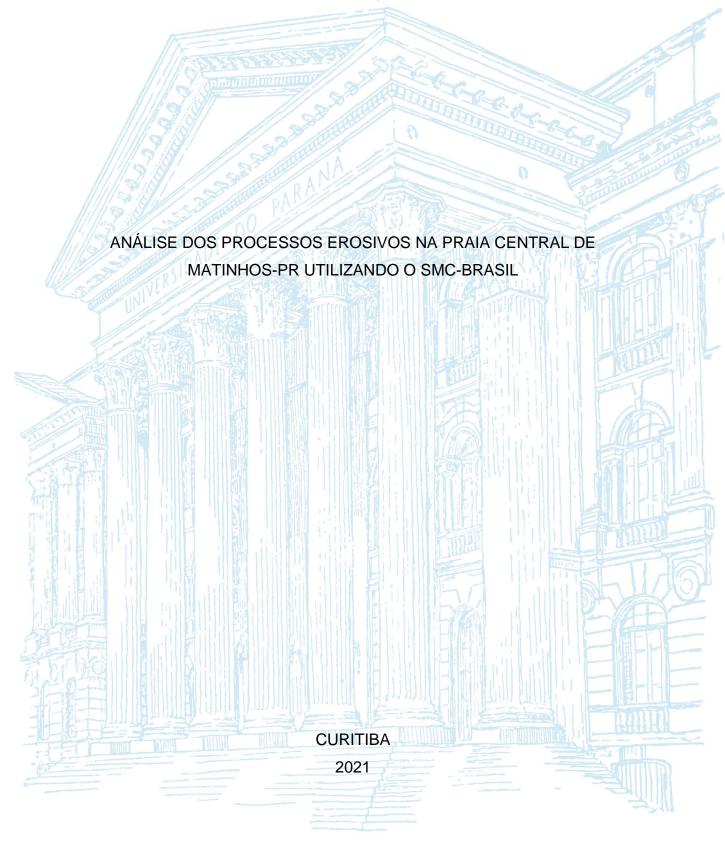
## UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

# PAULO HENRIQUE LABA



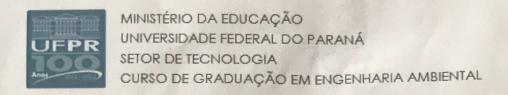
#### **PAULO HENRIQUE LABA**

# ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS NA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS-PR UTILIZANDO O SMC-BRASIL

TCC apresentada ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

**Orientadora**: Profa. Dra. Cynara de L. da N. Cunha

CURITIBA 2021



# TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

# PAULO HENRIQUE LABA

# ANÁLISE DOS PROCESSOS EROSIVOS NA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS-PR UTILIZANDO O SMC-BRASIL

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 100, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): Cym du hu'huy

Professora Dra. Cynara de L. da N. Cunha

Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 1:

Professor Dr. Maurício Felga Gobbi

Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

Membro(a) 2:

Professor Dr. Eduardo Felga Gobbi

Departamento de Engenharia Ambiental / UFPR

#### **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe por fazer de tudo por mim e pelos meus irmãos, que mesmo com todas as dificuldades que passamos, sempre nos permitiu estudar.

Agradeço à professora Cynara que me acolheu, compartilhou seu conhecimento e me inspirou. Tenho certeza do que quero fazer no futuro graças a ela.

Agradeço à minha namorada por fazer parte de todo esse meu ciclo acadêmico, me incentivando e dando amparo para cada adversidade encontrada.

Agradeço 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.

#### **RESUMO**

O Brasil possui um litoral com uma extensão de mais de 7 mil guilômetros. Compreender os fenômenos costeiros é fundamental para melhorar o gerenciamento destas regiões. Devido ao dinamismo que o sistema costeiro apresenta com os processos naturais e influências antrópicas (urbanização, retirada de sedimentos para construção civil, ocupação indevida da orla), faz-se necessário utilizar ferramentas tecnológicas que possam subsidiar decisões que afetam ao litoral. O município de Matinhos, situado no litoral centro sul do Paraná, teve um aumento considerável de população nos últimos vinte anos. Este crescimento pressiona a ocupação em áreas próximas à praia, gerando um aumento de construções na zona costeira. O balneário Flamingo, localizado em Matinhos, é uma área que requer grande atenção devido à gravidade dos processos erosivos que ali ocorrem. O presente trabalho investigou a circulação litorânea próxima ao balneário Flamingo, na Praia Central de Matinhos (aproximadamente um quilômetro a sul do balneário) e estudou uma alternativa de melhoria em relação aos processos de erosão/transporte de sedimentos usando o Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC-Brasil). Verificou ainda a adequação do banco de dados de ondas do SMC-Brasil comparando com dados da literatura, definindo o estado de mar na região próxima à Praia Central de Matinhos e verificando a influência da instalação de um recife artificial multifuncional (RAM) nas ondas, nas correntes, nas zonas de arrebentação e nas cotas de inundação na região próxima ao local de sua instalação. Os resultados obtidos mostram que o clima de ondas definido pelo modelo está de acordo com o mostrado na literatura. Quanto à utilização do RAM, houve a criação de zonas de recirculação de correntes e alteração na zona de arrebentação no local de sua instalação, não alterando a vizinhança, o que demonstra efetividade contra o problema erosivo, sendo necessário o desenvolvimento de mais pesquisas nessa área.

Palavras-Chave: erosão, clima de onda, RAM, SMC-Brasil, Matinhos.

#### **ABSTRACT**

Brazil has a coastline with an extension of more than 7,000 kilometers, therefore, understanding the coastal phenomena is essential to improve the management of these regions. For this reason, there are more and more studies focused on these regions, however, due to the dynamism that the coastal system presents with natural processes and anthropogenic influences (urbanization, removal of sediment for civil construction, undue occupation of the shore), it is necessary use technological tools that can support decisions about the coast. Matinhos, located on the south-central coast of Paraná, had a considerable increase in population in the last twenty years. This growth pressure on occupation in areas close to the beach, generating an increase in construction in the coastal zone. The Flamingo coastal area, located in Matinhos, is an area that requires great attention due to the seriousness of the erosive processes that occur there. The present work investigated the coastal circulation near the Flamingo region and studied an alternative to improve erosion/sediment transport processes using the Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC-Brasil). It also verified the adequacy of the SMC-Brasil wave database by comparing it with literature data, defining the sea state in the region close to the Flamingo and verifying the influence of the installation of a multifunctional artificial reef (MFAR) on the wave climate, in the currents, in the surf zones and in the flood levels in the region close to the place of its installation and in the neighborhood. The results obtained show that the wave climate defined by the model is in agreement with that shown in the literature. As for the use of the MFAR, there was the creation of current recirculation zones and alteration in the surf zone at the place of its installation, not changing the neighborhood, which demonstrates effectiveness against the erosive problem, requiring the development of more research in this area.

**Keywords**: erosion, wave climate, MFAR, SMC-Brasil, Matinhos.

# **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Municípios do litoral do Paraná e a região de interesse. (Fonte: O
Autor)13
Figura 2. Local onde existia a avenida logo após a ressaca de julho de 1996.
(Fonte: GOBBI, 1997)15
Figura 3. Reportagem com a imagem da ressaca registrada em Matinhos no dia
08 de abril de 2020 publicada no portal G1. (Fonte: G1, Globo.com) 16
Figura 4. Curva de maré medida na 2901-Ilha da Paz (SFS), coordenadas:
748151.49E; 7099789.19S. O nível zero corresponde ao nível médio do mar na
região. A diferença entre o zero e o nível médio diário é a maré meteorológica.
Em vermelho, a média móvel com período de 24h. (Fonte: Epagri, 2020) 17
Figura 5. Altura significativa e direção das ondas - Modelo WWATCH/GLOBAL
para às 21h do dia 08 de abril de 2020. (Fonte: SIMEPAR, CPTEC-INPE, 2020)
Figura 6. Diagrama geral do perfil de praia. (Adaptado de Albino, 1999) 20
Figura 7. Diferentes fontes de sedimento em um ambiente praial. (SOUZA, 2009)
20
Figura 8. Espectro de energia das ondas oceânicas. (Adaptado de Houthuijsen,
2007)23
Figura 9. Estrutura dos modelos numéricos do SMC-Brasil. (Fonte: IHCantabria,
2020)
Figura 10. Recife Artificial na praia de Narrowneck, Gold Coast – Australia 28
Figura 11. Recife Artificial na praia de Boscombe, Inglaterra28
Figura 12. Metodologia para obtenção de dados de propagação de ondas
(Fonte: MMA, 2018)
Figura 13. Explorador de Dados do SMC-Tools33
Figura 14. Pontos DOW calculados (laranja) e ponto M (vermelho) utilizado para
propagação das ondas para a região do balneário Flamingo
Figura 15. Malhas utilizadas para a propagação do trem de onda partindo do
ponto M na região do balneário Flamingo35
Figura 16. Definição de casos no MOPLA para o Ponto M utilizando o modelo
OLUCA-SP para propagação na malha criada36
Figura 17. Criação dos casos propagados no MOPLA para a região do balneário
Flamingo
Figura 18. Representação gráfica dos casos propagados classificados por
Máxima Similaridade para o Ponto M no balneário Flamingo
Figura 19. Opções de reports do SMC-Tools após conclusão da terceira etapa.
39
Figura 20. Esquema utilizado pelo SMC para definir cotas de inundação. (Fonte:
BRASIL, 2017f)
Figura 21. Em vermelho, botões de pré-processamento e pós-processamento
do SMC-Tools
Figura 22. Perfis investigados e localização do RAM

Figura 23. Localização do ponto P (vermelho) no SMC, utilizado na comparação
com os dados medidos por Nemes & Marone (2013)44
Figura 24. Distribuição da altura e período de onda por direção no intervalo de
09/07/2009 a 19/10/2010 (n=2389) no ponto P obtido por Nemes&Marone, 2013
(cima) e caracterização do clima de ondas do Ponto P obtido pelo SMC-Brasil.
(Fonte: Nemes&Marone, 2013 e SMC-Brasil)45
Figura 25. Altura Significativa (Hs) por estações do ano para o Ponto P (Fonte:
Nemes & Marone, 2013) 46
Figura 26. Rosas direcionais de altura significativa, por estação do ano, gerados
no SMC-Brasil para o Ponto P47
Figura 27. Rosas direcionais de Hs e de Tp para o Ponto M
Figura 28. Probabilidade de não excedência de Hs e Tp para principais direções
no ponto M49
Figura 29. Rosas direcionais de altura significativa, por estação do ano, gerados
no SMC-Brasil para o Ponto M, no balneário Flamingo50
Figura 30. Área investigada no SMC, com os 5 perfis, os pontos de interesse
(POI) e localização do RAM, além dos sentidos do fluxo de sedimento, antes e
depois da instalação do RAM51
Figura 31. Perfil 2 sem (a) e com RAM (b)52
Figura 32. Padrão de correntes antes (esquerda) e após inserção do RAM
(direita)52
Figura 33. Zona de arrebentação sem RAM no perfil 2 (esquerda) e zona de
arrebentação com RAM no perfil 2 (direita)54
Figura 34. Histograma de CI para os casos sem e com RAM para o perfil 2 55
Figura 35. Período de retorno (Tr) para o perfil 2 para os casos sem RAM e com
RAM 55
Figura 36. Cota de Inundação para o perfil 4 antes e depois da instalação do
RAM. A CI praticamente não varia56

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVOS GERAIS	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 ÁREA DE ESTUDO	13
4 REVISÃO DE LITERATURA	19
4.1 EROSÃO COSTEIRA	19
4.2 ONDAS	22
4.3 SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC)	24
4.4 RECIFES ARTIFICIAIS MULTIFUNCIONAIS	27
5 METODOLOGIA	30
5.1 SELEÇÃO DA REGIÃO – PRÉ PROCESSAMENTO	33
5.2 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ATÉ A REGIÃO DA PRAIA	34
5.3 SIMULAÇÃO DOS CASOS SELECIONADOS	37
5.4 PÓS-PROCESSAMENTO	39
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
6.1 AVALIAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS	43
6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM DADOS MEDIDOS	43
6.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS NAS PROXIMIDADES DA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS	47
6.4 INFLUÊNCIA DO RAM NA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS	50
7 CONCLUSÃO	57
8 REFERÊNCIAS	59
9 ANEXOS	63

# 1 INTRODUÇÃO

As zonas costeiras apresentam grande dinamismo e, em muitos casos, há influência antrópica sobre o complexo sistema oceânico. Fato é que regiões costeiras são valorosas e requerem atenção pois, com seus portos e praias, impactam diretamente a sociedade e a economia.

Diante da importância que o litoral apresenta, com o passar dos anos, houve a urbanização nesses locais, aumentando sua vulnerabilidade física. O turismo sazonal e as cidades que margeiam rotas de navios trazem como consequência geração de empregos, necessidade de bons acessos e construção de moradias. No entanto, o que preocupa é como esta interação homem *versus* mar se dá, uma vez que obras realizadas na orla praial podem influenciar diretamente na configuração da linha da costa.

Um problema que esse desenvolvimento pode trazer é a erosão costeira. O problema erosional ocorre quando há perda de sedimentos na linha da costa, diminuindo a área para dissipação da energia proveniente das ondas (SOUZA, 2009). Em momentos de tempestades e/ou ressacas, quando há um aumento na agitação do mar, as ondas quebram bem próximas da orla e, dependendo da ocupação ali presente, ocorrem alagamentos em calçadões, avenidas e casas (muitas vezes construídas de maneira irregular) que circundam a praia, danificando essas estruturas e gerando prejuízos tanto para a população quanto para o poder público.

A costa brasileira apresenta uma extensão de mais de sete mil quilômetros e, problemas relacionados a estas regiões, estão presentes de norte a sul. O litoral paranaense não é exceção; processos erosivos perduram ao longo de décadas (GOBBI, 1997; NOVAK, 2017). Entender os fatores que favorecem a erosão costeira ajuda a prever e mitigar os efeitos para a população local. Diante desse contexto, fica nítida a importância de desenvolver metodologias que possam investigar as causas e auxiliar na tomada de decisões dos gestores das regiões costeiras.

O município de Matinhos, situado no litoral centro-sul do Paraná, teve um aumento considerável no número de habitantes nos últimos vinte anos. Segundo

levantamentos do IBGE, entre os anos de 1997 até 2019, houve um crescimento populacional de aproximadamente 85%. Este crescimento pressiona a ocupação em áreas próximas à praia, gerando um aumento de construções na zona costeira. Durante o processo de urbanização, foram formadas diversas aglomerações, denominadas balneários, onde reside boa parte dos habitantes do litoral.

