

Charline Dalinghaus
Laura Ribas de Almeida
Mauricio González
Antonio Henrique da Fontoura Klein
Organização

sistema de
MODELAGEM COSTEIRA
DO BRASIL

estudos de caso



SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA DO BRASIL

estudos de caso

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Reitor

Ubaldo Cesar Balthazar

Vice-Reitora

Alacoque Lorenzini Erdmann

EDITORIA DA UFSC

Diretora Executiva

Gleisy R. B. Fachin

Conselho Editorial

Gleisy R. B. Fachin (Presidente)

Adriano Luiz Duarte

Aguinaldo Roberto Pinto

Carlos Luiz Cardoso

Eliete Cibele Cipriano Vaz

Ione Ribeiro Valle

Gestine Cássia Trindade

José Paulo Speck Pereira

Josimari Telino de Lacerda

Katia Jakovljevic Pudla Wagner

Luana Renostro Heinen

Luis Alberto Gómez

Mauri Furlan

Pedro Paulo de Andrade Júnior

Editora da UFSC

Campus Universitário – Trindade

Caixa Postal 476

88040-900 – Florianópolis-SC

Fone: (48) 3721-9408

editora@contato.ufsc.br

www.editora.ufsc.br

Charline Dalinghaus
Laura Ribas de Almeida
Mauricio González
Antonio Henrique da Fontoura Klein
Organização

SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA DO BRASIL

estudos de caso

Termo de Cooperação nº 02/2011 entre o governo brasileiro e a Universidade Federal de Santa Catarina. Projeto Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira. Financiado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Coordenação técnica:

Universidade Federal de Santa Catarina

Laboratório de Oceanografia Costeira

Ministério do Meio Ambiente

Coordenação-Geral de Gerenciamento Costeiro

Responsáveis técnicos:

Universidade Federal de Santa Catarina

Professor Antonio Henrique da Fontoura Klein (líder do projeto), *Charline Dalinghaus, Ana Paula da Silva*

Ministério do Meio Ambiente

Diego Pereira de Oliveira, Régis Pinto de Lima, Angelita de Souza Coelho, Rodrigo Cesar Azevedo Miguel

Revisores técnicos:

Ada Cristina Scudelari

Anderson Targino da Silva Ferreira

Jacqueline Albino

José Maria Landim Dominguez

Julio Tomás Aquije Chacaltana

Moyses Gonzalez Tessler

Paula Gomes da Silva

Pedro de Souza Pereira

Renê Jota Arruda de Macêdo

Rodrigo Barletta

Tais Kalil Rodrigues

Tiago Castro Alves Oliveira

Venerando Eustáquio Amaro

Coordenação editorial:

Flavia Vicenzi

Projeto gráfico, capa e editoração:

pamalero artes

Revisão:

Júlia Crochemore Restrepo

Catalogação na fonte pela Biblioteca Universitária da Universidade Federal de Santa Catarina

S623

Sistema de modelagem costeira do Brasil [recurso eletrônico] : estudos de caso / Charline Dalinghaus ...[et al.] organização. – Dados eletrônicos – Florianópolis : Editora da UFSC, 2018.

411 p. : ils., gráf., mapas

Inclui bibliografia.

E-book (PDF)

Disponível em: <<http://editora.ufsc.br/estante-aberta/>>

ISBN 978-85-328-0835-6

1. Oceanografia – Brasil. 2. Meio ambiente – Brasil.
3. Geociências. I. Dalinghaus, Charline.

CDU: 551.46(81)

Ficha catalográfica elaborada por Jonathas Troglion – CRB 14/1093



Este livro está sob a licença Creative Commons, que segue o princípio do acesso público à informação. O livro pode ser compartilhado desde que atribuídos os devidos créditos de autoria. Não é permitida nenhuma forma de alteração ou a sua utilização para fins comerciais.

br.creativecommons.org

SUMÁRIO

PREFÁCIO-----	7
CAPÍTULO 1	
Processos costeiros brasileiros: ventos, clima de ondas e nível do mar com base em reanálises de dados -----	11
CAPÍTULO 2	
O uso do SMC-Brasil como ferramenta de ensino de processos costeiros erosivos -----	65
CAPÍTULO 3	
Comparação de versões do SMC-Brasil no estudo da circulação hidrodinâmica na Praia de Soledade, litoral setentrional do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil-----	83
CAPÍTULO 4	
Método de identificação de áreas de inundação costeira por sobrelevação do nível do mar a eventos extremos, em escala local-----	109
CAPÍTULO 5	
Avaliação do clima de ondas e transporte sedimentar do litoral norte do município de Goiana (PE) utilizando o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) -----	127
CAPÍTULO 6	
Modelagem numérica da dinâmica costeira no litoral de Paulista (PE)-----	147
CAPÍTULO 7	
Estudo de caso de erosão costeira na Praia de Candeias (PE) -----	173

CAPÍTULO 8

Utilização do SMC-Brasil para simulação de um recife artificial multifuncional adequado para a prática do surfe e proteção costeira na Praia de Camburi, Vitória (ES) -----	193
---	-----

CAPÍTULO 9

Modelagem numérica da morfodinâmica de praias do Espírito Santo-----	219
--	-----

CAPÍTULO 10

Variabilidade praial nas praias do Lázaro, Domingas Dias e Sununga, litoral norte de São Paulo, relacionada à passagem dos sistemas frontais – Ubatuba (SP) -----	233
---	-----

CAPÍTULO 11

Potencialidades da utilização da ferramenta Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) no órgão estadual de meio ambiente de Santa Catarina -----	257
---	-----

CAPÍTULO 12

Modelagem dos processos morfodinâmicos da Praia de Perequê, Porto Belo (SC): determinação das causas de origem -----	273
--	-----

CAPÍTULO 13

Estudo da dinâmica costeira e modelo de funcionamento da região sul da Praia de Piçarras (SC)-----	297
--	-----

CAPÍTULO 14

Altura de ondas, <i>runup</i> e cota de inundação nas praias da Barra da Lagoa e Moçambique – Florianópolis (SC), com base em séries de dados de 60 anos de reanálise -----	327
---	-----

CAPÍTULO 15

Análise hidrodinâmica e de transporte de sedimentos para elaboração de alternativas de recuperação da Praia da Armação do Pântano do Sul – Florianópolis (SC)-----	351
--	-----

CAPÍTULO 16

Avaliação numérica do potencial hidrodinâmico e do transporte de sedimentos na Praia do Cassino e Molhe Oeste da Barra de Rio Grande (RS) -----	377
---	-----

Sobre os autores -----	401
------------------------	-----

PREFÁCIO

A zona costeira brasileira é uma região de alta densidade populacional, para a qual converge grande parte dos investimentos, das infraestruturas e do fluxo econômico preponderante no país. A vulnerabilidade natural da zona costeira, onde impactos se potencializam diante dos efeitos das mudanças do clima, é relevante para o bem-estar da população e para o crescimento econômico do país.

Cerca de 40% da costa brasileira tem problema de erosão. Seus efeitos mais significativos se dão nas regiões urbanizadas. Embora a urbanização em si não provoque erosão, as edificações e construções dentro da faixa de resposta da dinâmica da praia às tempestades tendem a ser retomadas pelo mar, tratando-se, portanto, de ocupações em área de risco de erosão e inundação.

De forma a mitigar esses efeitos, quando se trata da construção de obras de engenharia costeira e de sua interação com os instrumentos de gestão ambiental, é importante considerar que as intervenções costeiras devem sempre ser avaliadas sob a ótica da unidade fisiográfica em que se inserem. Obras isoladas em áreas costeiras devem ser evitadas, sendo necessário favorecer as ações conjuntas em unidades fisiográficas definidas em planos e projetos envolvendo União, estados e municípios, a exemplo do Projeto Orla, o qual estabeleceu uma faixa de gestão da zona costeira com a finalidade de identificar uma possível linha de segurança da costa. Este abrange as áreas de grande variação morfodinâmica (com tendências de transgressão ou regressão marinhas), cobrindo espaços de desequilíbrio em termos de processos morfogenéticos e hidrodinâmicos.

Em 2000, no I Simpósio Brasileiro sobre Praias Arenosas, bem como em 2008, no I Simpósio Nacional sobre Erosão Costeira, que reuniu academia e gestores, foi identificado como desafio vencer a falta de conhecimento sobre os processos costeiros que moldam a costa brasileira (ondas, marés, ventos, entre outros), permitindo uma melhor caracterização de fenômenos ou tendências erosivas ao longo do litoral. Também foi apontada a necessidade urgente de formar profissionais especializados em processos litorâneos e em obras e intervenções na costa, na perspectiva de qualificar os projetos de intervenção, melhorando assim o processo de tomada de decisão e assegurando a proteção da linha de costa.

No evento de 2008, foi apresentada a experiência da Espanha nas ações de gestão costeira para proteção da linha de costa, estruturadas a partir de um programa contínuo de formação e da instrumentalização para a tomada de decisão. Na Espanha, o “Modelo de ajuda para a gestão do litoral”, entre outros, inclui o Sistema de Modelado Costero (SMC), composto por um conjunto de metodologias e ferramentas que permite o estudo, o desenho e a elaboração de alternativas para projetos de engenharia costeira.

O processo de avaliação e de implementação de obras de recuperação da linha de costa espanhola utilizando o SMC acumula uma experiência de mais de 15 anos, graças à parceria entre o governo espanhol através do Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente e o Instituto Hidráulico da Universidade da Cantábria (IHC). O programa de gestão envolve a produção de conhecimento para a tomada de decisão, considerando a dinâmica natural, a gestão da costa e a gestão urbana. Esse processo

envolveu a reapropriação de áreas de domínio público e a indenização a particulares. A iniciativa foi uma resposta ao acelerado processo de urbanização experimentado pela Espanha nos anos 1970, que fundamentou a Lei da Costa em 1988. A estratégia foi a de atuar na gestão de conflitos no litoral, de forma a garantir a defesa da costa, dos *habitats* (fauna e flora) e da ocupação humana, além de atender às demandas de resoluções e às diretivas da União Europeia, a exemplo da gestão costeira integrada e, posteriormente, da avaliação de risco de inundação.

Motivados por essa experiência, em 2010, os governos brasileiro e espanhol estabeleceram o Acordo de Cooperação Técnica, Científica e Tecnológica, para executar o projeto Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira entre a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), com a participação do Ministério do Meio Ambiente, através da Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável (MMA/SEDR), da Secretaria do Patrimônio da União e do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (SPU/MP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), da Universidade de São Paulo (USP), da Universidade da Cantábria (UC-IHC/Espanha) e do Instituto Ambiental Brasil Sustentável (IABS). O objetivo era contribuir para a melhoria da gestão de implementação de obras costeiras no Brasil, a partir de insumos que incentivasse o entendimento e a proposição de soluções a problemas de erosão costeira e a seus impactos ambientais, que levariam a promover a recuperação da funcionalidade dos espaços públicos já ocupados, protegendo as populações em áreas de risco.

