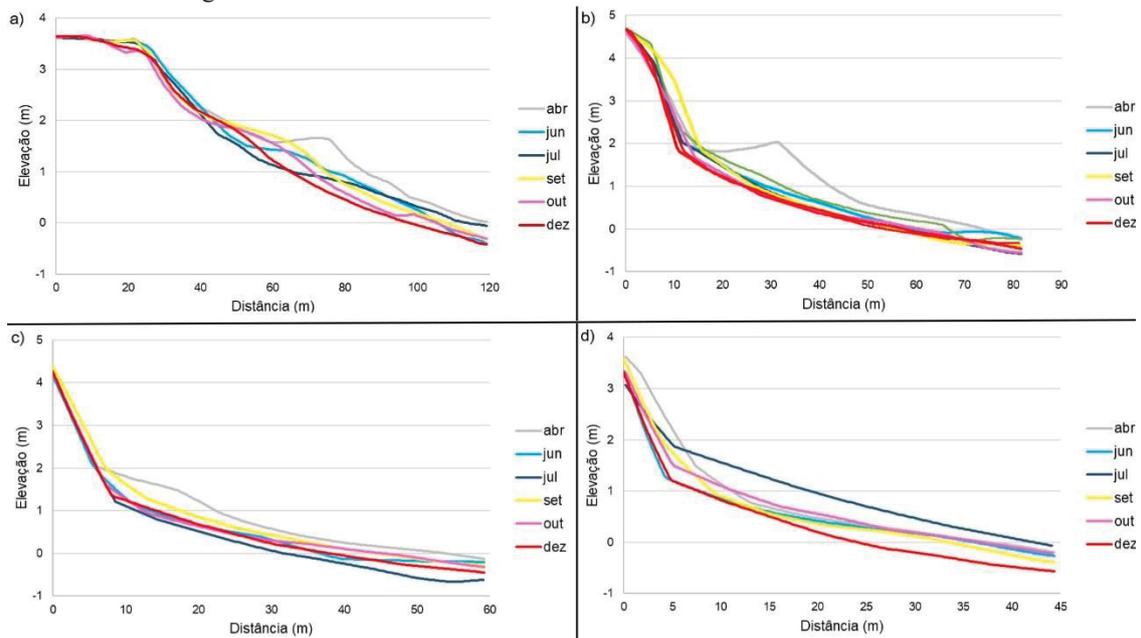
Figura 16 – LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO REALIZADO NO MÊS DE DEZEMBRO DE 2018



FONTE: O autor (2019).

NOTA: (a) levantamento altimétrico e (b) detalhe do levantamento para a Praia Brava.

Figura 17 – LEVANTAMENTOS ALTIMÉTRICOS PARA O SETOR 2



FONTE: O autor (2019).

NOTA: Valores dos perfis obtidos a partir de levantamentos altimétricos para os perfis 4 (a), 5 (b), 6 (c) e 7 (d), entre os meses de abril e dezembro de 2018.

4. DISCUSSÃO

O clima de ondas na área de estudo apresenta como direção principal as ondulações provenientes do quadrante ESE, perfazendo 47% das 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 à 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 médias para a 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 praiial 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; Brazilian Beach Systems, 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 praiial, e 2, ao norte. Enquanto no setor 1 os perfis apresentam distâncias entre 120 (perfil 3) a 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 perfil 2 é a responsável pela diferença maior entre os fluxos médios 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, arrebatando e assim perdendo energia.

A partir dos resultados para o transporte de sedimento obtidos na modelagem, 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). O transporte observado para o setor 6 é mais intenso, com direção de sul para norte. Tal fato pode ser explicado pela incidência mais frequente de trem de ondas vindos ESE (117°). O perfil 5 apresenta direção de transporte de norte para sul, bem como os outros perfis.

As taxas de transporte de sedimentos na praia Brava apresentam uma direção de transporte predominante de norte para sul, causado pela direção predominante do clima de ondas e orientação da costa. 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 partir dos perfis altimétricos levantados, um gradiente de altitude é observado: quanto mais a norte da Praia Brava estão localizados os perfis, menor é sua altitude. O perfil 4 apresenta maior extensão e elevação enquanto os perfis 5, 6 e 7 diminuem gradualmente em extensão. O perfil 7 apresenta transporte de norte para sul, porém com menores valores de volume de sedimento transportado (m^3) próximo à costa, a 2 m de profundidade; tal fato ocorre provavelmente pela ausência de correntes geradas, onde as ondas atingem a costa perpendicularmente, sem ângulo para gerar correntes para norte ou para sul.

A divergência dos vetores de transporte observada nos resultados obtidos com o modelo numérico evidencia a suscetibilidade do setor norte do arco praial à ação dos processos erosivos, apresentando a área entre os perfis 5 e 6 com maior vulnerabilidade. 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 longitudinal de sedimentos na praia Brava apresentou direção predominante para sul a partir da média anual analisada, 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 praiial 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.

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.