O balneário Flamingo, localizado em Matinhos, encontra-se a cerca de 110 km de Curitiba (capital do estado) e é uma das áreas que requer maior atenção devido à gravidade dos processos erosivos que ali ocorrem.

Considerando as variáveis envolvidas nos processos de erosão costeira e, a extensão das áreas, que dificulta a coleta dos dados adequados, os modelos computacionais passaram a ser grandes aliados, pois permitem simular e prever diferentes cenários.

Neste trabalho, o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) adaptado para o Brasil (SMC-Brasil) será utilizado. O SMC foi desenvolvido pelo instituto de Hidráulica Ambiental de Cantábria (IHCantábria / Universidad de Cantabria – ESP) em conjunto com o Ministério do Meio Ambiente espanhol, buscando auxiliar no desenvolvimento de pesquisas e nas respostas para combater interferências nas regiões de costa. O SMC-Brasil contém modelos numéricos e um extenso banco de dados proveniente de cartas náuticas (batimetrias), dados de ondas e níveis de mar. Com ele, é possível investigar a dinâmica e a evolução de um sistema costeiro, além de reproduzir e propor soluções de engenharia.

Dentre as possíveis medidas para combater o processo erosivo nas praias, os recifes artificiais multifuncionais (RAM) têm se tornado uma alternativa cada vez mais difundida, tendo em vista que além de dissiparem boa parte da energia proveniente das ondas, também podem melhorar as condições de surfe e servir de hábitat para espécies, o que torna o local de sua instalação mais suscetível ao turismo, impactando diretamente na economia. O SMC-Brasil permite estudar, preliminarmente, a eficácia dessas estruturas no combate a erosão costeira.

#### **2 OBJETIVOS**

#### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

Investigar a circulação litorânea próxima ao balneário Flamingo, no município de Matinhos, localizado no litoral centro-sul do Paraná e estudar uma alternativa de melhoria em relação aos processos de erosão/transporte de sedimentos usando o Sistema de Modelagem Costeira – Brasil (SMC-Brasil).

#### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a adequação do banco de dados de ondas do SMC-Brasil comparando com dados da literatura;
  - Definir o estado de mar na região próxima ao balneário Flamingo;
- Estudar a alternativa de instalação de um recife artificial multifuncional (RAM) na região próxima ao balneário Flamingo;
- Verificar a influência da instalação do RAM no clima de ondas, nas correntes, nas zonas de arrebentação e nas cotas de inundação na região próxima ao local de sua instalação e na vizinhança.

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

O município de Matinhos localiza-se no litoral do estado do Paraná, entre a serra do mar e a linha da costa, em uma planície costeira formada durante o quaternário (GOBBI, 1997) e constituída majoritariamente por sedimentos arenosos e areno-argilosos. Está a aproximadamente 110 km de Curitiba (capital do estado), limitando-se a leste pelo Oceano Atlântico, a norte com Pontal do Paraná, ao sul com a Baía de Guaratuba e a oeste com o município de Guaratuba. Segundo dados de 2017 do IBGE, Matinhos possui 117 km² de extensão superficial e 29 balneários. A Figura 1 mostra a localização dos municípios do litoral paranaense e a região de interesse.

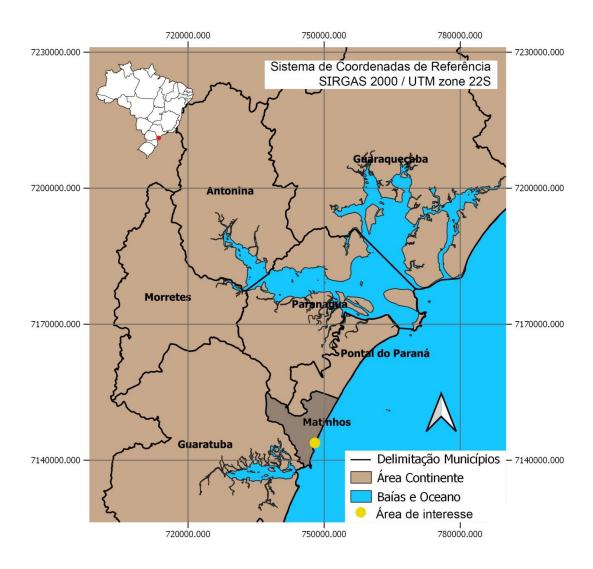


Figura 1. Municípios do litoral do Paraná e a região de interesse. (Fonte: O Autor)

Segundo a classificação internacional de Koppen, o clima da planície costeira paranaense é do tipo Cfa, que se refere a clima subtropical úmido com temperatura média anual entre 20.8°C e 22°C. A maré astronômica do litoral do Paraná é semidiurna e, no período de sizígia, pode apresentar altura de 1.8m e, na quadratura, 0.8m (GOBBI, 1997).

Medições de ventos do litoral paranaense são recentes. Existem medições de 1982 a 1986 em uma estação de Pontal do Sul (Portobrás - 1988) que foram descontinuadas e, apenas em 1996, retomou-se a coleta desses dados pela estação automática do Centro de Estudos do Mar na mesma localidade. Hoje existem várias estações automáticas distribuídas pelo estado e são geridas pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Conhecer o padrão de ventos ajuda a descrever o clima de ondas local (GOBBI, 1997), importante para a caracterização e previsão do estado de agitação marítima, sendo fundamental para todas as atividades ligadas ao oceano e à costa.

Alguns estudos foram desenvolvidos na região. Novak (2017) investigou os perfis de praia em pontos específicos do litoral paranaense e, para a área de interesse (Praia Central, próxima ao balneário Flamingo), percebeu que, a partir do ano de 1980 houve um recuo da linha da costa, o que não ocorria até então. Isso se deve à ocupação acentuada que ali ocorreu, com um aumento populacional de quase 6 mil habitantes em 1980 para quase 19 mil ao final da década de 90 no município (GOBBI, 1997). A região do Flamingo e o balneário vizinho (Riviera) compreenderam as maiores taxas de erosão calculadas entre os anos de 1980 e 2016. Além de levantar as taxas de avanço/recuo, Novak (2017) também classificou os sedimentos nas regiões selecionadas; no balneário Flamingo foi possível observar a predominância de areia fina.

As praias do litoral do estado do Paraná, principalmente as regiões de Caiobá e Matinhos, começaram a ser habitadas na década de vinte e com muitas residências próximas da zona litorânea na década de trinta. Com isso, surgiu a necessidade de criação de uma infraestrutura no local, o que acarretou a construção de avenidas e calçadões na costa, sendo essa a principal causa de erosão dessas praias (GOBBI, 1997). A falta de planejamento é nítida nesses empreendimentos, tendo em vista que praticamente todas essas estruturas ruíram após episódios de ressacas nas décadas de 80 e 90. Segundo Gobbi

(1997, apud. NEVES, 1992), a partir da década de oitenta, os processos erosivos se intensificaram no município de Matinhos, notou-se também um aumento nas marés meteorológicas na década de noventa.

Os balneários Flamingo, Caiobá e Riviera possuem a urbanização mais consolidada do litoral paranaense (NOVAK, 2017), sendo a região mais afetada e vulnerável a erosão no estado do Paraná (GOBBI, 1997), devido às inúmeras obras que ali ocorreram, sejam voltadas para mobilidade (como avenidas) ou para proteção costeira (como enrocamentos).

Logo após a construção da avenida Atlântica, no começo da década de 90, o balneário Flamingo apresentou problemas relacionados à erosão. Um enrocamento construído para proteger a avenida também não foi capaz de suportar as ondas de tempestades, sendo destruídos juntamente com a avenida no ano de 1996 durante forte ressaca (GOBBI, 1997). A Figura 2 mostra parte da avenida atingida pela ressaca.



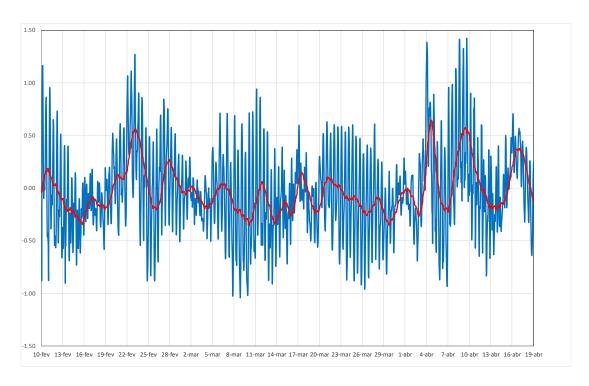
**Figura 2**. Local onde existia a avenida logo após a ressaca de julho de 1996. (Fonte: GOBBI, 1997)

Os problemas de erosão costeira na região persistem ao longo das décadas até os dias de hoje. A Figura 3 mostra uma reportagem que destaca

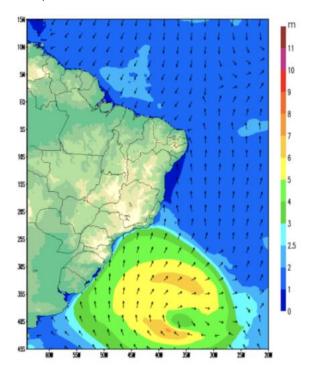
forte ressaca que impactou o litoral de Matinhos devido a fenômenos meteorológicos em abril de 2020. Dados de curva de maré medida na Ilha da Paz (748151.49E; 7099789.19S), no litoral norte de Santa Catarina, próxima a Matinhos (Figura 4), mostram a presença de uma elevação do nível médio do mar no mesmo período, decorrente do fenômeno conhecido como Super Lua (disco lunar aparenta ser 14% maior que o habitual) que ocorreu nesta data, associada a presença de um ciclone extratropical na costa (SIMEPAR, 2020). Trata-se, portanto, de um período de maré de sizígia, onde há máxima atração gravitacional e geração de marés com amplitudes elevadas, somando isso aos ventos fortes provenientes do ciclone extratropical (Figura 5), acaba-se por gerar grandes ondas,-provocando uma subida no nível do mar devido ao fenômeno conhecido por *wave-setup* e, por sua vez, invadem a orla.



**Figura 3.** Reportagem com a imagem da ressaca registrada em Matinhos no dia 08 de abril de 2020 publicada no portal G1. (Fonte: G1, Globo.com)



**Figura 4.** Curva de maré medida na 2901-Ilha da Paz (SFS), coordenadas: 748151.49E; 7099789.19S. O nível zero corresponde ao nível médio do mar na região. A diferença entre o zero e o nível médio diário é a maré meteorológica. Em vermelho, a média móvel com período de 24h. (Fonte: Epagri, 2020)



**Figura 5**. Altura significativa e direção das ondas – Modelo WWATCH/GLOBAL para às 21h do dia 08 de abril de 2020. (Fonte: SIMEPAR, CPTEC-INPE, 2020)

Segundo dados da Agência de Notícias do Paraná (AEN-PR, Governo do Estado) de fevereiro de 2020, hoje existem dez projetos prioritários para remodelar o litoral. A região de Matinhos será beneficiária do projeto denominado

"Engorda da Orla de Matinhos", o maior projeto de reurbanização do litoral. Essa reestruturação contará com áreas para contenção de ressacas, engorda da faixa de areia, proteção de erosão marinha, construção e revitalização de canais para evitar enchentes, paisagismo, preservação de vegetação, além de estruturas voltadas para o turismo, como quiosques e pistas para ciclovias e caminhadas. As obras de engenharia serão posicionadas na desembocadura do Rio Matinhos, no espigão ao norte da Praia Brava e nos *headlands* localizados nos balneários *Saint Etienne* e Riviera. Acredita-se que, com a implementação de estruturas semirrígidas para combate à erosão, será possível dobrar a faixa de areia no município. (AEN-PR, 2020)

Recentemente, em junho de 2021, segundo a própria AEN-PR, foi lançado o edital de licitação da primeira fase das obras de recuperação da orla de Matinhos, visando mitigar efeitos erosivos e controlar as cheias na região por meio de dois *headlands* e um espigão, etapa esta que revitalizará 6.3 quilômetros entre a Avenida Paraná e o balneário Flórida, com previsão de 32 meses para conclusão, após selecionados os responsáveis pela obra. A segunda fase revitalizará 1.7 quilômetros, entre os balneários Flórida e *Saint Etienne*; o custo total estimado para as duas etapas é de aproximadamente R\$502.6 milhões (AEN-PR, 2021).

# **4 REVISÃO DE LITERATURA**

No entendimento da dinâmica costeira, é necessário conhecer os parâmetros e investigar os forçantes responsáveis pela mobilização e transporte de sedimentos, permitindo definir as características morfológicas da praia.

# 4.1 EROSÃO COSTEIRA

Ao tratar da erosão da costa, é primordial a compreensão da variação de volume de sedimentos na praia, através do denominado balanço sedimentar. Quando o balanço sedimentar da praia é negativo, a praia perde mais sedimentos do que recebe, acarretando processos erosivos e, consequentemente, ocorre o recuo da linha da costa. Cerca de 70% das praias arenosas do planeta sofrem com erosão costeira. (BIRD, 2008)

Segundo o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC - § 3º do art. 10 da Lei nº 7.661/88), praia é uma área coberta e descoberta periodicamente pelas águas, acrescidas da faixa subsequente de material detrítico (areias, cascalhos, seixos e pedregulhos), até onde começa outro ecossistema.

A praia pode ser dividida em três regiões (Figura 6): antepraia inferior, antepraia superior e pós-praia. Na antepraia inferior estão presentes as zonas de arrebentação e de surfe, regiões de maior dissipação das ondas e de grande importância para investigações relacionadas ao potencial erosivo presente na linha de costa. Na antepraia superior, situa-se a zona de espraiamento, região esta que está alternadamente sendo coberta pela subida e descida das ondas. Já na região do pós-praia, na berma, é onde se vê o resultado desse dinamismo e a interação das demais zonas, pois é ali que ocorre avanço/recuo da faixa de areia. (ALBINO, 1999). Esta região costuma ser urbanizada e, nas tempestades, pode ser atingida pelas ondas, gerando problemas para a população que ali habita.

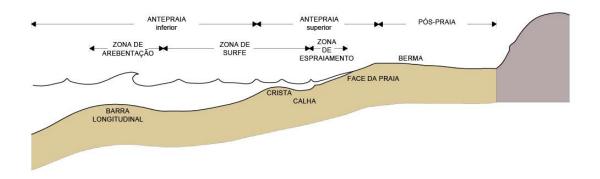


Figura 6. Diagrama geral do perfil de praia. (Adaptado de Albino, 1999)

As principais fontes de sedimentos de uma região praial são do material depositado por ondas, sedimentos de origem fluvial, de falésias e costões rochosos, das regiões de pós-praia e de regiões de dunas, além de alimentação artificial. Da mesma maneira que as ondas depositam esse sedimento, podem removê-lo, acentuando seu protagonismo nesse sistema. Além das ondas, correntes que atuam junto à costa, remoção de areia para construção civil e transporte de areia para o continente (dunas) têm um papel importante no déficit sedimentar (SOUSA, 2015). A Figura 7 ilustra as diferentes fontes de sedimento em um ambiente praial.