O PROJETO SMC-BRASIL

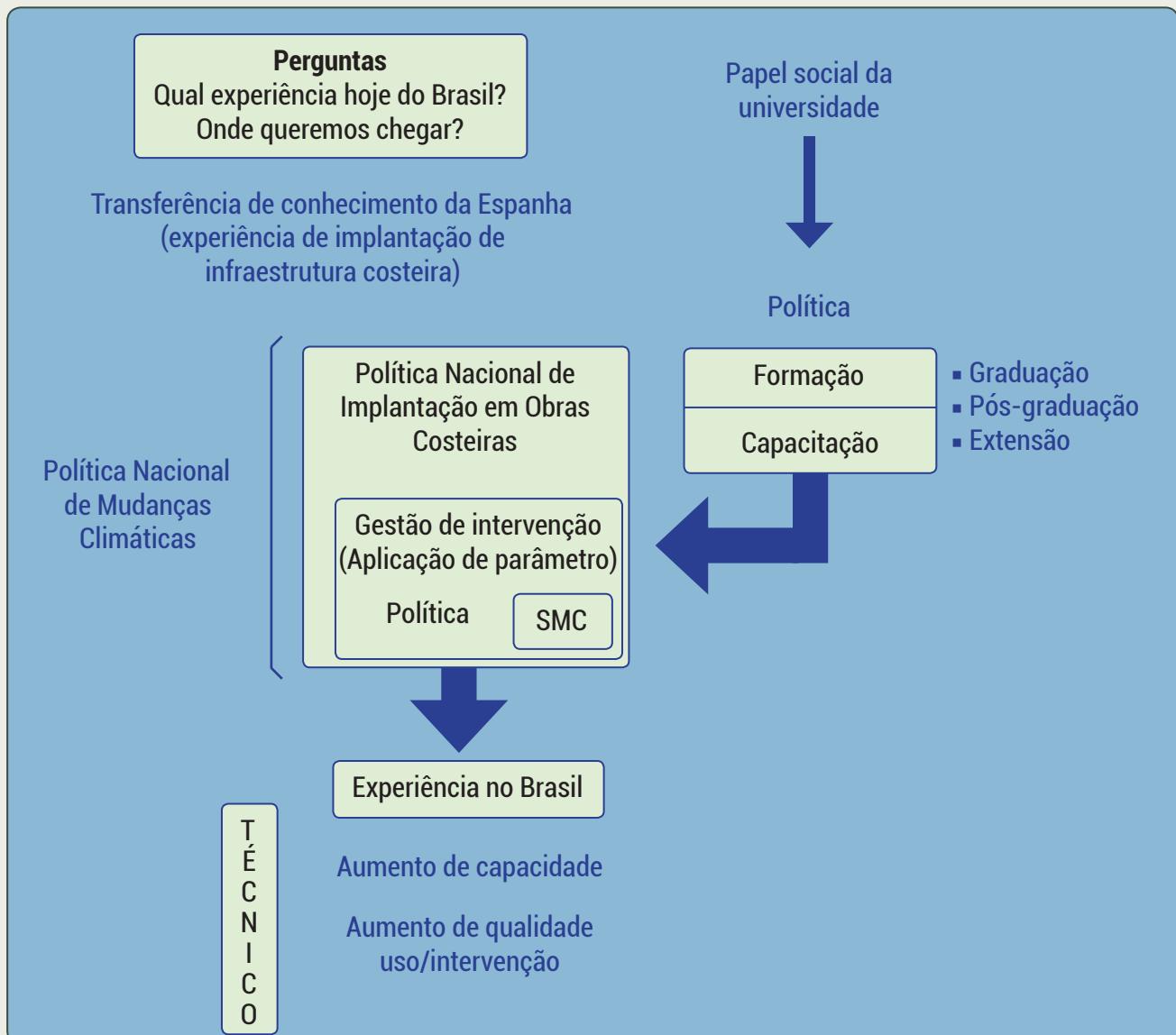
O projeto Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) tem como componentes fundamentais a formação de pessoal e a instrumentalização de gestores públicos em técnicas de proteção e em gestão do litoral que facilitem a tomada de decisões. A proposta é apresentar subsídios para apoiar a construção de metodologias que auxiliem na dinamização e na qualificação de procedimentos de licenciamento ambiental e de planejamento territorial, avaliando os impactos de obras na zona costeira (Figura 1).

A ferramenta computacional SMC-Brasil combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira. As metodologias permitem abordar o estudo de um problema de forma sistemática, respondendo, entre outras, perguntas sobre dados de entrada, escalas de análise de processos, aplicação de modelos. As escalas espaço-temporais de variação na linha de costa consideram aspectos como a recuperação de praias, o clima de ondas na costa e a cota de inundação.

A execução do projeto SMC-Brasil trouxe aprendizados importantes para o país, colaborando com a sensibilização e com o dimensionamento de problemas relevantes para ações de gestão da orla marítima, que devem balizar a estratégia de construção de um modelo de atuação para a avaliação da proteção da linha de costa.

A primeira dificuldade esteve relacionada à falta de uma base de dados que permitisse o compartilhamento de informações, com metadados adequados. A oportunidade de disponibilizar uma base de dados via ferramenta SMC-Brasil representa um incremento para o país, uma vez que se atua em ações mais estruturantes tanto para a disponibilização de dados como para a validação de modelagens que possam cobrir as lacunas de informações.

Figura 1 – Fluxograma esquemático do Projeto SMC-Brasil



Fonte: Dos autores (2018).

A iniciativa do SMC-Brasil mobilizou academia e órgãos gestores federais, estaduais e municipais, possibilitando levantar a demanda de formação continuada de profissionais que irão atuar na gestão costeira. O acesso à ferramenta SMC-Brasil despertou a necessidade de ações mais sinérgicas entre a pesquisa e a gestão, que possibilitem aos estados costeiros, de forma cooperada com as universidades locais, realizar análises e estudos da dinâmica costeira para orientações mais precisas e eficazes no que diz respeito aos processos de licenciamento, zoneamento e planejamento territorial.

É importante deixar claro que o conjunto de produtos do Projeto SMC-Brasil não supre a necessidade dos dados em escala local com a precisão adequada. Trata-se, portanto, de insumos para apoiar o país na construção de um modelo de gestão brasileira para análise da proteção da linha de costa que promova a difusão da informação e a qualificação do processo de tomada de decisão.

Em resumo, para o uso adequado das metodologias e da própria ferramenta SMC-Brasil, é necessário investir na formação e na capacitação de gestores, de técnicos e de pesquisadores no que

se refere às técnicas de proteção e de manejo da costa brasileira e aos conhecimentos básicos sobre dinâmica costeira. É fundamental também que o país avance na estratégia de coleta e de disponibilização de informações básicas sobre processos costeiros (ondas, marés, correntes, transporte de sedimentos etc.), essencial para a melhor aplicação de modelos e simulações.

Dessa forma, a presente publicação é a compilação de 16 artigos que apresentam os primeiros resultados da aplicação das metodologias e das ferramentas proporcionadas pelo Projeto SMC-Brasil. Os artigos foram organizados de modo a apresentar, primeiramente, de forma geral, os processos costeiros brasileiros (Capítulo 1) e, por fim, a utilização do SMC-Brasil nas mais diversas aplicações de norte a sul do país. Esses capítulos são apresentados de forma a promover o entendimento do leitor sobre a importância do estudo das áreas costeiras no Brasil e sobre a atual facilidade de integrar metodologias e ferramentas no gerenciamento costeiro brasileiro.

A realização desta publicação só foi possível graças à colaboração de todos os grupos e autores convidados e, em especial, do Ministério do Meio Ambiente, cujo suporte financeiro foi fundamental. Os organizadores agradecem o apoio do Instituto Ambiental Brasil Sustentável (IABS), da Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU), da Fundação do Instituto Hidráulico Ambiental da Cantabria (IH Fundación), do Governo da Espanha, por meio do seu Ministério do Meio Ambiente, da Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), da Agência Brasileira de Cooperação (ABC); e a realização por meio do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), do Instituto Hidráulico Ambiental da Cantábria (IH-Cantábrica), da Universidade da Cantábria (UC), da Secretaria do Patrimônio da União (SPU), do Ministério do Planejamento e do Ministério do Meio Ambiente; do projeto Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira, conhecido como SMC-Brasil. Por fim, agradecemos à mestrandona Ana Paula da Silva pelo apoio na revisão do documento final.

PROCESSOS COSTEIROS BRASILEIROS: VENTOS, CLIMA DE ONDAS E NÍVEL DO MAR COM BASE EM REANÁLISES DE DADOS

Mauricio González
João Luiz Nicolodi
Omar Quetzalcóatl Gutiérrez
Verónica Cánovas
Antonio Espejo

RESUMO

O Brasil possui uma grande diversidade física e ambiental em sua costa, caracterizada pela heterogeneidade quanto à morfologia da costa e de seus componentes hidrodinâmicos, como as ondas, marés, mudanças no nível do mar e gradientes de pressão atmosférica. Com o intuito de caracterizar a costa brasileira, dados de reanálises numéricas podem ser utilizados quando dados medidos de longo período ainda são escassos. Dessa forma, é apresentada neste trabalho uma descrição dos ventos, climas de ondas, marés astronômicas e meteorológicas em toda a costa brasileira, fundamentada nas bases de dados de reanálises do programa SMC-Brasil: *Downscaled Ocean Waves* (DOW), *Global Ocean Tides* (GOT) e *Global Ocean Surges* (GOS), assim como a descrição da geração, calibração e validação dessas bases de dados. Por fim, também é dada uma breve descrição do programa SMC-Brasil focando as suas principais características.

Palavras-chave: SMC-Brasil. Bases de dados. Ondas. Nível. Vento.

INTRODUÇÃO

Flutuações no nível do mar são respostas contínuas a interações atmosféricas, oceanográficas e astronômicas em distintas escalas de tempo. Além dos parâmetros mais comumente estudados, como as ondas e as marés astronômicas, também o conhecimento de fenômenos, como as marés meteorológicas, é crucial para o planejamento territorial de áreas costeiras.

O Brasil possui uma grande diversidade física e ambiental em sua costa, caracterizada pela heterogeneidade quanto à morfologia da costa e de seus componentes hidrodinâmicos, como as ondas, marés, mudanças no nível do mar e gradientes de pressão atmosférica. Quando há a combinação desses fatores, como a maré meteorológica positiva com o empilhamento de água na costa devido à quebra das ondas (*wave setup*), pode haver valores extremos de *runup* (máxima excursão vertical da linha d'água), resultando na destruição das dunas e das defesas costeiras (e.g.: muros de proteção), especialmente quando esses dois fatores coincidem com as marés astronômicas de sizígia, causando assim erosão e inundação na costa (SHORT; KLEIN, 2016).

No Brasil, a erosão costeira é mais comum que a progradação da linha de costa, com maiores taxas de erosão em praias, falésias e estuários (MUEHE, 2006), havendo assim a necessidade de ferramentas que possam reconhecer áreas vulneráveis a esses riscos de erosão e inundação. Assim, como um constante desafio para a gestão costeira, esses fatores têm sido modelados, e a informação resultante é a base para o mapeamento de riscos costeiros ao redor do planeta (BENAVENTE et al., 2006).

Nesse contexto, é importante compreender as interações entre os oceanos e as zonas costeiras para construir uma visão estratégica, de modo que medidas possam ser tomadas em resposta a novos cenários de aquecimento global, de aumento do nível do mar e de erosão costeira (NICOLODI; PETERMANN, 2011). E embora haja hoje no Brasil conhecimento sobre o assunto, o monitoramento sistemático de variáveis como ondas e marés ainda é muito recente. Dessa forma, para complementar as medições instrumentais (estações meteorológicas, boias e satélites), tanto no tempo como no espaço, várias reanálises de dados globais têm sido desenvolvidas. Esses conjuntos de dados fornecem informações úteis e valiosas sobre o tempo e o clima.

Este capítulo, portanto, tem como objetivo apresentar os dados de ventos, ondas e marés de reanálise existentes no Brasil. Com base nesses dados é possível analisar a atual dinâmica costeira, especialmente quando complementado com a utilização de ferramentas que combinam modelos numéricos e dados medidos. Um dos principais exemplos hoje, no Brasil, é o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), que é uma iniciativa do Ministério do Meio Ambiente em parceria com o governo espanhol de promover metodologias e ferramentas de apoio à gestão da costa brasileira.