Apesar do uso de reanálises numéricas de ondas ser uma opção viável para obtenção de dados dispersos homogeneamente no tempo e espaço, é necessário deixar claro que estes são dados modelados e não propriamente medidos.

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 também 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.

REFERÊNCIAS

ANGULO, R.J. As praias do Paraná: problemas decorrentes de uma ocupação inadequada. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, v. 99, p. 97-103, 2000.

ANGULO, R.J.; SOUZA, M.C.; MÜLLER, M.E.J; NOERNBERG, M.A.; OLIVEIRA, L.H.S.; SOARES, C.R.; BORZONE, C.A.; MARONE, E. **Panorama da Erosão Costeira no Brasil: Capítulo Paraná**, 2018.

BITTENCOURT, A.C.S.P.; LIVRAMENTO, F.C.; DOMINGUEZ, J.M.L.; SILVA, I.R. Tendência de longo prazo à erosão costeira num cenário prospectivo de ocupação humana: litoral norte do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 40, n. 1, p. 125-137, 2010.

Booij, N. Gravity waves on water with non-uniform depth and currents, Delft University of Technology, **Report** v. 81, n. 1, p. 131, 1981.

BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. A third generation wave model for coastal regions. Part I: model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. 4, p. 7649-7666, 1999.

CEPAL-ONU. Dinámicas, tendencias y variabilidad climática. In: **Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe**, 2015.

CERC. **Shore Protection Manual**. Washington, DC: US Army Engineer Waterways Experiment Station, US Government Printing Office, 1984.

DEL VALLE, R.; MEDINA, R.; LOSADA, M. Dependence of coefficient k on grain size, Technical Note No. 3062. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 119, n. 5, p. 568-574, 1993.

ESPEJO, A.; CAMUS, P.; LOSADA, I.; MENDEZ, F. Spectral ocean wave climate variability based on atmospheric circulation patterns. **Journal of Physical Oceanography**, v. 44, n. 8, p. 2139-2152, 2014.

GOMES DA SILVA, P.; KLEIN, A.H.F.; GONZÁLEZ, M.; GUTIERREZ, O.; ESPEJO, A. 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, 2015.

GOMES, G.; DA SILVA, A.C. Coastal Erosion Case at Candeias Beach (NE-Brazil). **Journal of Coastal Research**, v. 71, n. 1, p. 30-40, 2014.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico de 2010**. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: fev. 2019.

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, p. 327, 1983.

KIRBY, J.T.; 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.

KLEIN, A.H.F.; MENEZES, J.T.; DIEHL, F. L.; ABREU, J.G.N.; POLETTE, M., SPERB, R.M.; SPERB, R.C. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília, Distrito Federal: Ministério do Meio Ambiente, p. 476, 2006.

KOMAR, P.D.; INMAN, D.L. Longshore sand transport on beaches, **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n.30, 1970.

KRAUS, N.C.; ISOBE, M.; IGARASHI, H.; SASAKI, T.O.; HORIKAWA, K. Field experiments on longshore sand transport in the surf zone, **Proceedings of 18th International Conference on Coastal Engineering** (Cape Town, South Africa), p. 969-988, 1982.

MELVILLE, W. K. Energy dissipation in breaking waves. **Journal of Physical Oceanography**, v. 24, p. 2041–2049, 1994.

MÍNGUEZ, R.; ESPEJO, A.; TOMÁS, A.; MÉNDEZ, F.J.; LOSADA, I.J. Directional Calibration of Wave Reanalysis Database Using Instrumental Data. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 28, p. 1466-1485, 2011.

MUEHE, D. Estado morfodinâmico praias no instante da observação: uma alternativa de identificação. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 46, n. 2, p. 157-169, 1998.

MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília, Distrito Federal, p. 476, 2006

NOVAK, L.P.; LAMOUR, M.R.; CATTANI, P.E. Vulnerabilidade aos processos erosivos no litoral do Paraná. **Revista Ra'e Ga**, v. 38, p. 195-220, 2016.

PORTO LIMA, M.G. **Controle da erosão em praias arenosas pelo método de recifes artificiais submersos - praia Brava de Matinhos - PR**. Curitiba, Paraná: Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, p. 92, 2008.

QUADROS, C.J.L. **Morfodinâmica de praias arenosas oceânicas do arco praias Pontal do Sul-Caiobá, PR**. No prelo.

REGUERO, B.G.; MENÉNDEZ, M.; MÉNDEZ, F.J.; MÍNGUEZ, R.; LOSADA, I.J. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, 2012.

SHORT, A.D. **Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics**. Chichester: John Wiley and Sons, p. 379, 1999.

SHORT, A.D; KLEIN, A.H.F., (eds). **Brazilian Beach Systems**. Springer International Publishing, Switzerland, p. 611, 2016.

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.

SNAREY, M.; TERRET, N.K.; WILLETT, P.; WILTON, D.J. Comparison of algorithms for dissimilarity-base compound selection. **Journal of Molecular Graphics and Modelling**, v. 15, n. 6, p. 372–385, 1997.

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, v. 89, n. 2, p. 72, 1989.