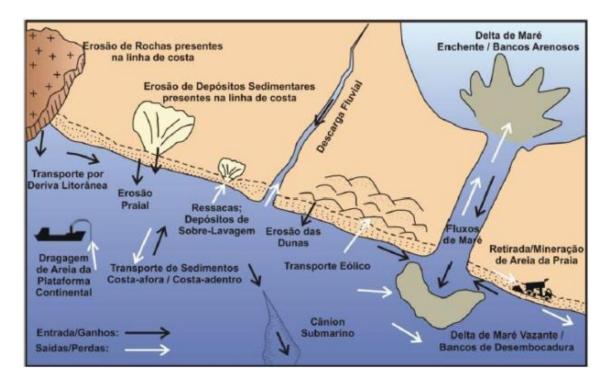


Figura 7. Diferentes fontes de sedimento em um ambiente praial. (SOUZA, 2009)

O movimento de sedimentos na região de praias é induzido por ondas e correntes, ocorrendo longitudinalmente e transversalmente à costa. A interrupção desse deslocamento sedimentar, seja pelas mais variadas causas, podem acelerar processos erosivos (ARAUJO, 2015 apud. USACE, 1984).

O transporte transversal, capaz de movimentar grande quantidade de sedimento, ocorre no sentido oceano-continente e continente-oceano, tendo um balanço final quase nulo, variando com as estações do ano e suas particularidades. No inverno do litoral paranaense, as ondas são mais enérgicas, consequentemente movimentam maior quantidade de sedimentos ao conflitarem com a costa íngreme, o que acaba por estreitar a faixa de areia da face da praia e criar bancos de areia no mar (off shore). No verão, esse sedimento removido pelas ondas invernais é empurrado novamente para a orla, dissipando os bancos de areia formados e engordando novamente a faixa de areia. Já o transporte longitudinal (longshore transport) se dá pelos sedimentos colocados em suspensão, resultante da liberação da energia de quebra das ondas na zona de surfe/arrebentação (região com correntes longitudinais) e de outras fontes (fluviais) (FONTOURA, 2004). Investigar os processos e trocas que ocorrem na arrebentação das ondas e a interação com correntes longitudinais são essenciais para qualquer avaliação de potencial erosivo de uma praia.

Diante disso, observa-se que eventos erosivos podem ocorrer naturalmente. Entretanto, perturbações antrópicas podem potencializar esses processos. Uma definição para o problema erosional, do ponto de vista de gestão costeira, é a existência de conflito de espaço, onde tem-se forçantes naturais que moldam a linha da costa (variação do nível do mar, balanço sedimentar e tempestades) (KOERNER et al. 2013) e encontram obstáculos impostos pelo homem, afetando diretamente esse ambiental praial.

Souza (2009) destaca que as causas naturais do aumento da erosão costeira são o crescimento do nível médio do mar durante o último século, aporte sedimentar ineficiente ou ausência de fonte de areia, intensificação de tempestades, amplas zonas de trânsito de sedimento e armadilhas de sedimentos (como ilhas). Ao mencionar causas antrópicas, se sobressaem retiradas de areia para atividades humanas, dragagens em canais de maré, conversão de terrenos naturais da planície costeira em áreas urbanas e

subsidência do solo. A combinação destes fatores pode trazer mudanças drásticas no balanço sedimentar, podendo prejudicar a biodiversidade, as ocupações no pós-praia, entre outras consequências, tornando-se essencial a busca por medidas mitigatórias.

Medidas que visam combater a erosão costeira dão-se de muitas formas, sejam estruturas que amortecem a passagem da onda entre a zona de arrebentação e de espraiamento dissipando sua energia e até mesmo por meio de alimentação artificial na orla praial. Além disso, existem soluções de caráter mais emergencial que são erguidas no pós-praia. As estruturas comumente utilizadas de engenharia costeira são a construção de enrocamentos, gabiões, espigões, quebra-mares e recifes artificiais nas diversas regiões da praia. Estas soluções não devem ser utilizadas sozinhas, combiná-las com alguma outra ou com alimentação artificial de areia aumenta as chances de sucesso. Existem, na literatura, relatos da eficácia desses projetos para combate ao problema erosivo. No entanto, se mal planejado, podem agravar a situação e gerar ainda mais prejuízos, como nos gabiões na Praia Central de Matinhos, no enrocamento no balneário Flamingo (GOBBI, 1997) e no muro de arrimo construído na Praia Mansa (FREIRE, 2011) onde, além de prejuízo financeiro com a destruição das estruturas, houve potencialização dos processos erosivos.

#### 4.2 ONDAS

Segundo Pedlosky (2003), onda é um sinal que se propaga movendo-se numa taxa distinta ao do movimento do meio. Existem basicamente três tipos de ondas: mecânicas, eletromagnéticas e de matéria. No presente trabalho, o foco serão as ondas do tipo mecânica, pois são as que existem em meios materiais, como a água.

Nas regiões costeiras, há interação das ondas com o fundo, consequentemente há transporte e deposição/remoção de sedimentos, podendo contribuir para erosão e, de maneira mais abrangente, agindo na morfodinâmica da costa (NIELSEN, 2009).

Existem várias classificações na literatura para as ondas oceânicas, mas a que é utilizada com maior frequência se baseia no período ou comprimento de

onda. A Tabela 1 mostra a classificação segundo o período e relaciona com suas forças restauradoras e geradoras, enquanto a Figura 8 exibe o espectro de energia das ondas oceânicas. É possível observar que ondas de gravidade, com período entre 1 e 20 segundos, geradas pelo vento têm grande potencial erosivo e são uma das principais responsáveis por mudanças na orla praial, devido à sua energia.

Tabela 1. Classificação das ondas oceânicas. (Adaptado de Toffoli & Bitner-Gregersen, 2017)

Classificação	Período	Forças Geradoras	Forças Restauradoras
Ondas Capilares	<0.1s	Vento	Tensão superficial
Onda Ultragravitacional	0.1 – 1s	Vento	Tensão superficial e Gravidade
Onda de Gravidade	1 – 20s	Vento e tempestades	Gravidade
Onda Infragravitacional	20s – 5min	Vento e gradiente de pressão atmosférica	Gravidade
Onda de Longo Período	5min – 12h	Pressão atmosférica e terremotos	Gravidade
Onda de Maré Astronômica	>12h	Atração gravitacional	Gravidade e Força de Coriolis
Ondas de Maré Meteorológica	3 dias	Fenômenos atmosféricos	Gravidade e Força de Coriolis

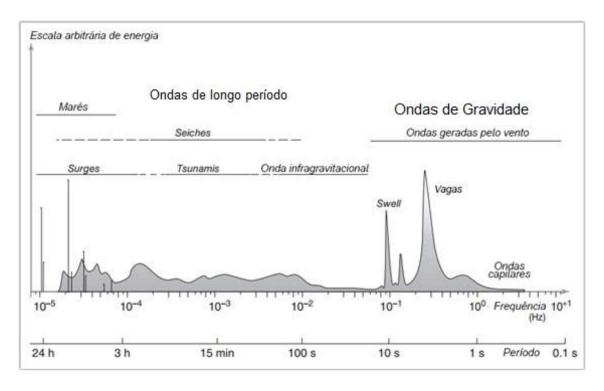


Figura 8. Espectro de energia das ondas oceânicas. (Adaptado de Houthuijsen, 2007)

Ondas geradas próximo à costa (sea ou vagas) e ondas geradas distante da costa (swell) definem o clima de ondas de uma região (HOULTHUIJSEN, 2007). Como observado na classificação das ondas oceânicas (Tabela 1) e no espectro de energia de ondas (Figura 8), swell e vagas diferem em seu período, com as vagas apresentando um período menor (frequência maior). Swell e vagas estão inseridas na faixa de período entre 1s até aproximadamente 30s (OLEINIK et al., 2016). As swell dependem de interações não-lineares, que só ocorrem quando há persistência e fetch (pista) para o vento. Swells têm forma bem definida e podem viajar por milhares de quilômetros.

Conforme descrito por Lima (2008) e Marone (2013), as principais causas que desencadeiam a erosão costeira no litoral do Paraná provêm de tempestades e/ou ressacas. Estes eventos trazem consigo o que se denomina estados extremos de *swell* ou de alta energia de ondas (MARONE, 2013), o que também é possível visualizar no espectro da Figura 8, onde nota-se como energia de ondas geradas pelo vento é significativa. Segundo Marone (2013), ciclones subtropicais são os fenômenos com maior contribuição para que haja incidência de ondas com grande potencial erosivo na costa paranaense, por isso a busca por previsões de ocorrência desses eventos meteorológicos é fundamental, podendo minimizar e evitar perdas físicas e econômicas.

Ondas do tipo vagas são predominantes na plataforma interna rasa do estado do Paraná (MARONE, 2013), entretanto, por serem produtos de ventos locais e não terem uma forma bem definida são dissipadas e possuem pouca energia (OLENIK *et al*, 2016).

#### 4.3 SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC)

O SMC é um sistema que agrega um extenso banco de dados de batimetria, além de várias ferramentas que permitem aplicar essas informações em ambientes costeiros. Segundo dados do IHCantábria, o SMC é utilizado em mais de 60 países, contando com mais de 1000 usuários na Espanha. Número expressivo de usuários, considerando que o sistema foi concebido na década de 90. O SMC-Brasil, versão adaptada do *software* espanhol para a costa brasileira, é dividido em duas ferramentas, o SMC-*Tools* e o SMC 3.0.

O SMC-Tools é subdividido em 3 módulos, sendo eles IH-DATA, IH-DYNAMICS e IH-AMEVA. O IH-DATA armazena as cartas náuticas da costa do Brasil (de onde provém os dados batimétricos), dados de nível do mar (maré astronômica e meteorológica) e dados de onda com séries de 1948 a 2008. No IH-AMEVA tratam-se os dados de onda, caracterizando-os por meio de estatísticas das variáveis ambientais e calcula-se o regime de ondas predominante na região; enquanto no IH-DYNAMICS são feitas as avaliações de cotas de inundação, transporte de sedimentos e fluxo médio de energia.

O SMC 3.0. ou somente SMC também é subdividido em 3 módulos: Curto Prazo (MOPLA e PETRA), Modelagem do Terreno (MMT) e Longo Prazo. Estes módulos têm como finalidade investigar a estabilidade da praia.

Para facilitar a visualização das divisões e subdivisões do SMC-Brasil, a Figura 9 ilustra, de maneira simplificada, as funcionalidades do modelo. Vale a ressalva de que, dentro de alguns destes módulos, existem submódulos que serão apresentados no próximo capítulo.

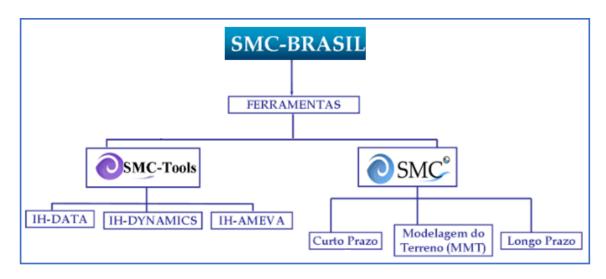


Figura 9. Estrutura dos modelos numéricos do SMC-Brasil. (Fonte: IHCantabria, 2020)

Gonzalez *et al.* (2007) desenvolveram um estudo mostrando as funcionalidades do SMC aplicado a costa espanhola, com o intuito de analisar a dinâmica da região e auxiliar em projetos de restauração, explorando o préprocessamento do sistema para curto e longo prazo, além do terreno costeiro.

Martinez (2011) utilizou o SMC para medir as mudanças da linha da costa na Baía de Concón (Chile). O litoral arenoso foi dividido em duas seções (Norte

e Sul) e aplicou-se o modelo de propagação de ondas para estudar a influência das ondas nas alterações na linha de costa. Para tal análise, utilizou-se a base de dados de 60 anos do modelo e trouxe como resultado taxas de recuo/avanço para as duas seções. Na seção Sul houve um recuo de 0.55m/ano e, ao norte, acúmulo de 0.39m/ano. Este trabalho demonstra como o SMC é uma ferramenta capaz de auxiliar no entendimento dos fatores que afetam a deposição/remoção de sedimento de uma região costeira.

Almeida *et al.* (2014), avaliaram o clima de ondas incidente via SMC-Brasil para a praia de Ponta Negra, na cidade de Natal, no estado do Rio Grande do Norte, nordeste brasileiro. Devido à falta de medições no país, os autores consideraram o SMC-Brasil um aliado para investigar e combater processos erosivos que assolam a costa, explicitando cada vez mais a capacidade do sistema como ferramenta de gestão.

Gomes & da Silva (2014) utilizaram o SMC-Brasil para um estudo de caso da costa brasileira, na praia de Candeias, no município de Recife, situada na região nordeste do Brasil, buscando entender as alterações na dinâmica dos sedimentos devido à presença de um quebra-mar e, ainda, compreender a contribuição dele nos processos erosivos no local. Além disso, Gomes & da Silva (2018) compararam os dados do SMC-Brasil com dados medidos em uma boia na região, concluindo que os valores medidos são compatíveis com o modelo, mas que, em alguns casos, há a necessidade da busca por mais dados na literatura e até mesmo medições *in situ* para minimizar o erro estatístico.

Gomes Junior (2015) utilizou o SMC-Brasil para compreensão do clima de ondas do litoral de Pernambuco, também na região da Praia de Candeias, como subsídio ao estudo da erosão costeira. Neste trabalho, o autor utilizou as ferramentas do SMC para inserir e modificar estruturas de engenharia costeira (quebra-mares) em três configurações diferentes, concluindo que o sistema foi de grande valia para o levantamento de dados (comparando com os dados medidos) e, devido à sua facilidade de uso por ser intuitivo, torna-o atraente para tomadas de decisão.