REANÁLISE DE DADOS

Reanálise é uma abordagem sistemática para produzir conjuntos de dados para monitoramento e pesquisa sobre o clima. As reanálises são geradas através de um esquema invariável de assimilação de dados e modelos, que processam todas as observações disponíveis a cada 6-12 h ao longo do período analisado, fornecendo uma estimativa dinâmica consistente do clima. As componentes que variam nesse quadro são as fontes de dados de entrada em estado bruto. Essa variação é inevitável devido à constante mudança da rede de observação que inclui radiosondas, satélites, boias, aeronaves e

relatórios de navios, mas que não está limitada a estes. Atualmente, aproximadamente 7-9 milhões de observações são processadas em cada período. Ao longo da duração de cada série de dados de reanálise, as mudanças nas observações podem produzir variabilidade artificial e tendências espúrias. Ainda assim, as várias séries de dados de reanálises provaram ser bastante úteis quando usadas com o devido cuidado.

Como outras bases de dados meteoceânicas, a reanálise tem alguns pontos fortes e algumas limitações. As principais vantagens em trabalhar com esses dados simulados são:

- conjuntos de dados globais, resolução espacial e temporal consistente ao longo de três ou mais décadas, centenas de variáveis disponíveis; resolução dos modelos constantemente melhorada;
- incorporação de milhões de observações em um sistema de assimilação de dados estável, o que seria quase impossível para um indivíduo, permitindo que uma série de processos climáticos sejam estudados;
- conjuntos de dados de reanálise relativamente simples de manusear, do ponto de vista de processamento (embora os tamanhos dos arquivos possam ser muito grandes).

Por outro lado, os usuários também devem estar cientes sobre algumas importantes limitações, tais como:

- Os conjuntos de dados de reanálise não devem ser equiparados com “observações” ou “realidade”.
- As constantes mudanças nas observações e nos modelos podem introduzir uma variabilidade irreal e influenciar os dados de saída das reanálises.
- Restrições observacionais e, por conseguinte, reanálises confiáveis, podem variar considerably dependendo da localização, do período de tempo e das variáveis analisadas.

Base de dados de reanálise de ventos

A qualidade de qualquer base de dados de reanálise de vento depende da qualidade das forçantes desse vento (FENG et al., 2006). Existem várias reanálises meteorológicas globais realizadas em diferentes centros de pesquisa e institutos. Uma lista completa, incluindo suas características, pode ser encontrada em Weisse e Von Storch (2010). Ressaltam-se as seguintes entre elas:

- O projeto ERA-40 (UPPALA et al., 2005) realizado pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (European Center for Medium Range Weather Forecast – ECMWF), que inclui também o cálculo dos campos de onda;
- O projeto de reanálise do NCEP/NCAR (KALNAY et al., 1996), que constitui a maior e mais recente reanálise global;
- A reanálise da Agência Meteorológica do Japão, JRA-25 (ONOJI et al., 2007), que abrange o período de 1979 a 2004, a qual é especialmente voltada para o estudo de tempestades tropicais;
- Recentemente, o ECMWF desenvolveu uma nova reanálise para substituir o ERA-40. Abrange o período a partir de 1989 (DEE et al., 2011) e inclui dados de ondas.

Para a caracterização do clima de ondas e ventos do Atlântico Sul foram utilizados dados de reanálise de vento do NCEP/NCAR. Essa reanálise abrange o período de 1948 até 2008. Devido aos dados dispersos, a qualidade da reanálise é questionável antes de 1958, enquanto que, recentemente, com a introdução de satélites, aumentou imensamente a quantidade de dados a serem assimilados.

Variação espacial e temporal do vento

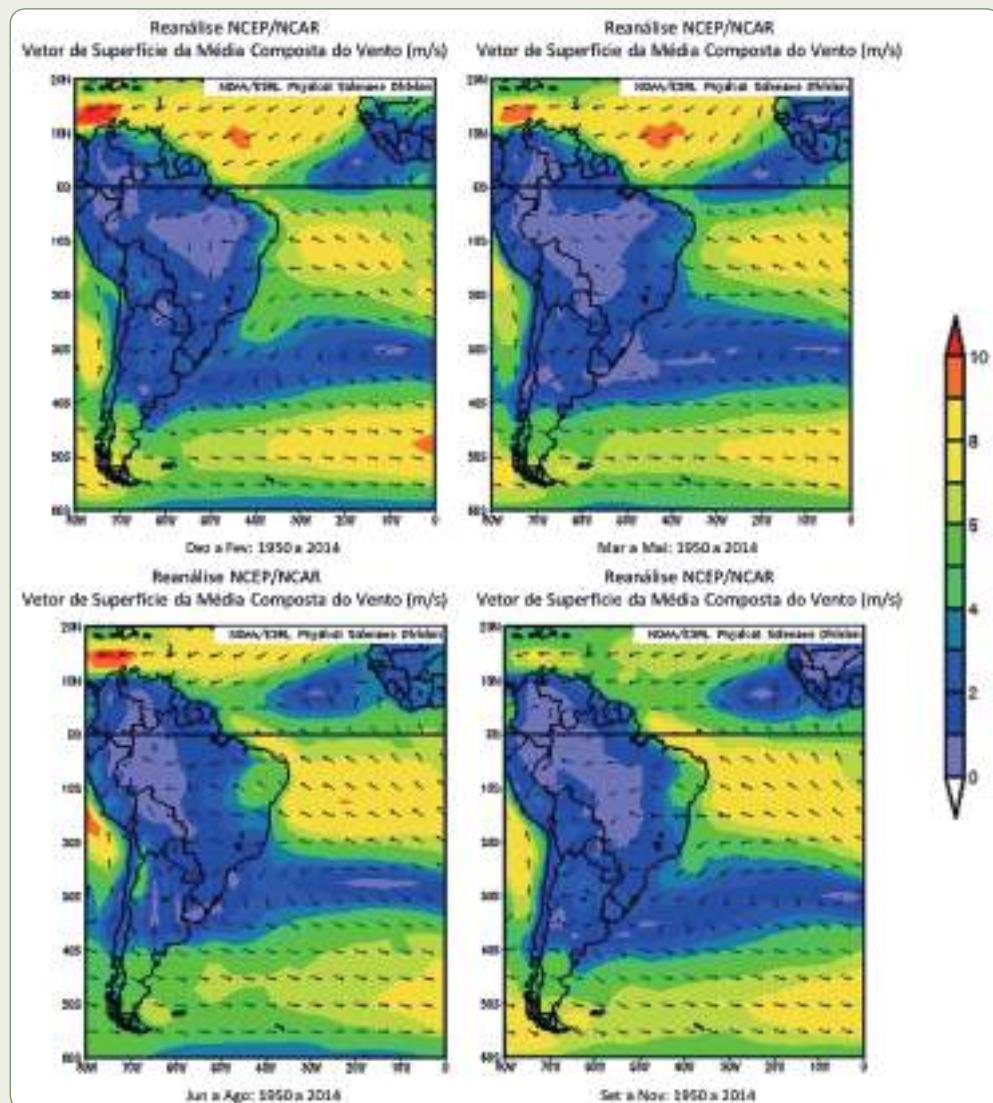
Ventos oceânicos são os condutores das ondas que alcançam a costa do Brasil. Uma boa caracterização dos ventos sobre a bacia do Atlântico Sul deve ajudar na identificação das diferentes fontes de ondas que governam o clima de ondas brasileiro. Como em outros oceanos de latitudes médias, a característica dominante da circulação do Atlântico Sul é o giro anticiclônico subtropical. No entanto, no Atlântico Sul, esse padrão de giro é fortemente influenciado por ligações interoceânicas, que desempenham um papel importante na circulação oceânica (SHORT; KLEIN, 2016). Na confluência Brasil-Malvinas (região entre 30 e 50°S aproximadamente), há um contraste térmico entre as massas de ar circumpolar frias e as quentes do Atlântico Sul, que formam fortes ciclones (*lows*) a leste da passagem de Drake (GARCIA et al., 2004). Essas tempestades, que são geradoras dos ventos de oeste, são a principal fonte dos marulhos de sul (*swell*) que dominam o sul/sudeste da costa do Brasil.

Por outro lado, mais ao norte, na região da ZCIT (entre 30°N e 30°S, aproximadamente) são os ventos alísios que sopram sobre a costa do Brasil. Esses ventos extensos e persistentes de leste, embora não tão poderosos quanto os ventos de oeste, são capazes de gerar ondas de curto período com altura moderada, que são geralmente chamadas de vagas (*sea*) (SHORT; KLEIN, 2016). Vagas são também geradas por brisas termais marinhas na costa.

Ambas as fontes de ondas, ventos de oeste e alísios, têm grandes flutuações sazonais, como pode ser visto na Figura 1.1. Os ventos de oeste no Atlântico Sul parecem se fortalecer durante os meses de verão austral, e se espalhar como ventos com velocidades mais baixas para latitudes norte-ocidentais no inverno. A aproximação dos ventos de oeste à costa do Sul do Brasil é a causa da predominância da baixa incidência de marulhos durante o verão, e de um clima de ondas com energia relativamente baixa ao longo do resto do ano.

Em relação aos ventos alísios, que são a principal causa da maior parte da energia das ondas da costa brasileira, é importante diferenciar entre os hemisférios norte e sul. Considerando que os ventos alísios de nordeste no hemisfério norte são mais fortes durante os meses de inverno e primavera, os ventos alísios de sudeste, no hemisfério sul, são quase constantes, com pequenas flutuações sazonais. A característica sazonal mais marcante (primavera-verão austral) é a mudança direcional que ocorre entre 10 e 20°S, onde os ventos giram da direção sudeste para nordeste se reajustando à linha de costa (SHORT; KLEIN, 2016).

Figura 1.1 – Sazonalidade dos ventos do Atlântico Sul. Dados da reanálise do NCEP/NCAR



Fonte: Adaptado de Short e Klein (2016).

Base de dados de reanálise do clima de ondas

Com base em modelos de ondas e reanálises globais dos oceanos/atmosfera, muitos esforços têm sido feitos nas últimas décadas para gerar conjuntos de dados consistentes para definir o clima de ondas. Atualmente, várias reanálises globais têm aparecido na literatura, cada uma com resolução espacial e métodos de aproximação dos processos das ondas melhorados em relação aos anteriores.

Neste trabalho, a reanálise *Global Ocean Waves* (GOW) (REGUERO et al., 2012), de 1948 a 2008, foi utilizada. Hoje, o conjunto de dados GOW é uma das mais longas séries de clima de onda, com a vantagem de ser calibrada com dados de altimetria por satélite, como parte do pós-processamento. Mesmo que tenha havido uma melhoria importante na geração de modelos numéricos de onda, a validação dos resultados ainda apresenta algumas discrepâncias com relação aos dados instrumentais. Existem várias razões para isso, tais como más descrições de campos de vento, forçantes insuficientes, e resolução de modelos (FENG et al., 2006). Outros fatores também contribuem para um desempenho

insatisfatório do modelo em águas rasas, tais como modelos de ondas com aplicação de formulações físicas inapropriadas para águas rasas, bloqueio de energia por ilhas não resolvido, batimetria com imperfeição etc. (CAVALERI et al., 2007). Por essa razão várias tentativas de correção de alturas de ondas com dados instrumentais foram apresentadas na literatura.