#### 4.4 RECIFES ARTIFICIAIS MULTIFUNCIONAIS

Habitat de espécies auxiliando na manutenção da biodiversidade, chamariz de turismo e proteção da retaguarda costeira são alguns dos benefícios proporcionados pelos recifes naturais em praias. Diante deste contexto, existem localidades que utilizam o denominado recife artificial multifuncional (RAM), que nada mais são do que estruturas submergidas propositadamente com a finalidade de simular um recife natural na busca da obtenção das vantagens que ele proporciona. Chama-se multifuncional justamente por ter inúmeras funções em uma única estrutura (LIMA, 2008)

No combate ao processo de erosão, os RAM's buscam alterar a batimetria local, favorecendo a dissipação da energia das ondas (principalmente geradas por tempestades/ressacas) antes de atingir a conta. Isso ocorre porque, ao modificar a batimetria e ao posicionar o recife na direção transversal predominante das ondas, favorece a refração, empinamento e quebra da onda nas proximidades da estrutura (LIMA, 2008). Essas estruturas também interferem nos padrões locais das correntes, modificando o transporte de sedimentos.

Os primeiros RAM's foram construídos em 1999 e 2000 na Austrália, respectivamente em Cable Station e Narrowneck (Gold Coast) (Figura 10). Logo após o sucesso desses projetos, onde houve também a engorda das praias e melhorias na condição de surfe, outros RAM foram implementados, como na Nova Zelândia (Mount Maunganui e Opunake) e na Inglaterra (Boscombe) (Figura 11) (SIMION & ESTEVES, 2010). O conceito de recife artificial para combate à erosão pode ser considerado novo, com pouca literatura sobre o tema.



Figura 10. Recife Artificial na praia de Narrowneck, Gold Coast – Australia.



Figura 11. Recife Artificial na praia de Boscombe, Inglaterra.

Nem sempre os RAM's são um sucesso, o que exprime as dificuldades na sua instalação e conservação. Por exemplo, em Mount Maunganui, na Nova Zelândia, houve ruptura de dois geotêxtis (material que envolvia sedimento da mesma granulometria da praia), necessitando de manutenção logo após sua instalação. Na praia de Dockweiler, na Califórnia – EUA, houve também a

implementação de um RAM em 2001, mas que foi removido em 2008 por não obter o resultado esperado (SIMION & ESTEVES, 2010).

A carta náutica do litoral paranaense (número 1820) mostra a presença de recifes artificiais próximos a Matinhos e a Praia de Leste, entretanto, foram posicionados com outra finalidade que não a de combater a erosão, uma vez que não estão conflitando com o sentido predominante das ondas e encontramse distantes da praia. Estes recifes fazem parte de um projeto desenvolvido pelo Centro de Estudos do Mar da UFPR, que objetivava favorecer a dinâmica das colonizações de peixes, a pesca recreacional, o turismo subaquático, além de produzir material didático para as escolas dos municípios. Concluiu-se que, estes recifes, formados por blocos de concreto, apresentavam maior concentração de peixes quando instalados entre as profundidades 15 e 18 metros. Foram feitos testes em zonas mais rasas e profundas, mas com menores taxas de colonização. (SIGAM/SIMA/CETESB, 2021).

#### **5 METODOLOGIA**

O SMC-Brasil é um sistema que permite investigar problemas na região costeira de forma sistemática. Neste trabalho, o SMC-Brasil é utilizado para compreender o clima de ondas predominante na região de Matinhos, comparando com dados da literatura e analisar, de forma simplificada, a influência que a implantação de um recife artificial multifuncional (RAM) pode ter no combate a erosão.

Para tanto, faz-se necessário definir o clima de ondas da região. O processo de geração da base de dados de ondas do SMC-Brasil é dividido em três etapas. A primeira etapa, a partir de uma reanálise global, possibilita simular numericamente condições das ondas na superfície dos oceanos baseado nos forçantes atmosféricos globais. Segundo o Documento Temático de Ondas do SMC-Brasil, malhas usadas na costa brasileira têm resolução de 0.25° e foram obtidas da base de dados "General Bathymetric Chart of the Oceans" (GEBCO), que é uma organização sem fins lucrativos, operada pela Organização Hidrográfica Internacional e a Comissão Oceanográfica Intergovernamental da Unesco, com objetivo de disponibilizar o conjunto de dados batimétricos dos oceanos com maior confiabilidade possível ao público em geral (MMA, 2018b).

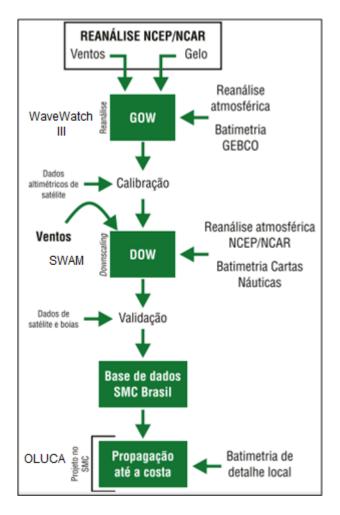
Na simulação numérica é utilizado o modelo *Wave Watch* III (*WWatch III*), que é a terceira versão do *WAVEWATCH*. O *WWatch III* combinou os dados de batimetria da base GEBCO e dados de reanálise NCEP/NCAR (conjunto de dados representativos da atmosfera terrestre de 1948 até o presente) para definir estados de mar para as zonas adjacentes ao Brasil. Essa reanálise foi denominada GOW (*Global Ocean Waves*) e foi calibrada e validada com dados de altimetria de satélites e validada também com dados de 21 boias distribuídas nos oceanos Pacífico, Atlântico e no mar do Caribe (REGUERO *et al.*, 2012).

Obtido um conjunto de séries horárias de estados de mar em cada um dos nós das malhas, chamados de GOW, busca-se compreender a dinâmica regional. A segunda etapa usa dados de vento, dados atmosféricos e batimetrias provenientes de cartas náuticas da costa brasileira. Utilizou-se o modelo de ondas espectral SWAN (Simulating Waves Nearshore) (BOOIJ et al., 1999)

alimentado com esses dados globais e regionais para se ter maior acurácia e resolução. As séries obtidas geradas foram denominadas DOW (*Downscaled Ocean Waves*).

Os dados regionais do *dowscaling* (pontos DOW) utilizados no SMC-Brasil foram validados a partir de medições provenientes de uma boia instrumental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em Tramandaí – RS e outra boia localizada a 35 km da costa da Ilha de Santa Catarina, do Programa de Informação Costeira *online* do Laboratório de Hidráulica Marítima da UFSC, além de dados extraídos de satélites (AVISO - Arquivamento, Validação e Interpretação de Dados Oceanográficos por Satélite) (MMA, 2018). Ademais, a metodologia usada no SMC-Brasil foi validada para a região do mediterrâneo para a versão espanhola do sistema, obtendo resultados satisfatórios.

As duas etapas já estão implementadas no SMC-Brasil (dados GOW, as simulações de estados de mar representativas e as funções de transferência), para serem usados em estudos na costa do Brasil. Para aplicá-los a uma determinada área de estudo, é necessário transferi-los com uma maior resolução espacial. A Figura 12 mostra os passos da metodologia para obtenção de dados de propagação de ondas do SMC-Brasil.



**Figura 12.** Metodologia para obtenção de dados de propagação de ondas (Fonte: Adaptado de MMA, 2018).

A última etapa metodológica diz respeito ao projeto do SMC-Brasil, onde descreve-se a região, por exemplo uma praia ou enseada, permitindo incorporar, se necessário, dados de batimetria local, provenientes de campanhas de medições para maior confiabilidade nas simulações (LABA & CUNHA, 2021). Essas simulações numéricas utilizam o modelo de propagação OLUCA.

O OLUCA considera os principais processos físicos relacionados à quebra da onda e sua propagação até a costa, inclusive os processos de refração e difração, que o *Wave Watch III* e o SWAN não resolvem. A utilização do OLUCA e o procedimento para investigar o clima de ondas para um determinado ponto no SMC-Brasil podem ser divididos também em três etapas:

- (1) Seleção da região e do ponto no SMC-Tools;
- (2) Definição da malha para cálculos de propagação dos casos escolhidos no SMC 3.0:

(3) Simulação dos casos selecionados e coleta dos *reports* (resultados) no SMC-*Tools* novamente.

# 5.1 SELEÇÃO DA REGIÃO - PRÉ PROCESSAMENTO

O SMC-*Tools* é uma ferramenta de pré-processamento, onde estão as bases de dados que servirão como características/variáveis iniciais das análises. Por isso a etapa 1 ocorre nesse ambiente, onde escolhe-se a região e faz-se um levantamento das ondas incidentes na costa pois, nas etapas seguintes, utilizase a onda que melhor representa o padrão local.

A seleção da região é feita utilizando o Explorador de Dados do SMC-Tools, onde é possível visualizar o mapa do Brasil e os pontos GOW e DOW na costa brasileira (Figura 13).

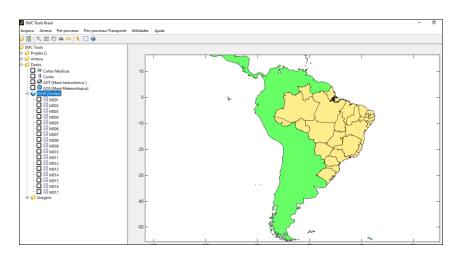


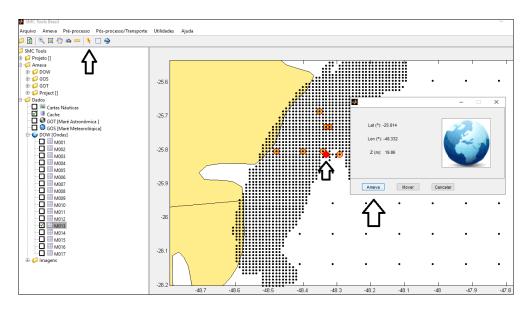
Figura 13. Explorador de Dados do SMC-Tools.

A série temporal de ondas faz parte do IH-DATA (módulo do SMC-*Tools*) e é possível obter dos pontos DOW's conforme descrito anteriormente. Essa série é importante para a definição do clima de ondas local para todos os estados de mar, incluindo eventos extremos.

Neste trabalho foram selecionados dois pontos DOW's. O primeiro ponto, denominado ponto P (fazendo alusão ao munício de Pontal de Paraná, local mais próximo ao ponto), foi escolhido para verificação e adequação do banco de dados do SMC-Brasil, uma vez que há informações sobre este ponto publicadas em Nemes & Marone (2013). O segundo ponto, chamado de ponto M (próximo

de Matinhos), foi selecionado para definir o estado de mar na região do balneário Flamingo. A Figura 14 mostra a localização do ponto M.

Para que se possa coletar, calcular e visualizar as características das ondas da região de interesse, é utilizado o módulo do *Tools* denominado IH-AMEVA, que significa "Análise Matemática Estatística de Variáveis Ambientais". No IH-AMEVA, o usuário tem acesso a informações de período, amplitude, frequência, direção, dados de marés e clima de ondas em regimes médios e extremos. A Figura 14 exprime a seleção dos vários pontos investigados para definição do padrão no litoral do Paraná. Em laranja, encontram-se todos os pontos DOW's calculados no IH-AMEVA, ou seja, foram coletadas todas as características já citadas para cada um destes pontos, conforme sugerido no Manual do SMC, para selecionar o que melhor representa o padrão da região e que minimiza a chance de erros de propagação pelo modelo. O ponto P foi definido exatamente na localização indicada em Nemes & Marone (2013).

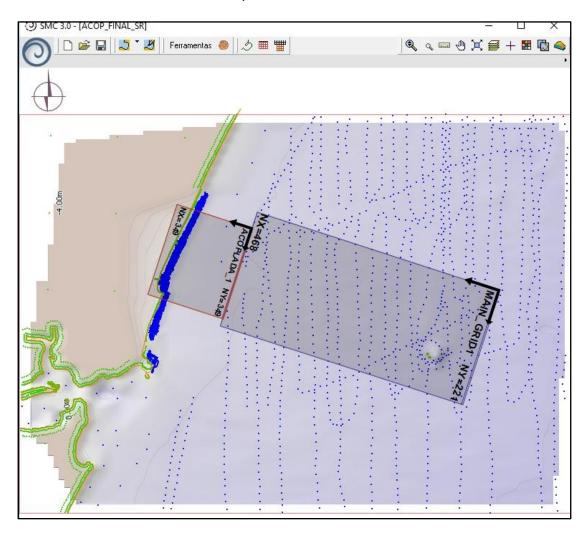


**Figura 14.** Pontos DOW calculados (laranja) e ponto M (vermelho) utilizado para propagação das ondas para a Praia Central de Matinhos.

# 5.2 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ATÉ A REGIÃO DA PRAIA

O SMC permite editar a batimetria, inserir estruturas de engenharia, propagar ondas ou espectro de ondas para uma determinada região de interesse. Para tanto, é necessário definir uma ou mais malhas e o sentido da propagação. A Figura 15 mostra as malhas definidas para a Praia Central de

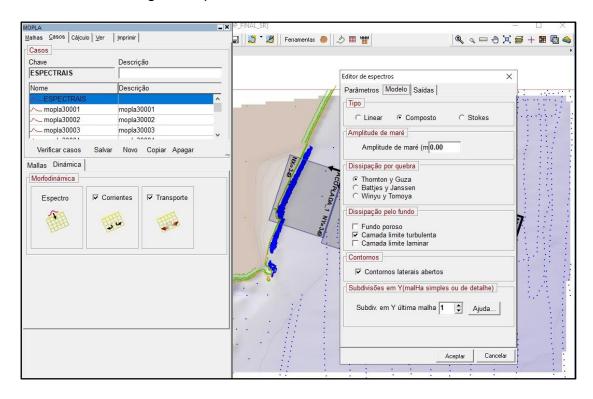
Matinhos neste trabalho. O banco de dados batimétrico utilizado pelo SMC-Brasil é advindo de cartas náuticas disponibilizados pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação). Para a região do ponto P, não houve criação de malha, apenas calculadas as características do ponto.



**Figura 15.** Malhas utilizadas para a propagação do trem de onda partindo do ponto M na região do balneário Flamingo.

Para desenvolvimento da malha é utilizado o programa MOPLA (Morfodinâmica de *Playas*). As malhas são desenvolvidas em diferenças finitas, sendo possível escolher o espaçamento. O Manual do SMC recomenda o espaçamento de 25m para o domínio definido (divisões nas direções x e y < 1000). Utilizar uma malha menor, mais próxima à região de interesse, permite uma resolução maior dos fenômenos que ali ocorrem e diminuindo o tempo de simulação, pois, apesar do detalhamento ser maior, a área da malha adjacente é menor, como visto na Figura 15.

No MOPLA encontra-se o modelo numérico espectral de propagação de ondas (OLUCA-SP), que permite propagar um trem de ondas e que foi utilizado neste trabalho para auxiliar na caracterização do estado de mar da região. O OLUCA-SP simula a transformação da onda em seu processo de propagação em profundidades indefinidas até a costa (Manual do Usuário do SMC-*Tools*) por meio de equações de balanço de quantidade movimento e fluxo de massa (GOMES JR., 2015). O modelo espectral utilizado foi do tipo composto, com dissipação por quebra usando o modelo Thornton&Guza, dissipação pelo fundo usando a camada limite turbulenta e com contornos laterais abertos (Figura 16). A seleção dos parâmetros para o modelo de propagação para a propagação do Ponto M são as sugeridas pelo manual.



**Figura 16.** Definição de casos no MOPLA para o Ponto M utilizando o modelo OLUCA-SP para propagação na malha criada.

Também é possível visualizar no MOPLA saídas espaciais usando o programa *Surfer* referente aos espectros, correntes e transportes.

Depois de executados os cálculos de propagação no MOPLA para o Ponto M, retorna-se ao SMC-*Tools* e é iniciada a última parte, a etapa 3, que é responsável por propagar os espectros de onda na direção escolhida a partir do ponto DOW selecionado, gerando os resultados para os diferentes estados de mar num intervalo máximo de 60 anos (1948 – 2008).

#### 5.3 SIMULAÇÃO DOS CASOS SELECIONADOS

Nesta etapa final, utilizam-se dois submódulos: o Pré-Processo e o Pós-Processo/Transporte (IH-*DYNAMICS*).

No que se refere ao submódulo de pré-processamento, é possível visualizar a malha definida anteriormente e a onda selecionada para propagação da etapa 2 (Figura 17), além de selecionar o número de casos e as várias direções presentes na região para mais investigações. Para o balneário Flamingo, o número de casos selecionados foi 9 e o intervalo das direções foi de 70º até 170º, baseado nas informações extraídas pelo IH-AMEVA na etapa 1.

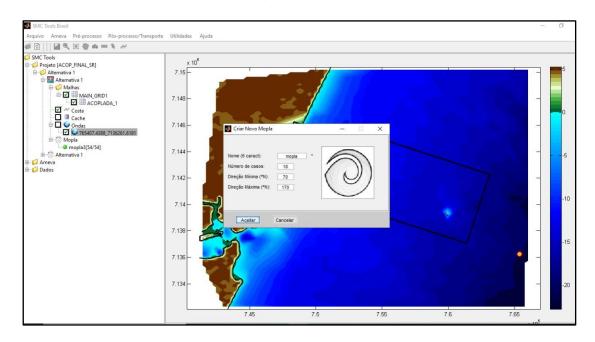
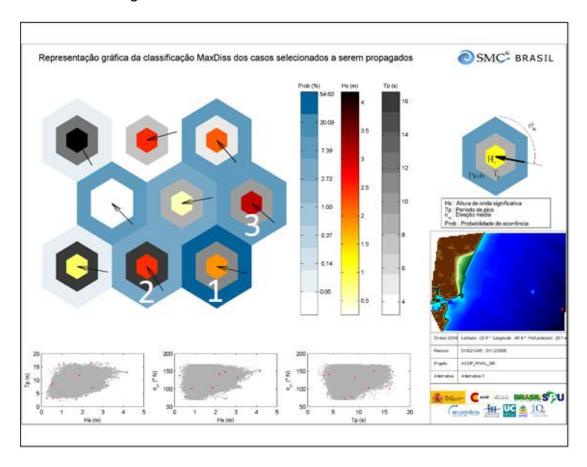


Figura 17. Criação dos casos propagados no MOPLA para a região do balneário Flamingo.

Após este procedimento, são criados os casos que serão tratados no submódulo de Pós-Processo/Transporte; esses casos foram propagados do ponto DOW selecionado (no caso, Ponto M) até a região próxima à praia para diferentes estados de mar (ALMEIDA, 2014). Os casos são definidos utilizando uma técnica chamada de Máxima Dissimilaridade (MaxDiss), necessário devido ao tamanho da base de dados do SMC (pouco maior que 60 anos). MaxDiss define os casos com maior representatividade para o ponto DOW escolhido (GOMES JR., 2015). O algoritmo de Máxima Dissimilaridade busca grupos de dados com maior diferença entre um conjunto e é utiliza com sucesso para classificar estados de mar (CAMUS, 2018; MMA, 2018b). A Figura 18 mostra

casos propagados classificados por Máxima Dissimilaridade para o Ponto M no balneário Flamingo.



**Figura 18.** Representação gráfica dos casos propagados classificados por Máxima Dissimilaridade para o Ponto M na Praia Central de Matinhos.

Na representação gráfica dos casos propagados, temos 9 hexágonos que representam cada caso. Cada um destes hexágonos possui mais dois anéis internos. A parte mais externa, representa a probabilidade de ocorrência, onde o azul mais escuro representa a maior probabilidade. O anel intermediário diz respeito ao período (escala de cinza) e o interno, refere-se a altura significativa das ondas, Hs (escala de vermelho) e a seta indica a direção predominante da onda (LABA & CUNHA, 2021). Os casos relevantes para a presente investigação foram: o caso 1, que exprime o estado de mar padrão para a Praia Central de Matinhos (maior probabilidade), o caso 2, com maior potencial erosivo (maior período) e o caso 3, com a maior altura significativa das ondas.

Quando a simulação é concluída, são gerados informes (*reports*), mostrando os pontos possíveis de arrebentação, o sentido do transporte de sedimentos e os fluxos de energia. A Figura 19 mostra as opções de saída

oferecidas no pós-processamento dos casos. Assim, o clima de onda pode ser usado em estudos na região próxima à praia.

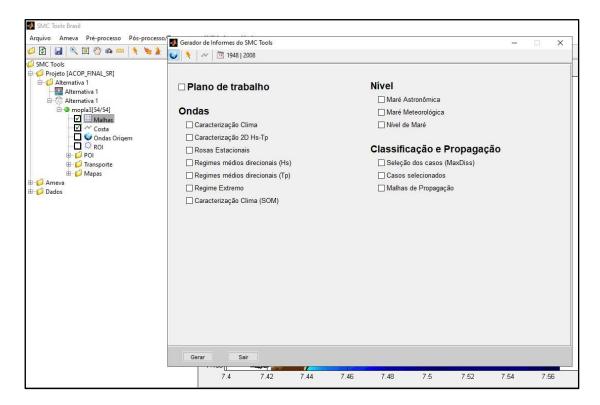


Figura 19. Opções de reports do SMC-Tools após conclusão da terceira etapa.

Para investigação dos processos erosivos envolvidos, foram utilizadas as ferramentas de Avaliação da Arrebentação das Ondas e Cálculo de Transporte de Sedimento do SMC-*Tools*. O sistema permite reconstruir os perfis de praia, determinando os locais onde ocorrem as quebras de ondas. Ainda, é possível calcular também cotas de inundação e sua influência na erosão costeira do local, além de permitir inserção de estruturas de engenharia que visam a proteção da praia.

#### 5.4 PÓS-PROCESSAMENTO

A ferramenta Pós-Processo do SMC-Tools permite uma análise mais aprofundada do domínio estudado. Com ele, podem-se definir "Pontos de Controle/Interesse" (POI's), onde é possível calcular o fluxo de energia sobre o ponto criado, possibilitando investigar a influência das propagações da onda em

um local específico. Com estes pontos, pode-se comparar, por exemplo, o impacto de uma estrutura de engenharia instalada na região.

Além do POI, outra funcionalidade importante é a criação de perfis ao longo da costa para verificação das cotas de inundação (CI). A cota de inundação é determinada pela soma do nível de referência (NR), a maré astronômica (MA), maré meteorológica (MM) e o *runup* (RU) (Figura 20). Para que a cota de inundação tenha como referência o nível médio do mar, os valores obtidos pelo SMC-Brasil serão subtraídos de 0.8m, que corresponde à cota do nível de redução das cartas náuticas na região, referência usada pelo SMC. Os resultados obtidos para as cotas de inundação são calculados para os perfis prédefinidos neste trabalho.

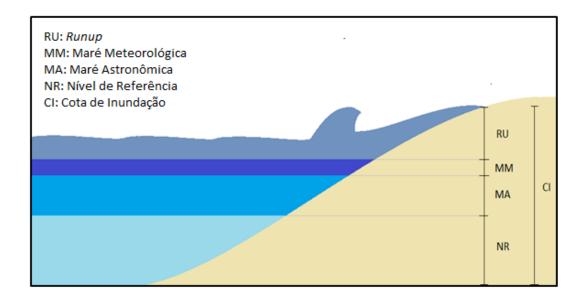


Figura 20. Esquema utilizado pelo SMC para definir cotas de inundação. (Fonte: BRASIL, 2017f)

No cálculo da cota de inundação, é necessário determinar o *runup*, no perfil. A metodologia para o cálculo do *runup*, utilizada no SMC, usa a formulação de Nielsen e Haslow (1991), calculando o *runup* significativo (Rs), *runup* médio (Rm) e o *runup* superado em 2% dos casos (R2%), sendo esse último, o valor do *runup* usado para determinar a cota de inundação. As equações (1), (2) e (3) mostram a metodologia usada.

$$Rs = z$$
 (1)

$$R_{2\%} = 1.98z$$
 (2)

$$R_{\rm m} = 0.98z \tag{3}$$

Onde z é obtido por:

$$z = \begin{cases} 0.47 (H_b L_0)^{0.5} tan\beta & \text{se} \quad tan\beta > 0.1 \\ 0.04 (H_b L_0)^{0.5} & tan\beta < 0.1 \end{cases}$$

onde  $H_b$  é a altura significativa de onda na quebra (m),  $L_0$  é o comprimento de onda em profundidades indefinidas (m) e  $tan\beta$  é a declividade da praia. Considerando que os níveis médios da maré astronômica (MA) e da maré meteorológica (MM) não são alterados pelas modificações antrópicas, a cota de inundação (CI) é função direta do runup (RU), que depende da altura de onda na quebra. Sendo assim, é necessário calcular o runup para determinar as cotas de inundação, fundamentais para as análises feitas neste trabalho. Após concluídas as análises, é possível coletar os resultados através do Gerador de Informes (reports) (Figura 21).

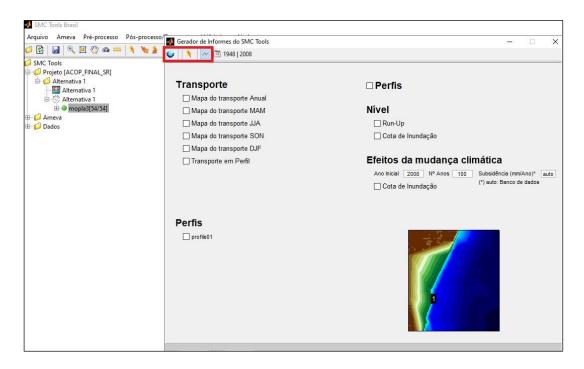


Figura 21. Em vermelho, botões de pré-processamento e pós-processamento do SMC-Tools.

Para a simulação que considera o RAM, é necessário definir o local de instalação e as suas dimensões. Escolheu-se instalar em uma das áreas mais afetadas pelos processos erosivos, localizado nas coordenadas médias 747636.5E e 7142404.5S, à 200 metros da costa, com formato retangular: 100 metros de comprimento e 70 metros de largura. As dimensões e a localização do RAM foram definidas usando como base o trabalho de Porto Lima, 2008. Porto Lima, 2008 estudo a colocação de um RAM na Praia Brava de Matinhos

utilizando os modelos *Wind Wave Model* e SWAN, objetivando a dissipação teórica da energia das ondas e consequentemente a diminuição dos processos erosivos da região. A altura do RAM para o balneário Flamingo foi definida considerando a batimetria local, em relação ao nível médio do mar. Sua orientação se dá perpendicularmente a direção predominante das ondas de maior período e altura, mas que também contempla quase todo o espectro de direções presentes no local. Além da inserção do RAM, também foram definidos perfis para analisar os processos que ocorrem no ponto em que o recife se encontra e em sua vizinhança. Ao todo, foram definidos 5 perfis: um no Pico de Matinhos (perfil 1) e os demais ao norte, sendo o perfil 2 a localização do RAM. A localização dos 5 perfis e do RAM é mostrada na Figura 22.

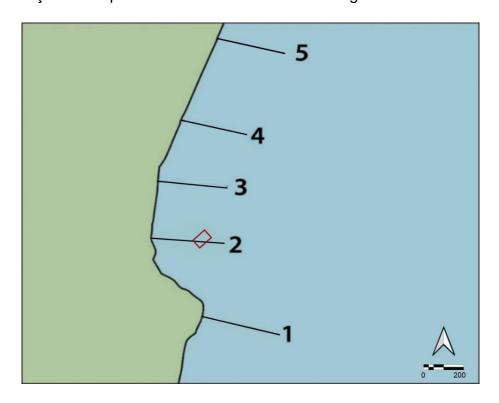


Figura 22. Perfis investigados e localização do RAM.

#### **6 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

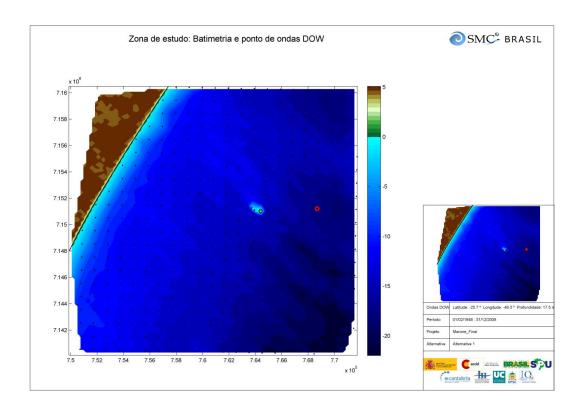
O Sistema de Modelagem Costeira (SMC) fornece ondas na região costeira adjacente, os pontos DOW, e caracteriza os estados de mar locais conforme descrito no capítulo anterior. Neste sentido, é mostrado inicialmente a avaliação do clima de ondas da região estudada.

#### 6.1 AVALIAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS

Considerando que os dados regionais do *dowscaling* (pontos DOW) utilizados no SMC-Brasil já foram validados, é possível verificar a adequação do banco de dados de ondas dos pontos DOW do SMC-Brasil e definir o estado de mar da região na costa paranaense. Para tal verificação, utilizou-se os dados calculados para o Ponto P pelo IH-AMEVA e comparou-se com os dados apresentados em Nemes & Marone (2013).