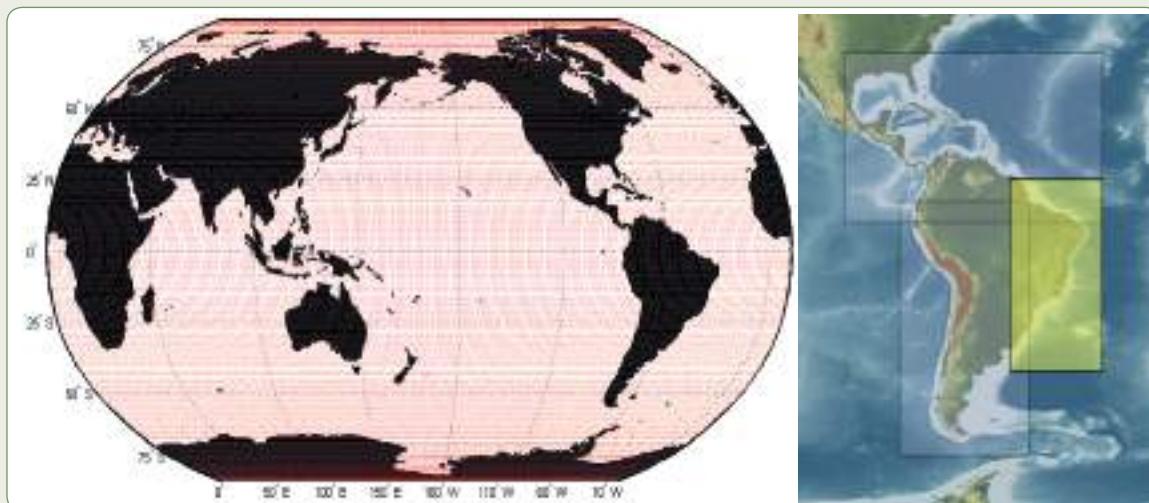
Os modelos de onda globais fornecem informações valiosas para pesquisas sobre o clima de ondas e aplicações oceânicas que exigem longos períodos de séries temporais (> 30 anos) de parâmetros de estado de mar. No entanto, estudos costeiros precisam de uma resolução espacial mais detalhada (50-500 m), incluindo processos de transformação de ondas em águas rasas. Esse problema específico, chamado de *downscaling*, é geralmente resolvido com a aplicação de uma abordagem dinâmica por meio de modelos numéricos de propagação de ondas que requerem um esforço de tempo computacional elevado. Aqui, é utilizada uma metodologia híbrida que combina modelos numéricos (dinâmico) e ferramentas matemáticas (estatístico) reduzindo drasticamente o tempo de esforço da CPU (CAMUS et al., 2011).

Um aspecto importante na geração da base de dados de reanálise de vento é o processo de validação que utiliza a informação instrumental como referência. Para essa questão em particular, comparam-se resultados de modelos de ondas com medições em boias de águas profundas e dados de satélite com malhas mais refinadas.

Global Ocean Waves (GOW)

A série de reanálise global de ondas (GOW) foi simulada usando o modelo *Wave Watch III* (WWIII) (TOLMAN, 2009). As simulações foram calculadas em uma malha global com uma resolução espacial de $1,5^\circ$ de longitude e 1° de latitude (um total de 22.945 nós computacionais, Figura 1.2). Além disso, várias malhas com resoluções mais detalhadas ($0,5^\circ$ de longitude e $0,5^\circ$ de latitude) têm sido usadas próximo aos continentes para um melhor desempenho dos processos de propagação de ondas nas profundidades intermediárias (entre profundas e rasas), como convergência ou divergência de ondas devido à presença de cânions submarinos profundos, ou diminuição das alturas de onda devido ao atrito com o fundo da plataforma continental.

Figura 1.2 – Malha global usada na reanálise GOW (esquerda) e batimetria do fundo marinho da ETOPO e malha GOW detalhada (~50km) cobrindo toda a costa da América do Sul (direita)



Fonte: Dos autores (2018).

O modelo de ondas utiliza como dados de entrada a energia pelo vento, interações não lineares onda-onda e dissipação por *whitecapping* (encapelamento – quebra da ponta da crista da onda). Os efeitos da refração induzida pela profundidade também são considerados no modelo de propagação de ondas. As interações de ondas com correntes e a difração por ilhas não são consideradas no processo de simulação. Os dados de batimetria utilizados para a simulação vêm a partir do conjunto de dados de 1 min. de resolução da ETOPO (NOAA, 2006).

O passo de tempo mínimo de propagação utilizado para o cálculo foi de 60 s e a resolução espectral cobre 72 direções regularmente espaçadas. As frequências se estendem de 0,03679 Hz com 25 escalas de frequência e um fator de incremento de frequência de 1,1 (resolução de períodos de onda de 2 a 28 s).

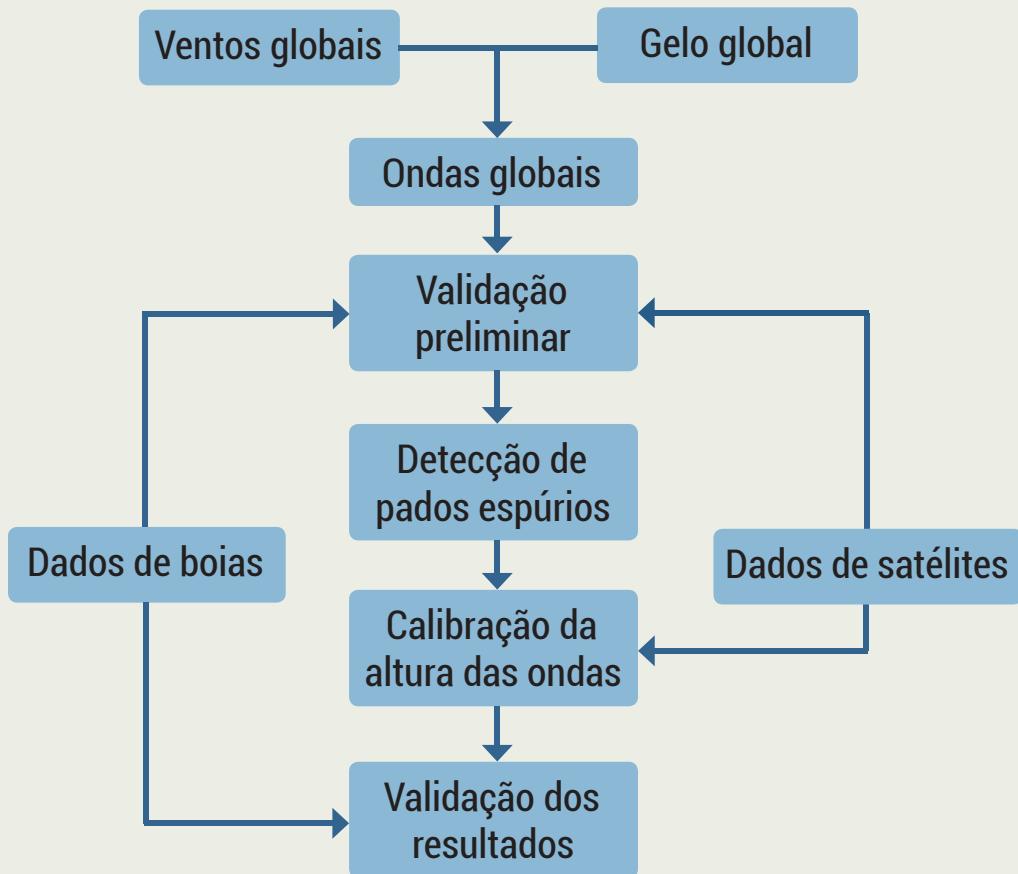
Como os resultados do modelo de onda são muito sensíveis à entrada de vento, diferentes estudos foram desenvolvidos para avaliar a qualidade dos campos de vento. Tolman (2002) determina que os ventos NCEP/NCAR fornecem os melhores resultados em termos de estimativas significativas de altura de onda para o modelo WWIII.

Os parâmetros de saída obtidos em toda a malha foram: a altura de onda significativa (H_s), período de onda médio (T_m), período de pico (T_p), direção de pico (θ_p), direção média de onda (θ_m), espalhamento direcional e espectro de energia de ondas em locais específicos ao longo da costa na intenção de prever condições de mar multimodais, com diferentes componentes de marulhos e vagas. O aumento da resolução em zonas costeiras permite um *downscaling* de ondas nas áreas próximas à costa para fins de aplicações de engenharia (portos, quebra-mares, transporte de sedimentos, estabilidade praial etc.).

Metodologia

O desenvolvimento de uma base de dados de reanálise de ondas abrange vários estágios, que são resumidos na Figura 1.3. Para verificar o desempenho do modelo de geração de onda e a qualidade do campo de forçantes, uma validação preliminar é feita usando os dados de boia e altimetria por satélite, como pontos de referência. A etapa seguinte consiste na calibração dos resultados numéricos (isto é, altura de onda significativa) usando dados altimétricos por satélite. Esse processo tem como objetivo fazer várias correções sistemáticas para reduzir os desvios entre a função de distribuição de probabilidade da série de dados de reanálise corrigida e dados instrumentais. Finalmente, uma validação adicional usando dados de boia é realizada para verificar o desempenho do processo de calibração e a qualidade da base de dados final.

Figura 1.3 – Fluxograma utilizado para a construção das reanálises GOW



Fonte: Dos autores (2018).

Calibração da altura de onda

O procedimento de calibração é baseado em medições de altimetria. Embora a comparação só seja feita quando há coexistência de ambas as fontes de dados, GOW e satélite, a correção é aplicada durante toda a série de dados de onda. Esse pressuposto pode ser considerado adequado para aplicações de engenharia, uma vez que as estatísticas forem corrigidas. Dados de onda para calibração são provenientes de distintas missões de aquisição de dados via satélite como Jason 1, Jason 2, TOPEX, ERS-2, Envisat e GFO. Alturas de onda medidas mostram ampla concordância entre os diferentes satélites e, como consequência, eles são combinados para comparação com os resultados da reanálise. A cobertura temporal dos dados de satélite se estende de 1992 a 2008. Os procedimentos de calibração da altura de onda por satélite estão descritos em Cotton (1998) e em Woolf e Challenor (2002), e posteriormente atualizados por Hemer, Church e Hunter (2010).

O método de calibração é baseado na ideia de que falhas sistemáticas são produzidas por modelos que dependem da direção média de ondas. Isso pode ser matematicamente expresso como:

$$H_s^C = a^R(\theta) [H_s^R]^{b^R(\theta)} \quad (\text{Eq. 1.1})$$

onde H_s^R é a altura significativa de onda de reanálise, H_s^C é a altura significativa de onda calibrada ou corrigida, e $a^R(\theta)$ e $b^R(\theta)$ são os parâmetros que dependem da direção média de ondas (θ) de reanálise.

Note que, para estados de mar multimodais, essa correção não considera as diferentes direções de cada componente, e seu efeito deve ser mais explorado, de acordo com a importância relativa de cada componente energética.

Os valores dos parâmetros para todas as direções possíveis são obtidos por interpolação utilizando *splines* cúbicas de suavização:

$$a_i^R(\theta_i) = a_j + x_j^a(\theta_i - \theta_j) + y_j^a(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^a(\theta_i - \theta_j)^3 \quad (\text{Eq. 1.2})$$

$$b_i^R(\theta_i) = b_j + x_j^b(\theta_i - \theta_j) + y_j^b(\theta_i - \theta_j)^2 + z_j^b(\theta_i - \theta_j)^3 \quad (\text{Eq. 1.3})$$

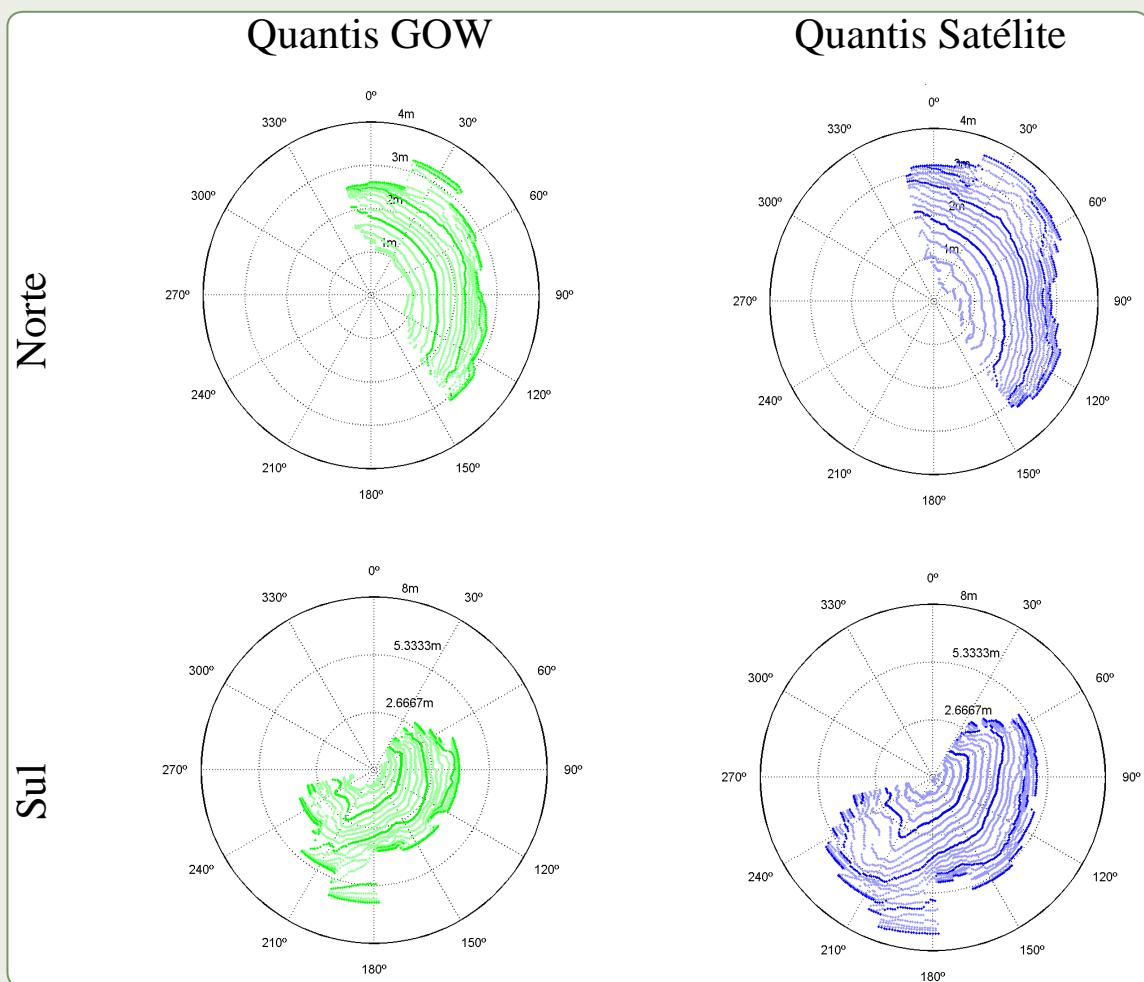
Onde:

- a_i^R e b_i^R são parâmetros de correção do modelo interpolado para uma dada direção θ_i ;
- $a_j, b_j, j = 1, \dots, n_p$ são parâmetros a serem estimados, isto é, valores de parâmetros associados com direções θ_j . Parâmetros do modelo $a_j, b_j, j = 1, \dots, n_p$ são estimados pelo método dos mínimos quadrados;
- $j = 1, \dots, n_d$, e $x_j^a, y_j^a, z_j^a, x_j^b, y_j^b, z_j^b, j = 1, \dots, n_d$ são os parâmetros correspondentes às *splines* cúbicas, que são obtidos usando condições de continuidade de zero, primeira e segunda ordem ao redor da circunferência ($0 \leq \theta \leq 2\pi$).

Uma vez que esses parâmetros são obtidos, é possível corrigir a série de tempo de reanálise completa usando registros de direção média de onda. O método de calibração faz a correção direcional baseada em quantis em uma escala de Gumbel, o que dá mais importância à parte superior da distribuição da altura das ondas.

Como exemplo da calibração, os resultados de dois pontos em águas profundas no Brasil são apresentados na Figura 1.4. Os pontos selecionados explicam as diferenças no clima de ondas no norte e sul do Brasil e, portanto, na calibração das diferentes direções de onda. O ponto norte está localizado em $37^\circ\text{O}, 2^\circ\text{N}$ enquanto as coordenadas do ponto sul são $45^\circ\text{O}, 25^\circ\text{S}$. Em ambos os casos, a área selecionada de medições por satélite é uma circunferência de 1° , contendo entre 50.000 e 70.000 pares de dados para a comparação. A Figura 1.4 mostra os quantis direcionais de GOW e de satélite nos dois locais selecionados. Como pode ser visto, em ambos os locais o modelo subestima H_s , com a diferença de que o clima de ondas no ponto norte parece ser mais bem caracterizado (diferenças menores entre quantis direcionais GOW e de satélite).

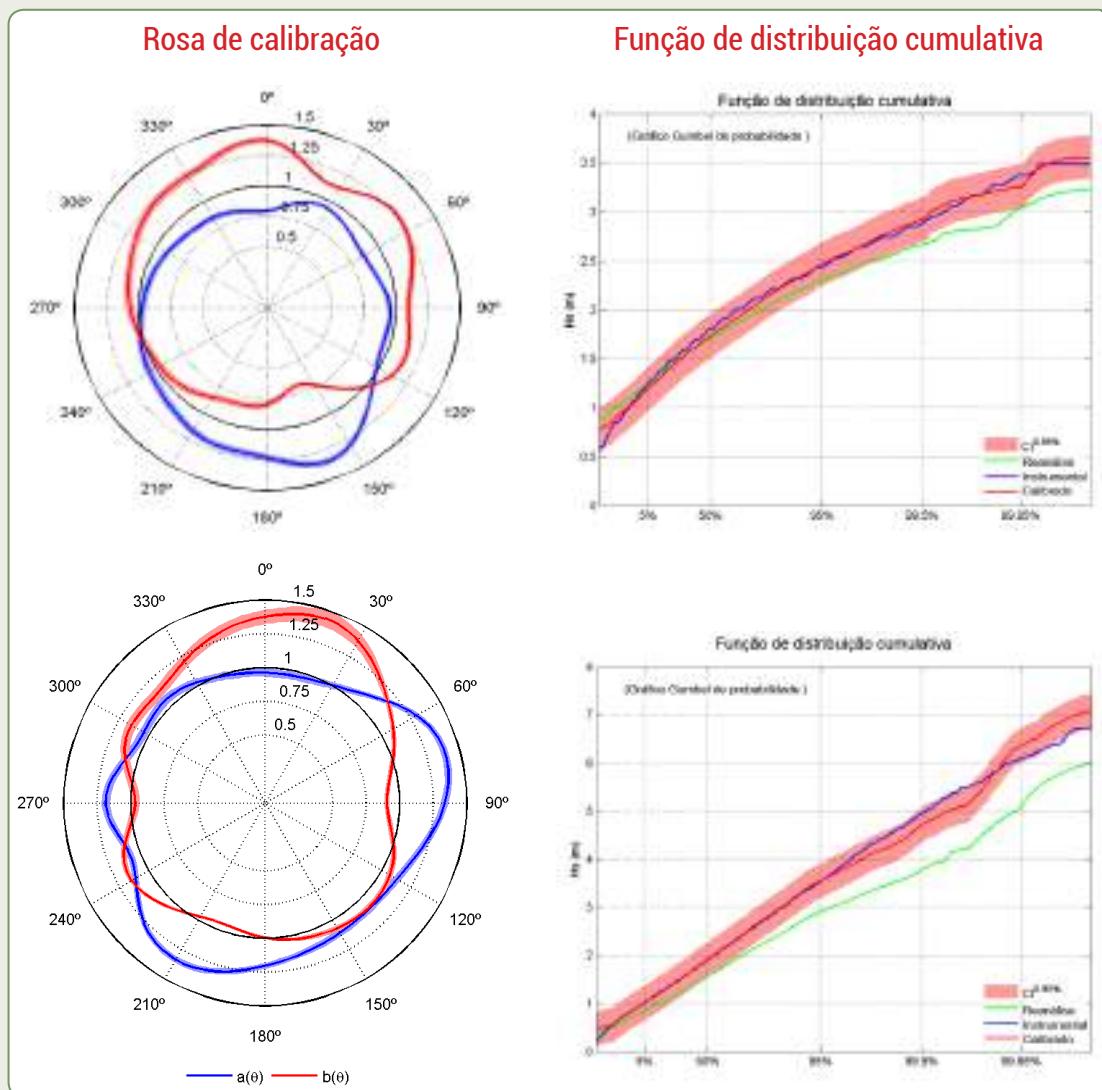
Figura 1.4 – Quantis direcionais de H_s GOW (verde) e satélite (azul) dos dois pontos selecionados em águas profundas



Fonte: Dos autores (2018).

Após o ajuste dos mínimos quadrados de cada setor direcional, os coeficientes direcionais e podem ser determinados; estes são mostrados nas rosas de calibração contidas na Figura 1.5. Além disso, as funções de distribuição cumulativa de GOW (linha verde), GOW calibrado (linha vermelha) e dados instrumentais (linha azul) podem ser vistos na Figura 1.5. Como pode ser observado, o método de calibração é capaz de enriquecer a reanálise, quase completamente concordando com a distribuição instrumental, em que os resultados no ponto sul são bastante pobres.

Figura 1.5 – Calibração de dois pontos GOW

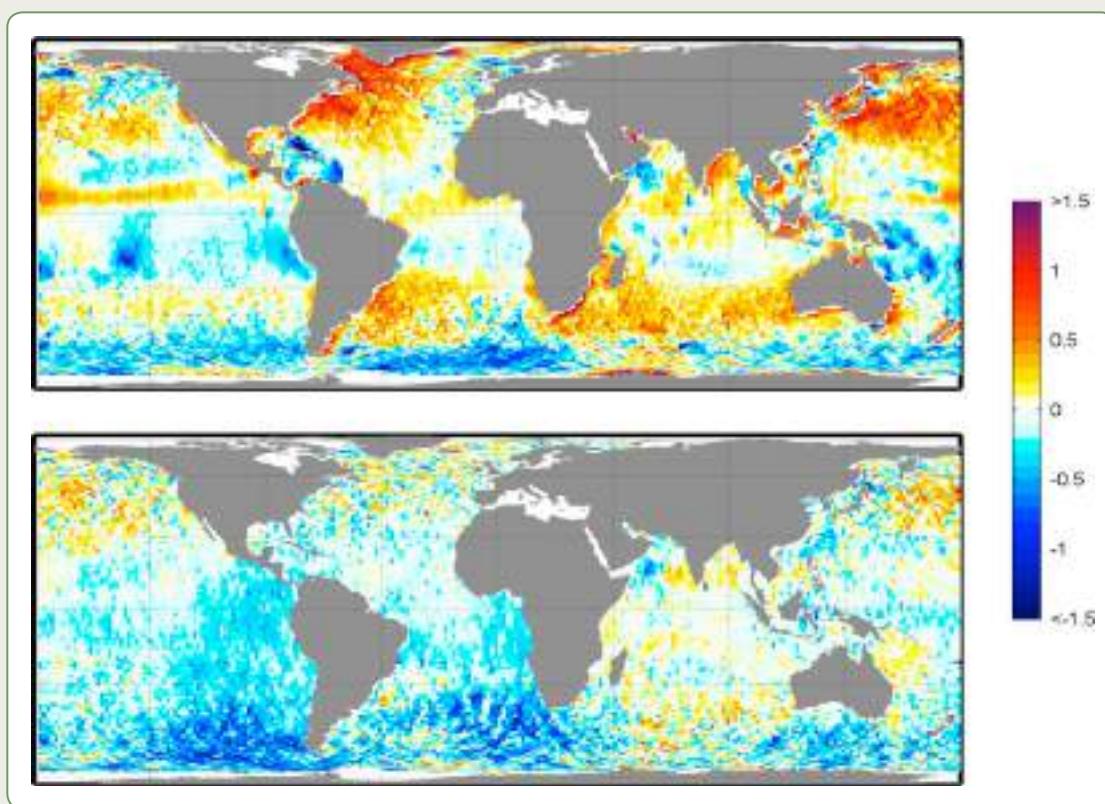


Legenda: Norte (acima) e sul (abaixo). Esquerda: rosa de calibração dos parâmetros a (azul) e b (vermelho). Direita: função de distribuição cumulativa dos pontos GOW (verde), medição instrumental (azul) e pontos GOW calibrados (vermelho)

Fonte: Dos autores (2018).