#### 6.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS COM DADOS MEDIDOS

Nemes & Marone (2013) mostraram uma avaliação do clima de ondas em um ponto localizado na latitude -25.733° e longitude -48.333° (mesma localização do Ponto P utilizado no SMC), a aproximadamente 14km da linha da costa e com uma profundidade entre 17 e 18 metros (no SMC a profundidade do Ponto P foi de 17.5m), com objetivo de compreender o clima de ondas do litoral do Paraná. Nemes & Marone (2013) utilizaram dados de ondas medidos em um correntômetro/ondógrafo eletromagnético S4 ADW InterOcean ao longo de 14 meses (Jul/2009 – Nov/2010). A localização do Ponto P é mostrada na Figura 23. É importante ressaltar que a análise feita no SMC usa um intervalo de 60 anos (1948-2008), enquanto os valores obtidos por Nemes & Marone (2013) foram coletados num intervalo de pouco mais de 1 ano (488 dias).



**Figura 23.** Localização do ponto P (vermelho) no SMC, utilizado na comparação com os dados medidos por Nemes & Marone (2013).

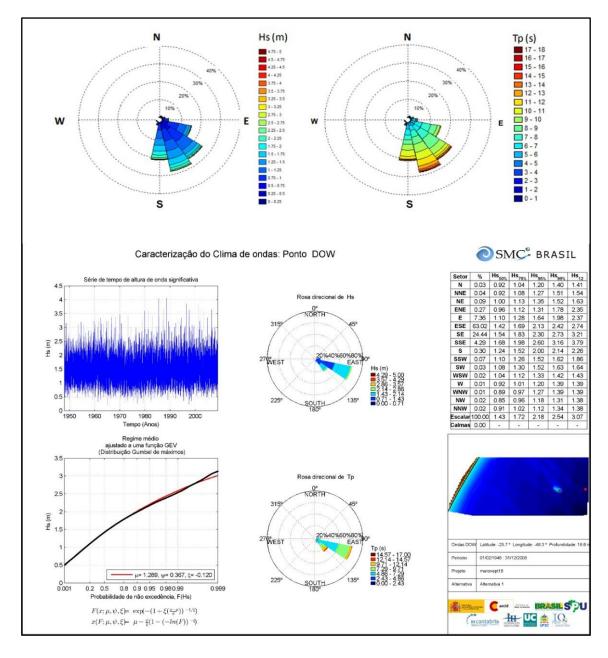
Nemes & Marone (2013) mencionam que durante o período considerado, ocorreu um número significativo de tempestades durante as medições, além do fato de que não houve medições entre 12 de março de 2010 a 06 de julho de 2010, o que pode justificar algumas diferenças presentes nas comparações, além da grande variação do tempo de amostragem entre o estudo e a análise realizada pelo SMC.

Os dados obtidos por Nemes & Marone (2013), apresentam como principais direções das ondas (superiores a 10%): SSE (28.22%), SE (25.17%), S (21.15%) e ESE (15.54%), bem como uma predominância no estado de mar do tipo vagas (62.76%) sobre o estado de *swell* (Figura 24).

Os resultados do SMC mostram que os períodos predominantes estão na faixa do estado de vagas e alturas significativas inferiores a 3 metros. Observamse também as direções predominantes são ESE (61.78%) e SE (25.16%). O estado de mar mais comum, segundo dados simulados no SMC, foi de ondas com períodos entre 4s - 7s (36.45%) e entre 7s - 10s (32.58%) e alturas entre 1.0 e 2.0 metros. Os percentis de alturas de onda significativa para o regime

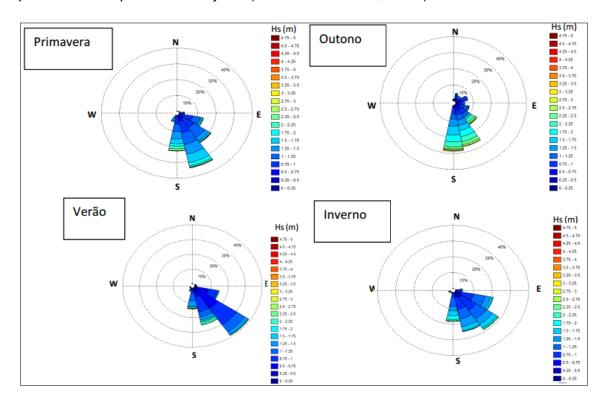
típico (Hs<sub>50%</sub>) é 1.44m e para o regime extremo de ondas (Hs<sub>12</sub>), 3.10m. Hs<sub>50%</sub> indica o comportamento das ondas médias da região de estudo, enquanto Hs<sub>12</sub> é um indicador associado às tempestades médias anuais.

Nos resultados de Nemes & Marone, 2013 é possível verificar a predominância de vagas, conforme descrito acima. Também é possível observar que as alturas significativas, em sua maioria, são inferiores a 3 metros. Características essas que coincidem com os resultados gerados pelo SMC (Figura 24).

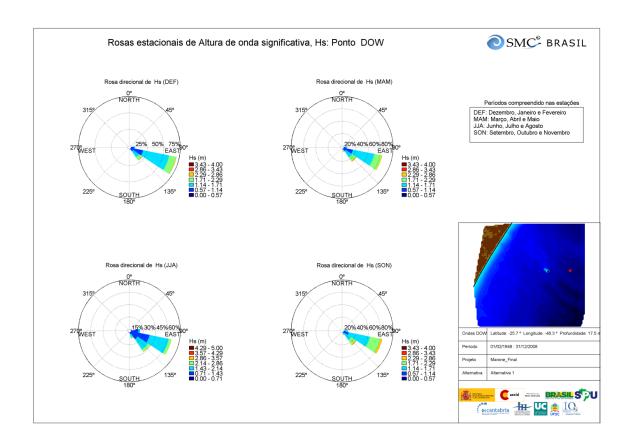


**Figura 24**. Distribuição da altura e período de onda por direção no intervalo de 09/07/2009 a 19/10/2010 (n=2389) no ponto P obtido por Nemes&Marone, 2013 (cima) e caracterização do clima de ondas do Ponto P obtido pelo SMC-Brasil. (Fonte: Nemes&Marone, 2013 e SMC-Brasil)

Nemes & Marone, 2013 concluíram que no outono e na primavera, as ondas têm caráter mais destrutivo, uma vez que, nessas épocas do ano, há um número maior de tempestades, acarretando ondas com maior altura e período mais longo (Figura 25). Os resultados obtidos pelo SMC-Brasil mostram que, entre os meses de março e maio (outono) e setembro e novembro (primavera), há um aumento na probabilidade de ondas de maior altura significativa, caracterizado pela influência que os fenômenos meteorológicos que ocorrem nesses períodos (Figura 26). Este resultado concorda com os dados medidos por Nemes & Marone (2013), explicitando os padrões de ondas presentes na costa paranaense ao longo do ano. É importante notar que as direções variam pouco no SMC, tendo em vista a base de dados de 60 anos. Há uma grande diferença no outono, mas que pode ser justificado pela estação estar entre os períodos com poucas medições (Nemes & Marone, 2013).



**Figura 25.** Altura Significativa (Hs) por estações do ano para o Ponto P (Fonte: Nemes & Marone, 2013).



**Figura 26**. Rosas direcionais de altura significativa, por estação do ano, gerados no SMC-Brasil para o Ponto P.

## 6.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ONDAS NAS PROXIMIDADES DA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS

Compreender o clima de ondas da região próxima a Praia Central é fundamental para definir a posição do RAM, pois ele deve estar orientado de modo a conflitar frontalmente com as ondas responsáveis pela erosão. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos pelo SMC para o Ponto M. Na região, a onda predominante é na direção ESE com 63.03% de probabilidade de incidência, com a altura para o regime extremo (H<sub>s12</sub>) igual a 2.85 m. No entanto, as maiores alturas para o regime extremo foram obtidas nas direções SE e SSE, 3.37 e 3.85 m, respectivamente, com probabilidade de incidência igual a 20.94%, para SE e 3.98%, para SSE. Os casos propagados foram apresentados no capítulo anterior, utilizando Máxima Dissimilaridade (MaxDiss).

Sendo assim, possivelmente o recife artificial será mais efetivo se contemplar as orientações SE e SSE, que caracterizam regimes extremos,

indicando influências meteorológicas, como tempestades. Pode-se observar a rosa direcional de Hs e de Tp para o ponto M na Figura 27 e considerando a Tabela 2, tem-se Hs superiores a 3.3m e períodos que ultrapassam os 13s, nas duas direções.

**Tabela 2.** Caracterização do clima de ondas: direção, altura para o regime extremo (Hs12 em metros), para o ponto M obtidas pelo SMC-Brasil para a Praia Central de Matinhos.

Setor	%	Hs <sub>50%</sub>	Hs <sub>75%</sub>	Hs <sub>95%</sub>	Hs <sub>99%</sub>	Hs <sub>12</sub>
N	0.03	1.04	1.17	1.34	1.64	1.65
NNE	0.05	1.02	1.22	1.63	1.71	1.72 1.80
NE	0.11	1.09	1.26	1.45	1.57	
ENE	0.36	1.01	1.18	1.43	1.95	2.55
E	10.96	1.20	1.41	1.81	2.17	2.52
ESE	63.03	1.49	1.77	2.21	2.51	2.85
SE	20.94	1.59	1.88	2.38	2.84	3.37
SSE	3.98	1.68	1.97	2.62	3.22	3.85
S	0.32	1.32	1.60	2.00	2.18	2.29
SSW	0.09	1.19	1.19 1.37	1.66 1.68	1.88 1.74	1.97 1.75
sw	0.04	1.15 1.3	1.36			
wsw	0.02	1.17	1.39	1.58	1.66	1.69
W	0.02	1.14	1.23	1.41	1.61	1.61
WNW	0.02	1.03	1.17	1.45	1.61	1.61
NW	0.02	1.01	1.10	1.35	1.60	1.60
NNW	0.02	1.01	1.17	1.34	1.46	1.60
Escalar	100.00	1.48	1.77	2.24	2.61	3.16
Calmas	0.00	-	-	-	-	-

Fonte: SMC-Tools

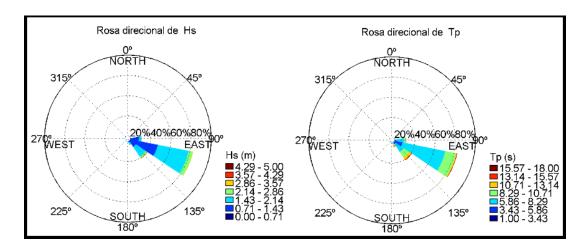


Figura 27. Rosas direcionais de Hs e de Tp para o Ponto M.

A distribuição Gumbel para os máximos, proveniente do ajuste da função generalizada de valores extremos (GEV com  $\gamma > 0$ ) de Hs e Tp (Figura 28) deixa claro que o regime de ondas no sentido SE e SSE apresenta pior ajuste para os

valores elevados de não excedência, o que pode ser justificado pelo fato de estar vinculado a regimes extremos. Sendo assim, a proposta deste trabalho é a colocação do RAM orientado nas direções SE e SSE, que apresentam também as maiores alturas significativas de ondas (Hs).

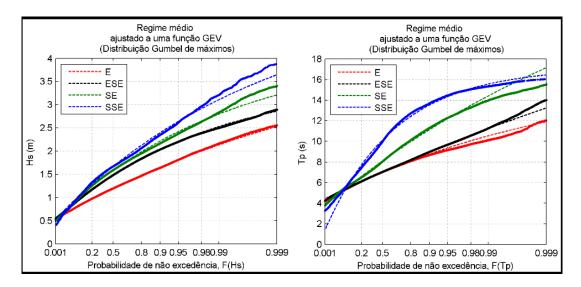
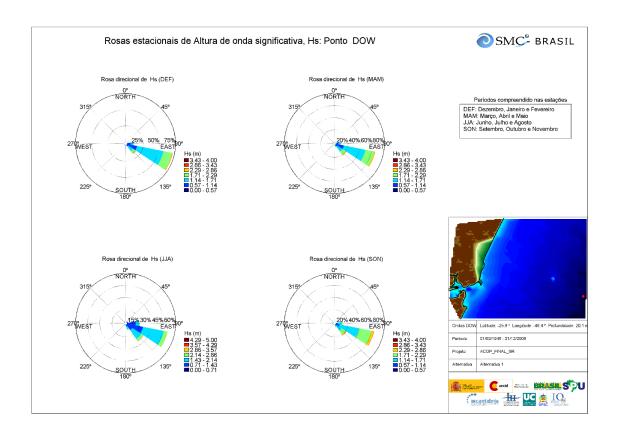


Figura 28. Probabilidade de não excedência de Hs e Tp para principais direções no ponto M.

O clima de ondas por estações do ano do Ponto M é semelhante ao observado para o ponto P (de Nemes & Marone), considerando que a distância entre eles, quando avaliados em escalas globais, é pequena (Figura 29).



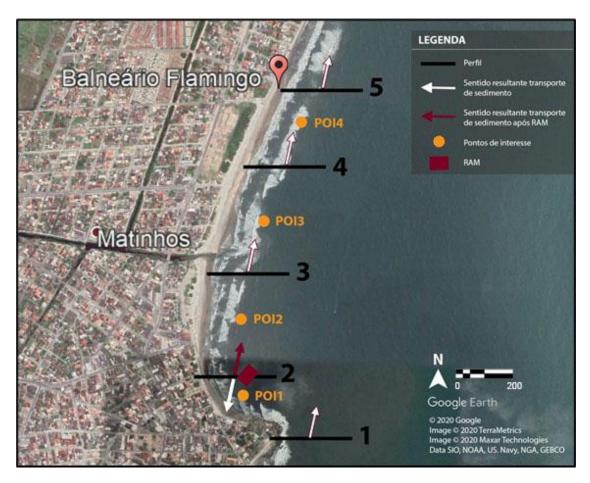
**Figura 29**. Rosas direcionais de altura significativa, por estação do ano, gerados no SMC-Brasil para o Ponto M, no balneário Flamingo.

#### 6.4 INFLUÊNCIA DO RAM NA PRAIA CENTRAL DE MATINHOS

Conforme dito anteriormente, foram definidos 5 perfis para avaliar as correntes, os fluxos de sedimentos e a localização da zona de arrebentação das ondas na região da Praia Central, para duas configurações: situação atual e considerando a presença do RAM (Figura 30). Para a localização dos perfis, considerou-se a região de interesse (mais impactada pela erosão) e sua vizinhança, de modo a permitir a análise a influência na costa como um todo. Investigar os parâmetros inicialmente mencionados nesses perfis são fundamentais para compreensão dos processos erosivos, uma vez que, ao tentar mitigar o efeito erosivo no local desejado com a instalação do RAM, podese gerar modificações nas proximidades.