Finalmente, a Figura 1.6 mostra as diferenças em valores absolutos entre o percentil 95 de altura significativa de onda e as observações por satélite com relação ao GOW original e aos dados GOW calibrados para o período de validação de 2006 a 2008. A calibração foi realizada com um conjunto de dados de altímetro de 1992 a 2005.

Figura 1.6 – Diferenças de valor absoluto do percentil 95 de altura significativa de onda e das observações por satélite com relação ao GOW original (painel superior) e ao GOW calibrado (painel inferior)



Fonte: Dos autores (2018).

Downscaled Ocean Waves (DOW)

O modelo de ondas global (GOW), apesar de fornecer informações valiosas sobre o clima de ondas, não oferece informações apropriadas para estudos de engenharia costeira. Por essa razão, uma vez alcançadas as águas rasas, resolver os processos de transformação de ondas envolvidos se mostra importante, porque esses são fatores primários que afetam a variabilidade espacial no campo de ondas. Para essa tarefa, uma metodologia híbrida de *downscaling*, que transfere o clima de ondas para áreas costeiras, foi utilizada. Essa abordagem combina o modelo numérico de onda (*downscaling* dinâmico) com as ferramentas matemáticas (*downscaling* estatístico).

Para diminuir o esforço computacional, um algoritmo de seleção por máxima dissimilaridade (MaxDiss) foi aplicado. O número reduzido de casos selecionados abrange uma variabilidade do clima de ondas, garantindo que todos os possíveis estados do mar sejam representados, capturando inclusive os eventos extremos. Esses estados de mar foram propagados usando o modelo SWAN (BOOIJ; RIS; HOLTHUIJSEN, 1999). A série temporal de propagação dos parâmetros de estado do mar em um determinado local foi reconstruída utilizando uma técnica de interpolação não linear baseada em funções de base radial (RBFs), proporcionando excelentes resultados em um grande espaço dimensional com dados dispersos, como ocorre em casos selecionados com o MaxDiss. A validação numérica dos resultados confirma a capacidade da metodologia desenvolvida para reconstruir a série temporal de estados de mar em águas rasas em um determinado local e para estimar diferentes parâmetros espaciais de clima de ondas com uma redução considerável do esforço computacional.

Modelo de propagação de onda (SWAN)

Modelos de propagação de ondas simulam os processos de transformação de ondas de águas profundas para águas rasas. Existem diferentes modelos de ondas, dependendo das equações matemáticas envolvidas, que descrevem essa propagação, e que pressupõem diferentes limitações nos processos que eles são capazes de modelar. Assim, nenhum dos modelos existentes considera todos os processos físicos envolvidos.

Podem distinguir-se dois tipos básicos de modelos numéricos de ondas: modelos que resolvem a fase, baseados em equações de balanço entre massa e *momentum*, integradas verticalmente no tempo; e modelos de fase média (espectrais), que são baseados numa equação de balanço de energia espectral. A aplicação de modelos que resolvem a fase, que requerem 10-100 intervalos de tempo para cada período de onda, está limitada a áreas relativamente pequenas (1-10 km), enquanto modelos de fase média podem ser aplicados em regiões muito maiores (LOSADA; LIU, 2002).

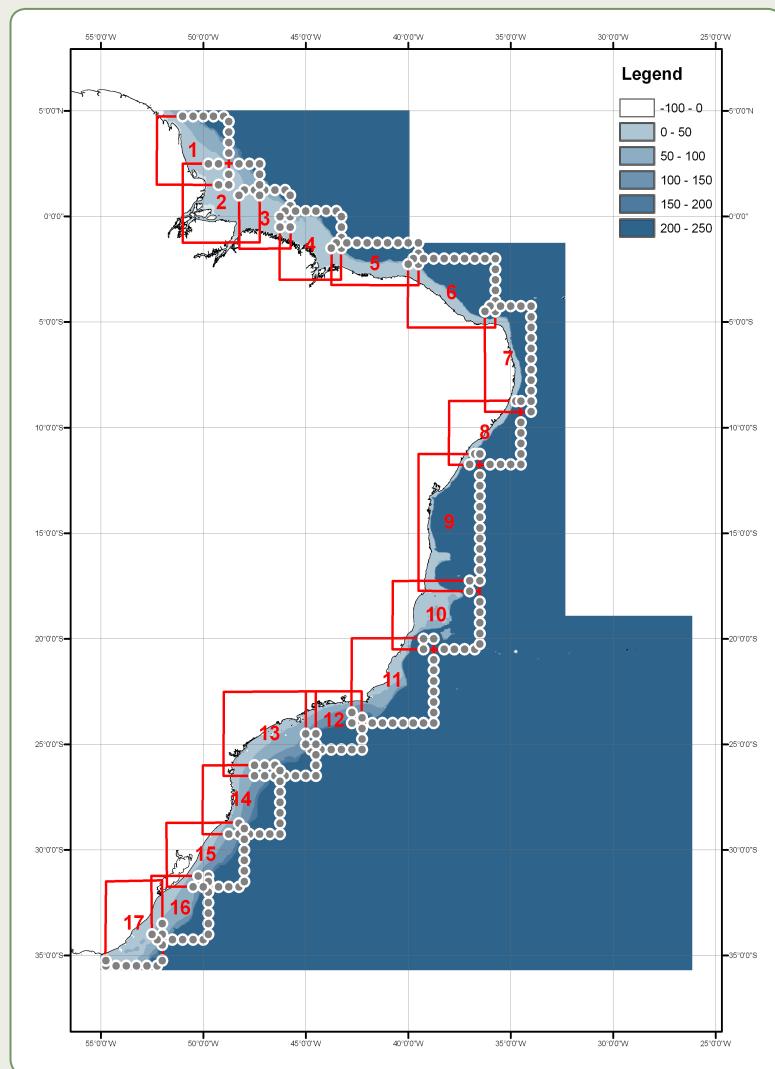
O modelo de energia de ondas SWAN com coordenadas cartesianas é utilizado devido ao tamanho do domínio de propagação. Além disso, uma resolução espacial de 1 km é considerada, uma vez que não é necessário um número determinado de nós por comprimento de onda neste tipo de modelo numérico, e um ano de parâmetros de estado do mar em águas profundas pode passar por *downscaling* praticamente sem esforço computacional.

Cada condição horária de onda e vento definida por H_s , T_p , θ_m , W_{10} (velocidade do vento), β_w (direção do vento) é propagada pelo modelo SWAN. As condições de contorno são definidas usando o espectro completo correspondente a cada ponto selecionado. Um campo de vento variável no domínio computacional é definido por W_{10} e β_w para cada hora de estado do mar. As computações estacionárias do SWAN implicam a propagação instantânea da onda através do domínio, bem como uma resposta instantânea das ondas para mudanças no campo de ventos. Essas restrições são obviamente imprecisas para modelos em escalas globais ou de bacias oceânicas, mas são razoáveis para um domínio menor (ROGERS et al., 2007). Além disso, um dos requisitos da metodologia proposta é o pressuposto das propagações estacionárias de modo que os subconjuntos dos casos de propagação selecionados possam ser considerados independentes.

Desenho da malha e batimetria

Para determinar o clima de ondas em águas rasas ao longo da costa brasileira, o domínio foi dividido em 17 malhas detalhadas com resolução de 1 km × 1 km. As malhas computacionais foram projetadas usando três precondições; primeiro, os limites exteriores da malha deviam estar localizados em águas profundas; segundo, esses limites deviam coincidir com os nós das malhas da reanálise GOW e, finalmente, as malhas deviam ser sobrepostas (entre 25-50 km), evitando assim efeitos de sombra devido a uma definição grosseira dos limites que atravessam a costa. A batimetria utilizada foi o resultado do mosaico entre a base de dados global GEBCO (<http://www.gebco.net/disclaimer/>) e várias cartas náuticas disponíveis perto da costa. Enquanto a batimetria GEBCO oferece uma boa representação do fundo do mar em profundidades superiores a 50-100 m, as cartas náuticas são um complemento adequado para melhorar a caracterização de fundo de águas intermediárias e rasas. A Figura 1.7 mostra as 17 malhas numeradas (caixas vermelhas), os pontos GOW selecionados ao longo dos limites (pontos cinza) e a batimetria resultante (escala de cor branco-azul).

Figura 1.7 – Malhas do SWAN (caixas vermelhas), pontos GOW selecionados (pontos cinza) e batimetria

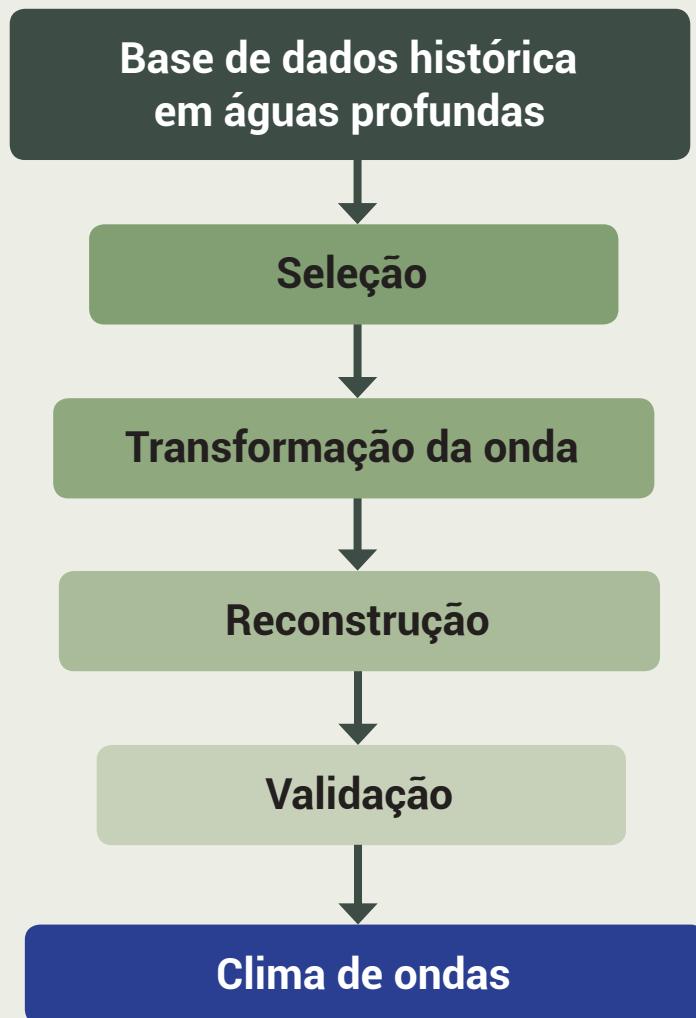


Fonte: Dos autores (2018).

Metodologia

O desenvolvimento da base de dados de ondas em *downscaling* necessita de várias etapas, que estão resumidas na Figura 1.8. Essas etapas incluem: a) seleção de um número limitado de casos (vento + clima de onda), que são os mais representativos entre as condições horárias de ondas e ventos em águas profundas de cada malha computacional selecionada; b) propagação dos casos selecionados utilizando o modelo de propagação de ondas; c) reconstrução das séries temporais dos parâmetros de estado de mar em águas rasas; d) validação dos dados de ondas na costa com dados instrumentais; e) caracterização do clima de ondas por meio de técnica estatística. As etapas são explicadas nas seções a seguir.

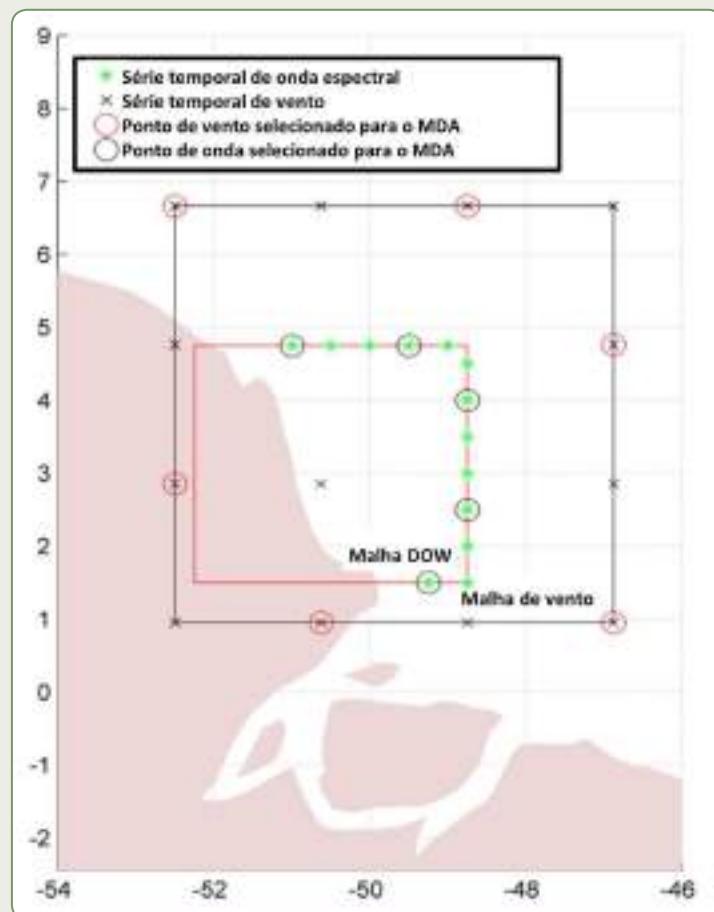
Figura 1.8 – Estrutura geral usada para transferir o clima de ondas de águas profundas para rasas



Fonte: Dos autores (2018).

A fim de caracterizar as condições de onda e vento em águas profundas, para cada malha de propagação proposta foram selecionados vários nós de fronteira das bases GOW e NCEP/NCAR. Esses nós fornecem séries horárias de cinco parâmetros: H_s , T_p , θ_m , W_{10} e β_w . Ao escolher mais de um ponto para a definição de ondas e ventos, considera-se, implicitamente, a variabilidade espacial das características das fronteiras de ondas dos campos de onda e vento. Apesar de os parâmetros de onda serem usados na etapa de seleção, a forçante do SWAN é dada pelo espectro completo em cada ponto da fronteira. A Figura 1.9 mostra as malhas usadas para onda (vermelho) e vento (preto). Enquanto vários nós estão disponíveis, apenas os alternados (círculos pretos sobre asteriscos verdes para ondas e círculos vermelhos sobre cruzes pretas para os ventos) foram incluídos na classificação.

Figura 1.9 – Dados de onda e vento escolhidos para o procedimento de seleção na malha DOW

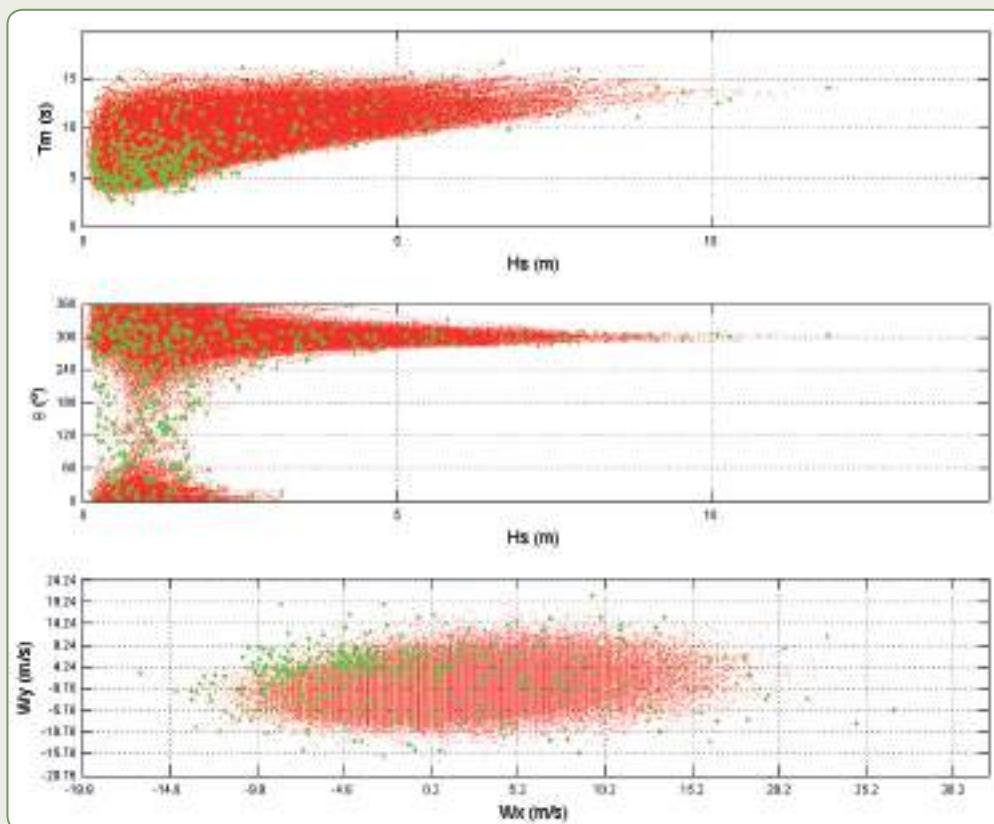


Fonte: Dos autores (2018).

O objetivo do processo de seleção é extrair um subconjunto de situações de ondas e vento representativas das condições oceânicas disponíveis a partir da base de dados de reanálise. O método de agrupamento selecionado foi o algoritmo de máxima dissimilaridade (MaxDiss). Essa técnica propõe pontos de casos distribuídos de maneira uniforme pelo espaço, com alguns deles cobrindo as condições mais extremas (CAMUS et al., 2010). A Figura 1.10 mostra a seleção realizada com MaxDiss: pontos vermelhos sendo os dados brutos; e pontos verdes, os $M = 500$ casos selecionados. Na aplicação considerada para descrever a metodologia, os dados multivariados em águas profundas são definidos como: $X^i = \{H_{s,i}, T_{p,i}, \theta_{m,i}, H_{s,n1}, T_{p,n1}, \theta_{m,n1}, \dots, W_{10,i}, \beta_{w,i}, W_{10,n2}, \beta_{w,n2}\}$; onde $i = 1, \dots, N$, e $n_1 = 5$ é o número de localizações de dados de onda (nessa malha), $n_2 = 6$ é o número de localizações de dados de vento e $N (= 534.000)$ é a quantidade total horária de casos. Como as situações horárias são altamente correlacionadas entre os diferentes pontos da malha de uma determinada variável e entre diferentes variáveis, a alta dimensionalidade de campos espaciais pode ser reduzida utilizando a análise de componentes principais (ACP), para extrair o máximo possível de correlações dos campos espaciais enquanto mantém a diversidade das situações climáticas. A redução de dimensionalidade prévia simplifica o processo de seleção e reconstrução da série temporal.

Como exemplo, na Figura 1.11, foram incluídas as primeiras condições de onda e vento selecionadas para a malha mostrada anteriormente na Figura 1.9. Como pode ser visto, esta metodologia permite considerável variabilidade espacial nos campos de vento e onda.

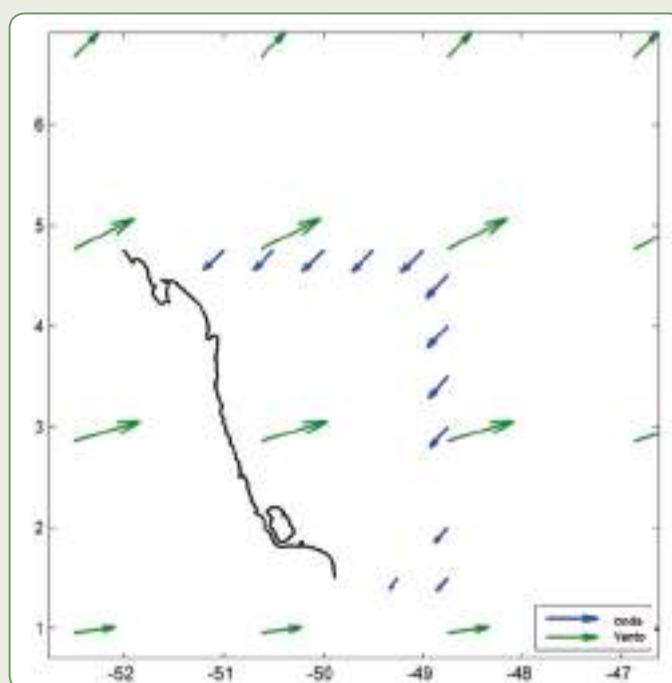
Figura 1.10 – Seleção utilizando MaxDiss



Legenda: Pontos vermelhos: todos os dados; pontos verdes: $M = 500$ casos selecionados

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 1.11 – Condição onda-vento selecionada para a malha 1

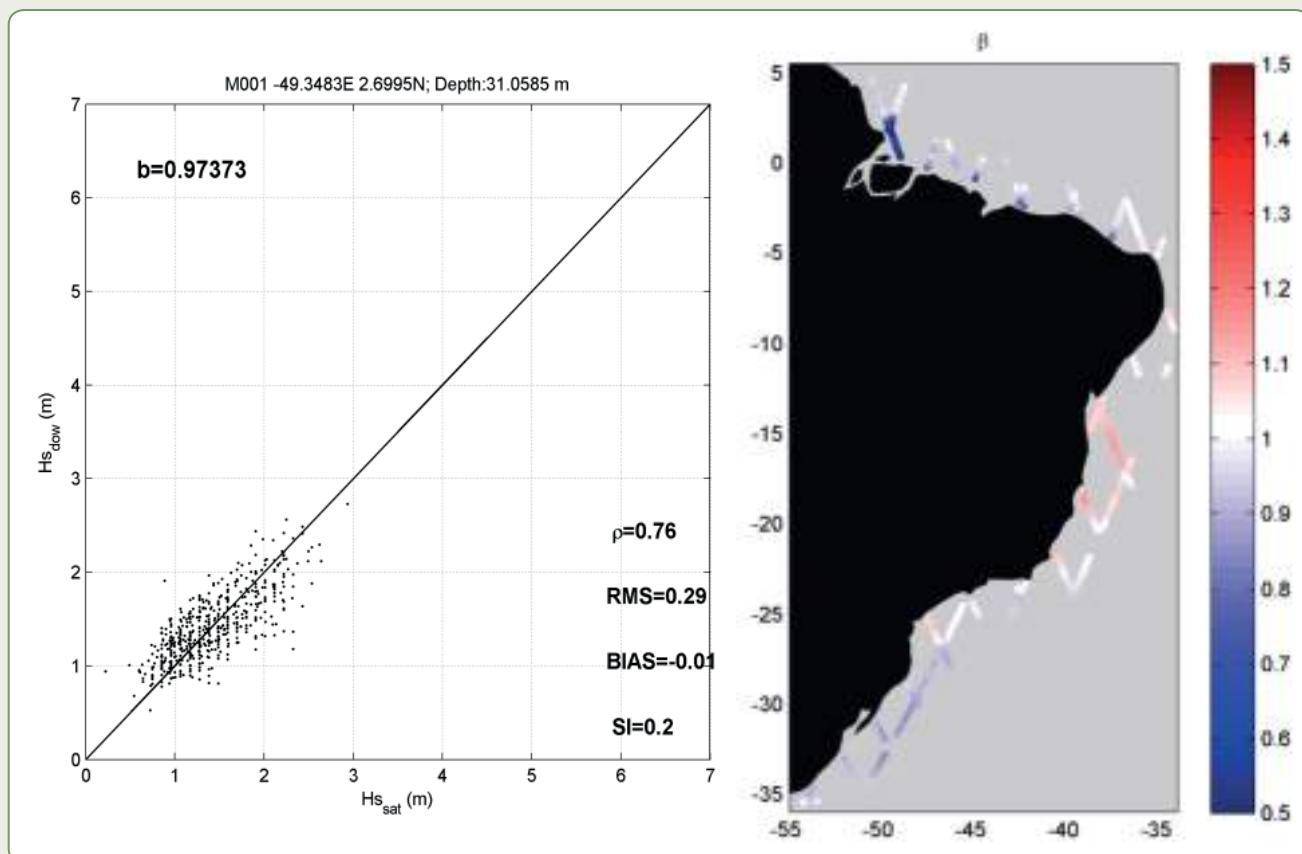


Fonte: Dos autores (2018).