A localização dos perfis, onde os resultados foram obtidos, pode ser observada na Figura 30, bem como os POI's, que são os pontos de interesse. O primeiro perfil encontra-se no Pico de Matinhos e o perfil mais distante, ao norte

do balneário Flamingo, próximo à Praia de Matinhos. O segundo perfil, na Praia Central, contempla o RAM e está posicionado em um dos locais que mais sofrem com a erosão. Os perfis 3 e 4 ainda contemplam o balneário Flamingo, mas visualizar o comportamento das correntes nesses locais tem grande utilidade, uma vez que estão na transição entre os balneários Flamingo e Riviera, que também enfrenta graves problemas erosivos.



**Figura 30**. Área investigada no SMC, com os 5 perfis, os pontos de interesse (POI) e localização do RAM, além dos sentidos do fluxo de sedimento, antes e depois da instalação do RAM.

Na região onde foi instalado o RAM, o SMC-Brasil realizou uma suavização na batimetria (Figura 31b), o que pode ser observado comparando os perfis com caso sem o RAM (Figura 31a). Existem outras regiões no balneário Flamingo que apresentam agravamento erosional, sendo o local um dos que mais sofre com o fenômeno no litoral paranaense. Este trabalho tem por objetivo estudar apenas a região próxima ao pico de Matinhos (perfil 2); no entanto, a metodologia desenvolvida neste trabalho pode ser aplica em outras regiões ao longo da costa.

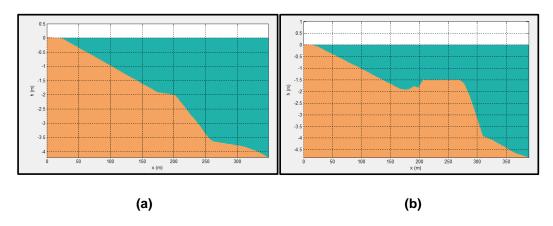


Figura 31. Perfil 2 sem (a) e com RAM (b).

Comparando os resultados das correntes na região, com e sem RAM, é possível observar a formação de zonas de recirculação. Com a implantação da estrutura, ocorre a formação de uma célula de recirculação após o RAM, no sentido da praia, alterando o fluxo resultante do transporte de sedimento, além de modificar a região onde ocorre a arrebentação, que passa a ocorrer no próprio RAM, dissipando parte da energia das ondas. (Figura 32)

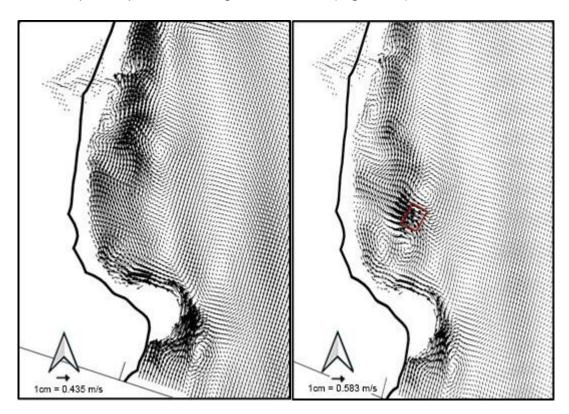


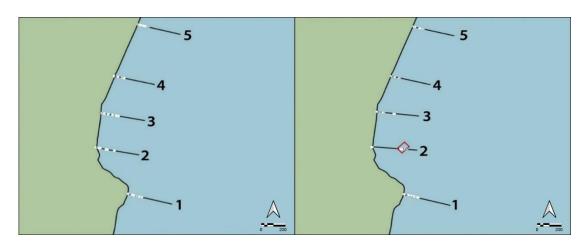
Figura 32. Padrão de correntes antes (esquerda) e após inserção do RAM (direita).

Observando os resultados obtidos, as correntes são, predominantemente, orientadas para norte, ou seja, o sentido do transporte de sedimentos também deve obedecer a essa direção. Com a instalação do recife artificial, nota-se a

formação de várias células de recirculação próximas à praia na região do Pico de Matinhos. No entanto, na região mais afastada em relação ao RAM, o transporte de sedimentos continua para norte, demonstrando que a instalação do RAM provoca um efeito local, não afetando a costa em toda sua extensão.

A Figura 30 mostra a localização dos perfis monitorados ao longo da costa e o sentido dos fluxos resultantes para o transporte dos sedimentos. É possível observar que o transporte de sedimentos acontece, majoritariamente, para o norte; no entanto, no perfil próximo ao Pico de Matinhos ocorre uma inversão do fluxo, possivelmente devido à presença das células de recirculação.

Em relação aos pontos prováveis de arrebentação, mostrados na Figura 33, o SMC-Brasil utiliza uma escala de cores (branco ao preto) para exprimir o local de maior probabilidade de quebra das ondas, com as bolas mais escuras representando maior probabilidade. Na situação sem RAM, observa-se que no perfil 2, a arrebentação ocorre bem próxima à costa. Isso se repete para os outros perfis; entretanto, existe mais de um ponto com probabilidade considerável e que estão relativamente distantes da orla (entre isobatimétricas de 3m – 4m), possivelmente o que se vê são duas arrebentações para dois estados de mar diferentes. Já após a instalação do RAM, no perfil 2, o ponto de arrebentação muda, ficando bem próxima ao RAM, acarretando num menor potencial erosivo, uma vez que boa parte da energia da onda é dissipada ali ao invés de próxima da praia. Os pontos prováveis de arrebentação nos perfis 3 e 4 sofrem alterações menos significativas, e nos perfis 1 e 5 não sofrem alterações. Estes resultados corroboram com as conclusões de que a instalação do RAM tem um efeito local, não modificando a vizinhança.



**Figura 33.** Zona de arrebentação sem RAM no perfil 2 (esquerda) e zona de arrebentação com RAM no perfil 2 (direita).

Foram definidos POI's (pontos de interesse) entre os perfis; nos POI's é possível investigar o fluxo médio de energia da onda (Figura 30). Lembrando que as posições escolhidas foram definidas de modo que os pontos estivessem entre a face da praia e o RAM, para que se possa verificar o efeito antes e depois da sua instalação. A Tabela 2 mostra uma comparação entre o fluxo média de energia nos POI's antes e depois da instalação do RAM.

Tabela 3. Fluxo médio de energia (FEM) dos POI.

#	SEM RAM	COM RAM		
Pontos de Interesse	FEM (*10⁴ J/ms)	FEM (*10⁴ J/ms)		
POI 1	4.7	2.55		
POI 2	5.1	7.1		
POI 3	2.12	2.42		
POI 4	3.95	2.32		

Observando os resultados, é possível concluir que há alterações significativas no ponto 1 e ponto 2. A diminuição da energia no POI1 se dá, possivelmente, pelo fato da ocorrência das células recirculações nesta região, mantendo a predominância do transporte para o norte, o que justificaria o aumento do fluxo de energia no POI2. É importante notar também que a localização do POI2 está muito próxima ao novo local da arrebentação, o que também pode motivar o aumento no FEM. Vale lembrar que o valor para o Fluxo de Energia Médio que o SMC calcula, diz respeito ao local onde o ponto está situado.

Outro resultado possível é a determinação das Cotas de Inundação, baseado nas análises feitas ao longo de 60 anos (1948 – 2008). Observando os informes gerados pelo SMC-*Tools*, nota-se um aumento na CI para o perfil 2 (Figura 34). Para os demais perfis, a variação nas cotas foi irrisória, o que mais uma vez explicita o efeito local do RAM. É possível calcular as Cotas de Inundação para regimes extremos, com períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos. A Figura 35 e a Tabela 4 mostram os resultados. Para todos os periodos, ocorre uma aumento da cota de Inundação com a presença do RAM, no perfil 2.

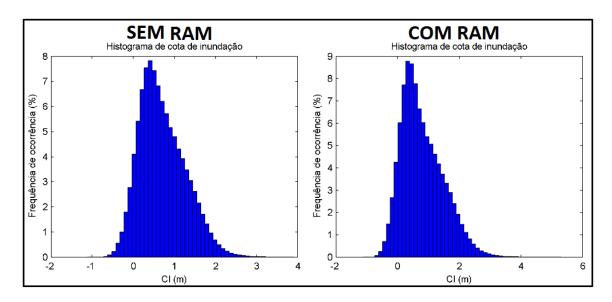


Figura 34. Histograma de CI para os casos sem e com RAM para o perfil 2.

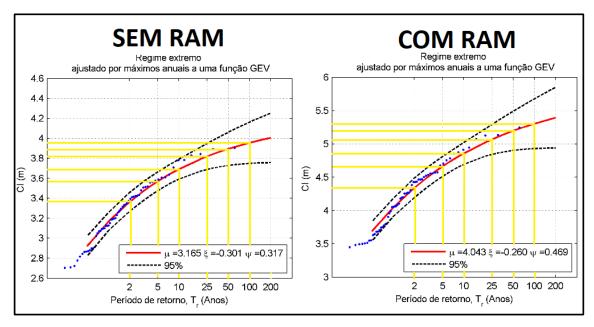


Figura 35. Período de retorno (Tr) para o perfil 2 para os casos sem RAM e com RAM.

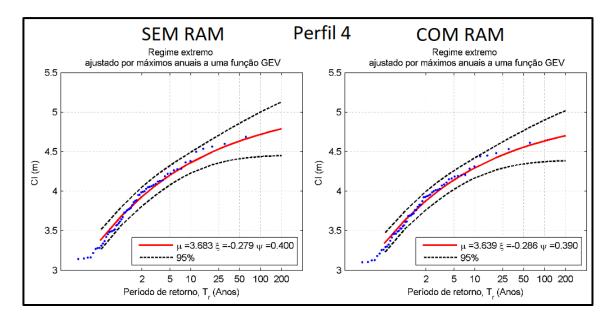
**Tabela 4.** Valores aproximados das CI menos o NR (0.8m) no perfil 2 sem e com RAM, para diferentes tempos de retorno.

Tr (Anos)	Sem RAM	Com RAM		
2	2.58m	3.55m		
5	2.78m	3.85m		
10	2.90m	4.00m		
25	3.02m	4.30m		
50	3.10m	4.40m		
100	3.15m	4.48m		

A cota de inundação é obtida somando a influência da maré astronômica, maré meteorológica e do *runup*. Como as cotas de MA e MM não são alteradas pela presença do RAM, é possível afirmar que a variação nas cotas de inundação é decorrente das variações no *runup*. Como o *runup* depende da altura da onda no momento da quebra, do seu comprimento e da declividade da praia, a presença do RAM altera a altura e posição da arrebentação da onda, o que pode justificar o aumento na cota de inundação após a instalação do RAM. Esse comportamento é observado na Figura 33 onde, após a inserção do RAM (perfil 2), o local de arrebentação passa a ocorrer sobre ele, o que ocasiona num aumento da cota de inundação.

Apesar de ocorrer este aumento na cota de inundação, as ondas quebrarão mais distantes com a inserção do RAM, dissipando sua energia muito antes de atingir a praia, o que pode ocasionar uma diminuição do potencial erosivo no local.

Observando as cotas de inundação dos perfis vizinhos, perfis estes que não são influenciados pela instalação do RAM (Figura 36) é possível observar que como não houve alteração no *runup*, consequentemente, as suas cotas de inundação não são alteradas, comprovando mais uma vez o efeito local da estrutura.



**Figura 36.** Cota de Inundação para o perfil 4 antes e depois da instalação do RAM. A CI praticamente não varia.

#### 7 CONCLUSÃO

O SMC-Brasil se mostrou um sistema amigável, de fácil uso e apresenta uma documentação bastante completa, sendo fundamental nas análises desenvolvidas neste trabalho. Além disso, destaca-se o baixo tempo de processamento para a realização das simulações, o que permite fazer vários testes e obter resultados rapidamente.

Em relação à definição do clima de ondas para o litoral do Paraná, os resultados obtidos podem ser considerados satisfatórios; as direções das ondas, provenientes dos dados de reanálise e da base de dados do SMC-Brasil, estão em conformidade com as direções presentes na literatura (GOBBI, 1997) e com medições realizadas no local (NEMES & MARONE, 2013). No entanto, a altura de onda apresentou divergência, o que pode ser explicado pelo tamanho da amostra: as medições foram coletadas durante 488 dias, enquanto o banco de dados do SMC equivale a 60 anos.

A definição das direções em conjunto com os regimes médios e extremos de maré, permitiu escolher a orientação mais adequada para o recife artificial multifuncional (RAM) e simular as alterações que a instalação RAM traria (correntes, cotas de inundação e zona de arrebentação), mostrando que haveria efetividade no combate ao problema erosional localmente, uma vez que as ondas passariam a dissipar sua energia mais distantes da praia e formaria células de recirculação de correntes, o que possivelmente traria mudanças no transporte de sedimentos

Levando em consideração o fácil uso, a velocidade de processamento e a confiabilidade das informações geradas, o SMC-Brasil é uma ferramenta poderosa para analisar um sistema costeiro de maneira preliminar, até porque permite a inserção de dados medidos dentro da própria base de dados do software.

É fundamental ressaltar que este trabalho se trata de um exercício acadêmico, em que várias simplificações foram consideradas, como a suavização da batimetria e ainda, apenas uma configuração para o RAM foi testada, sendo necessário análises mais aprofundadas e diferentes

cenários/posições para garantir o quão benéfico seria a instalação de um RAM na Praia Central de Matinhos, principalmente no que diz respeito aos cálculos de transporte de sedimentos. Recomenda-se, para estudos futuros, utilizar dados medidos (batimetria e direção de ondas) para aumentar a precisão dos resultados obtidos, além de mais informações relacionadas à fenômenos meteorológicos em escalas temporais distintas, como *El niño* e *La niña*.

#### **8 REFERÊNCIAS**

AEN-PR (Agência de Notícias do Paraná). **Dez projetos que vão mudar o litoral do Paraná.** 

<a href="http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=105580&tit=Dez-projetos-do-Estado-que-vao-mudar-o-Litoral-do-Parana">http://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=105580&tit=Dez-projetos-do-Estado-que-vao-mudar-o-Litoral-do-Parana</a>. Acesso em 23 de abril de 2021.

AEN-PR (Agência de Notícias do Paraná). Governo lança edital de R\$ 377 milhões para primeira fase de revitalização da orla de Matinhos. <a href="https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=113262">https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=113262</a>. Acesso em 09 de julho de 2021.

ALBINO, J. Processos de sedimentação atual e morfodinâmica das praias de Bicanga à Povoação (ES). Tese de Doutorado em Ciências. Programa de Pós-Graduação em Geologia Sedimentar. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP). 178p. Agosto, 1999. São Paulo – SP.

ALMEIDA, L. R. Manual de Processamento SMC-Brasil. IDEMA-RN, 2014. ALMEIDA, L. R.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. Avaliação do clima de ondas da praia da ponta negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. Revista da gestão Costeira Integrada, v.15, p.135-151, 2014.

ARAÚJO, D.J.C. **Transporte longitudinal de sedimentos na zona costeira de Natal/RN.** 2015. 133f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

BIRD, E. **Coastal Geomorphology: an introduction.** John Wiley & Sons Ltd. 2ed. West Sussex, England. 2008.

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.c4, p.7649-7666, 1999.

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

CAMUS, P.; MENDEZ, F.J.; IZAGUIRRE, C.; REGUERO, B.G.; MEDINA, R. Statistical and dynamical downscaling to transfer wave climate to coastal areas. In: EGU GENERAL ASSEMBLY CONFERENCE, 2010, Vienna, Austria. 2010, v.12.

EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina. Banco de dados de variáveis ambientais de Santa Catarina. Florianópolis: Epagri, 2020. 20p. (Epagri, Documentos, 310)

FREIRE, L. F. Erosão Costeira: Alternativas de Proteção e Proposta de Solução – Matinhos, PR. Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia IEP e LACTEC. 2011.

FONTOURA, J.A.S. Hidrodinâmica costeira e quantificação do transporte longitudinal de sedimentos não coesivos na zona de surfe das praias adjacentes aos molhes da barra do Rio Grande, RS, Brasil. 2004. 281f. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

GOBBI, E. F. Gerenciamento Costeiro: Análise de Casos do Litoral do Paraná sob a Perspectiva da Engenharia Costeira. 1997. Tese (Doutorado)-Coordenação de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GOMES JUNIOR, G.D. Aprimoramento do clima de ondas do SMC como subsídio ao estudo da erosão no litoral de Pernambuco. 2015. 148f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

GOMES, G.; SILVA, A.C. Coastal erosion case at Candeias beach (NE – Brazil). Journal of Coastal Research, v.71, p30-40, 2014.

GOMES, G.; SILVA, A.C. Nearshore wave analysis in the Brazilian Northeast based on observations and numerical models. Journal of Operational Oceanography, v.11, p.44-53, 2018.

GONZALEZ, M. *et al.* **An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC.** Computer & Geosciences. Elsevier. v33. p916-931. 2007.

HOLTHUIJSEN, L.H., **Waves in Oceanic and Coastal Waters**, Cambridge University Press. Cambridge, 2007.

IH-Cantabria. **SMC-Brasil.** Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade de Cantábria, Espanha. Disponível em <a href="http://smcbrasil.ihcantabria.com/">http://smcbrasil.ihcantabria.com/</a> acessado em 27 de abril de 2020.

KOERNER, K.F; OLIVEIRA, U.R. GONÇALVES, G. Efeito de estruturas de contenção à erosão costeira sobre a linha de costa: Balneário Hermenegildo, Rio Grande do Sul, Brasil. Revista da Gestão Costeira Integrada v.13(4). P.457-471. 2013.

LABA, P. H.; CUNHA, C. de L. da N. **Avaliação do Clima de Ondas para o Litoral do Paraná**. 31º Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária. Curitiba-PR, 2021.

LIMA, Marcos G. P. Controle da erosão em praias arenosas pelo método de recifes submersos: praia Brava de Matinhos - PR. 2008. 81f. Dissertação (Mestrado em Sistemas Costeiros e Oceânicos) — Setor de Ciências da Terra, Centro de Estudos do Mar, Pós-graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2008.

MARTÍNEZ, C.; QUEZADA, M.; RUBIO, P. Historical changes in the shoreline and littoral processes on a headland bay beach in central Chile. Geomorphology, Elsevier. V.135, p80-96. 2011.

NEMES, D.D.; MARONE, E. Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do Estado do Paraná. Boletim Paranaense de Geociências. v. 68-69, 2013.

NIELSEN, P. Coastal and Estuarine Processes. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 29., World Scientific, Singapore. 2009.

NOVAK, L. P. Risco à Erosão Costeira na Orla dos Municípios de Matinhos e Pontal do Paraná-PR, Brasil. 2017. Dissertação (Mestrado), Coordenação de Pós-graduação, Universidade Federal do Paraná, Paraná.

OLENIK, H. P. et al. Simulação de Ondas Oceânicas na Costa Sul-Sudeste Brasileira para Análise do Potencial Energético. Instituto de Oceanografia – FURG. 2016.

PEDLOSKY, J. Waves in the ocean and atmosphere: introduction to wave dynamics. Springer Verlag. 2003

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.

SIGAM/SIMA/CETESB. Disponível em: <a href="https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/511/Documentos/APAM\_LN/APAMLN\_Recifes%20Artificiais.pdf">https://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam3/Repositorio/511/Documentos/APAM\_LN/APAMLN\_Recifes%20Artificiais.pdf</a>>. Acesso em: 26 abr. 2021.

SIMION, B. I; ESTEVES, L. S. Avaliação Qualitativa do Desempenho dos Recifes Artificiais Multifuncionais (RAM). Revista de Gestão Costeira Integrada. Vol. 10, num. 1, pp. 127-145. Lisboa, Portugal. 2010.

SIMEPAR (Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná). Super Lua associado a ciclone extratropical no oceano fazem o mar invadir a orla do litoral do Paraná. <a href="http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/post/18290">http://www.simepar.br/prognozweb/simepar/post/18290</a>>. Acesso em 10 de maio de 2020.

SOUSA, P. H. G. O. **Erosão Costeira**. Gestão Costeira. Instituto Oceanógrafo da Universidade de São Paulo, IOUSP. 2015. Disponível em: <a href="http://www.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/50-portugues/publicacoes/series-divulgacao/gestao-costeira/823-erosao-costeira.html/">http://www.io.usp.br/index.php/infraestrutura/museu-oceanografico/50-portugues/publicacoes/series-divulgacao/gestao-costeira/823-erosao-costeira.html/</a>. Acesso em 07 de maio de 2020.

SOUZA, C.R de G. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. Revista de Gestão Costeira Integrada. n.9. p. 17-37. 2009a.

TOFFOLI, A.; BITNER-GREGERSEN, E. M. Types of Ocean Surface Waves, Wave Classification. Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering, 2017.

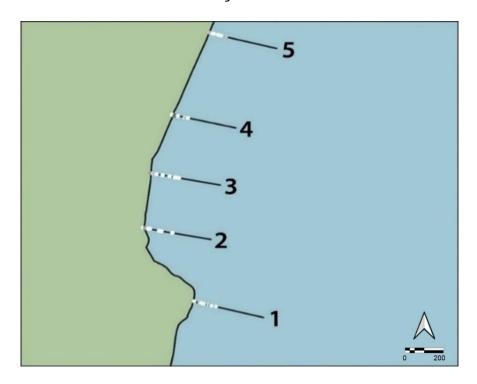
#### 9 ANEXOS

ANEXO 1 – TRABALHO APRESENTADO NO 31º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA (ABES), 2021.



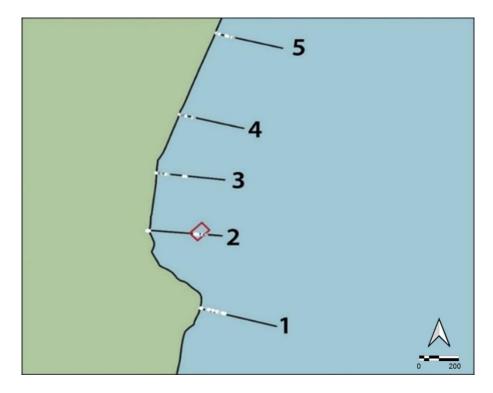
Fonte: O autor.

ANEXO 2 – ZONA DE ARREBENTAÇÃO SEM RAM



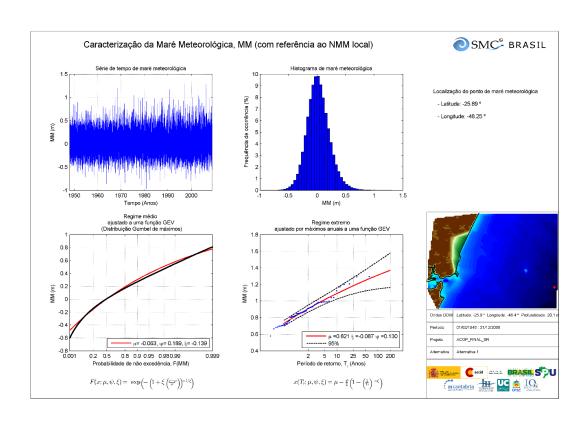
Fonte: O autor (adaptado de SMC-Tools)

ANEXO 3 – ZONA DE ARREBENTAÇÃO COM RAM

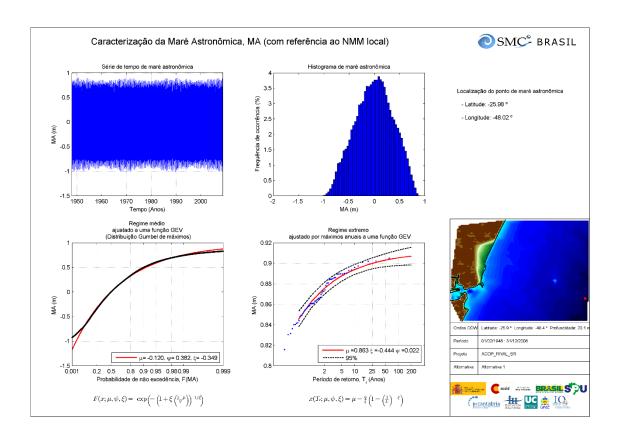


Fonte: O autor (adaptado de SMC-Tools)

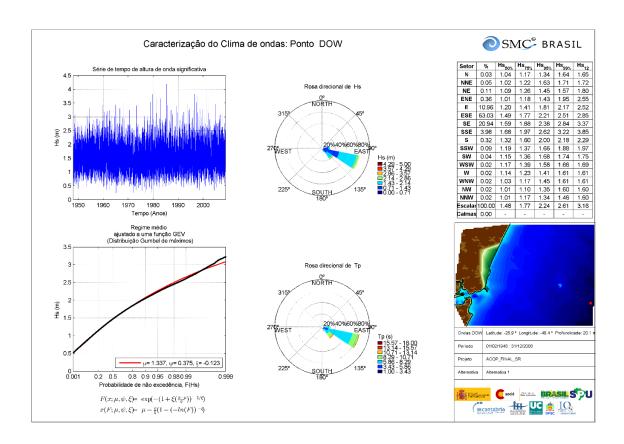
ANEXO 4 – CARACTERIZAÇÃO DA MARÉ METEOROLÓGICA



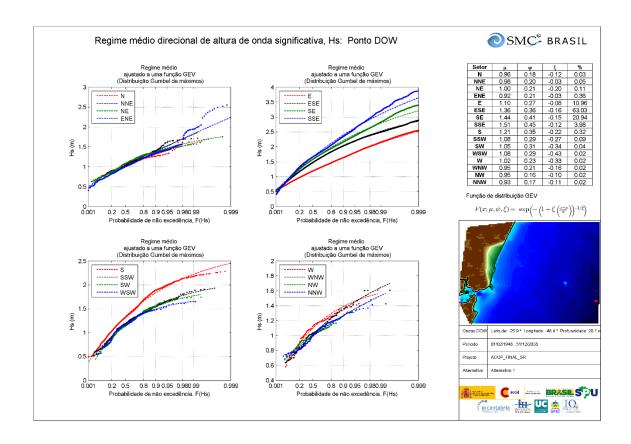
# ANEXO 5 – CARACTERIZAÇÃO DA MARÉ ASTRONÔMICA



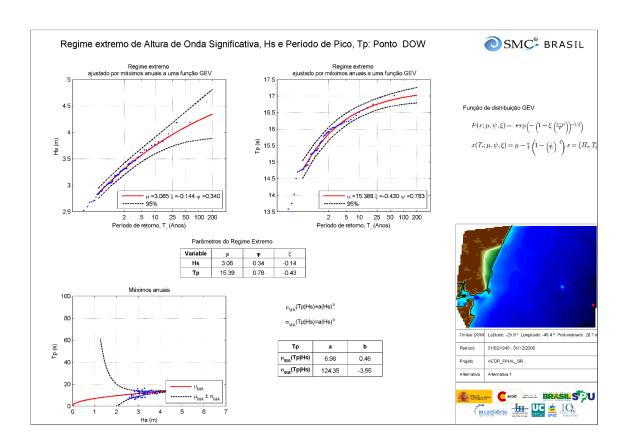
# ANEXO 6 – CARACTERIZAÇÃO CLIMA DE ONDA PONTO DOW



### ANEXO 7 – REGIME MÉDIO DIRECIONAL DE HS PARA O PONTO DOW



# ANEXO 8 – REGIME EXTREMO DE ALTURA DE ONDA SIGNIFICATIVA E PERÍODO DE PICO PARA O PONTO DOW SELECIONADO.



Fonte: SMC-Tools.

**ANEXO 9 - CASOS SELECIONADOS (MAXDISS)** 

# Lista de casos selecionados a serem propagados (1/1) caso Hs Tp Dir DirRel Prob (%) Propagado malha 1 malha 2 1 4 19 12 95 151 89 43 89 0 08 true MAIN GRIDADO CODIADA 1

caso	Hs	Тр	Dir	DirRel	Prob (%)	Propagado	malha 1	malha 2
1	4.19	12.95	151.69	-43.69	0.08	true	MAIN GRID1	ACOPLADA 1
2	0.25	3.22	138.15	-30.15	7.16	true	MAIN GRID1	COPLADA 1
3	0.85	16.00	101.36	6.64	0.04	true	MAIN GRID1	ACOPLADA 1
4	2.49	7.28	72.62	35.38	0.02	true	MAIN GRID1	COPLADA 1
5	1.76	10.02	168.88	-60.88	-	false	MAIN GRID1	COPLADA 1
6	0.53	8.63	78.22	29.78	3.50	true	MAIN GRID1	COPLADA 1
7	2.46	16.56	148.68	-40.68	2.90	true	MAIN GRID1	COPLADA 1
8	2.19	4.21	141.55	-33.55	14.58	true	MAIN GRID1	COPLADA 1
9	3.08	9.26	133.21	-25.21	12.17	true	MAIN GRID1	COPLADA 1
10	1.86	11.86	104.08	3.92	59.55	true	MAIN GRID1	ACOPLADA 1