Uma vez que $M = 500$ condições de onda e vento foram selecionadas, é hora de considerar a variabilidade da amplitude da maré ao longo da costa. Para essa tarefa, os 500 casos selecionados foram simulados considerando três estados de maré diferentes: maré baixa, média e alta. Com essas simulações, e conhecendo as séries temporais das marés, é possível reconstruir, por meio de interpolação multivariada, as características das ondas em qualquer ponto dentro da malha de propagação. A reconstrução das séries temporais de parâmetros de onda na costa é realizada por uma técnica de interpolação baseada em funções de base radial (RBF), muito conveniente para dados dispersos e multivariados. A aproximação RBF tem sido aplicada com sucesso em muitos campos, geralmente com melhores resultados do que outros métodos de interpolação (HARDY, 1990).

Uma vez obtido o conjunto de dados de onda próximo à costa, dados DOW, é necessário validar esses resultados em relação à informação disponível. Nesses casos, devido à quase inexistência de bons registros de ondas, apenas uma boia foi usada para esse fim. No entanto, utilizando dados altimétricos disponíveis, foi realizada uma comparação direta entre $H_{s,DOW}$ e $H_{s,satélite}$. Previamente, uma filtragem dos dados de satélite foi realizada para selecionar as zonas onde há alta densidade de dados de satélite (mais de 1.000 medidas). A Figura 1.12 mostra um exemplo de um gráfico de dispersão de $H_{s,satélite}$ por $H_{s,DOW}$ de um ponto selecionado para realizar a validação. A variabilidade espacial do coeficiente β (melhor ajuste da inclinação da reta) também é mostrada. Como pode ser observado, os maiores erros se localizam ao redor do estuário amazônico devido à complexa dinâmica nesse local.

Figura 1.12 – Gráfico de dispersão ($H_{s,satélite}$ por $H_{s,DOW}$) dos pontos selecionados para realizar a validação (esquerda) e a variabilidade espacial do coeficiente β (direita)



Legenda: ρ = coeficiente de correlação; RMS (Root Mean Square) = raiz quadrática média; BIAS = viés; SI (Scatter Index) = índice de dispersão; profundidade do ponto (Depth) = 31,0585 m

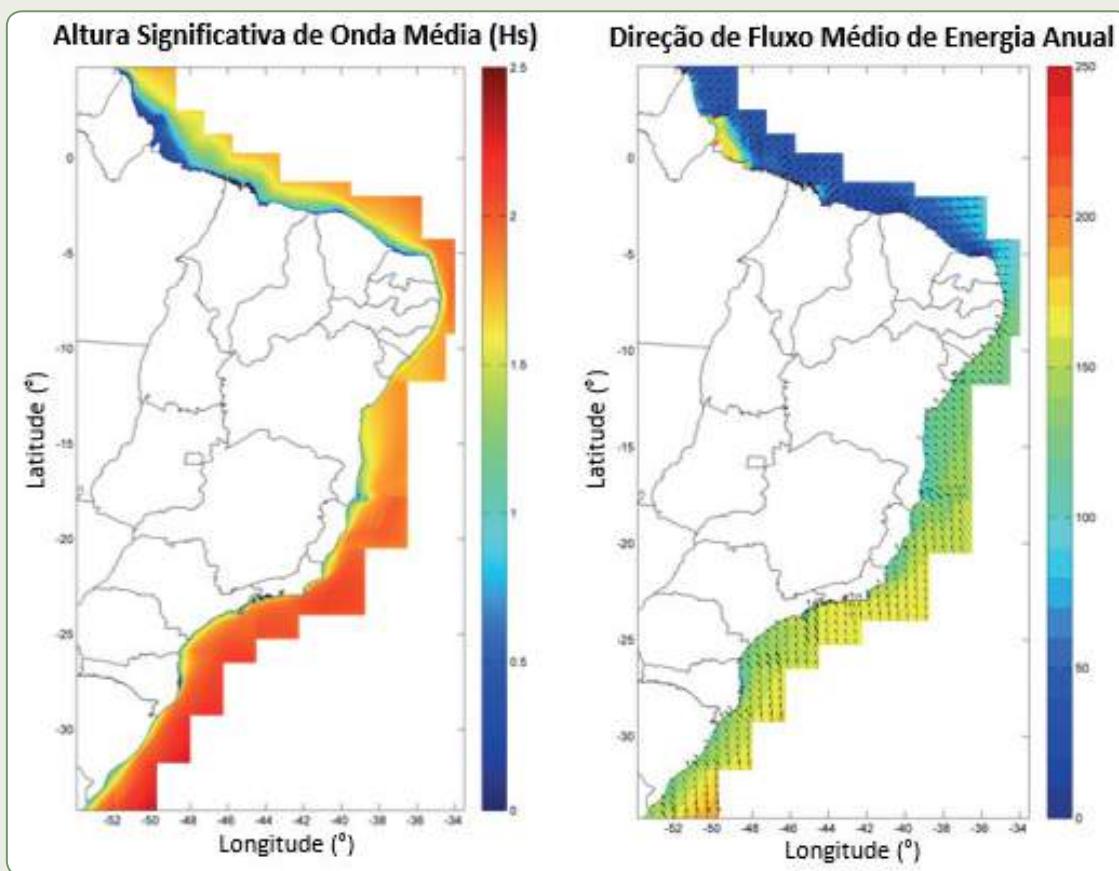
Fonte: Dos autores (2018).

Variação espacial e temporal do clima de ondas

Ondas médias

Para caracterizar as condições médias de ondas na costa do Brasil, foram determinados a média anual H_s e o fluxo médio de energia (FE), utilizando toda a base de dados (Figura 1.13). As maiores ondas são observadas ao longo da costa da região sul (até 20°S), devido à ação dos ciclones extratropicais que são capazes de produzir períodos maiores do que os que produzem os ventos alísios que dominam a costa norte. Períodos mais longos significam maior capacidade de propagação de marulhos quando comparados a vagas. Esse fato pode ser corroborado quando se observa a direção média do FE, apresentando uma mudança drástica em torno de 5°S (SHORT; KLEIN, 2016).

Figura 1.13 – Média anual de H_s (esquerda), em metros, e direção do FE (direita), em graus, ao longo da costa brasileira, usando a base de dados DOW do período de 1948-2008

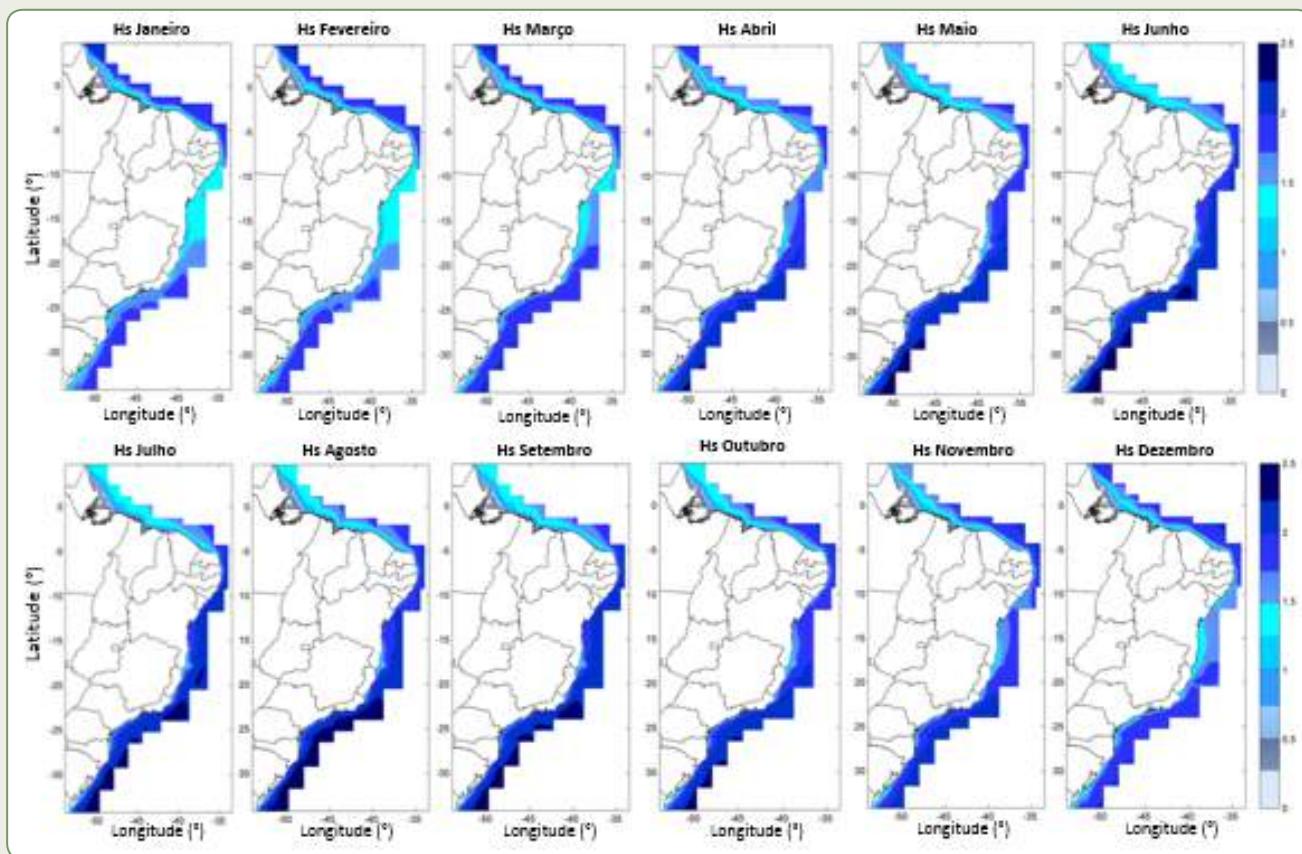


Fonte: Adaptado de Short e Klein (2016).

A sazonalidade do clima de ondas pode ser observada na Figura 1.14, sendo esta uma resposta à sazonalidade dos ventos regionais.

A região norte recebe ondas mais energéticas durante o verão devido à intensificação dos ventos alísios no hemisfério norte. Entre 10-15°S, o pico de H_s é durante o inverno, devido à intensificação dos ventos alísios do hemisfério sul. Mais ao sul, a amplificação do H_s durante os meses de inverno está relacionada aos mais frequentes e fortes ciclones (*lows*) que se formam sobre a Passagem de Drake (SHORT; KLEIN, 2016).

Figura 1.14 – Mapa da sazonalidade de H_s , em metros, usando a base de dados DOW do período de 1948-2008

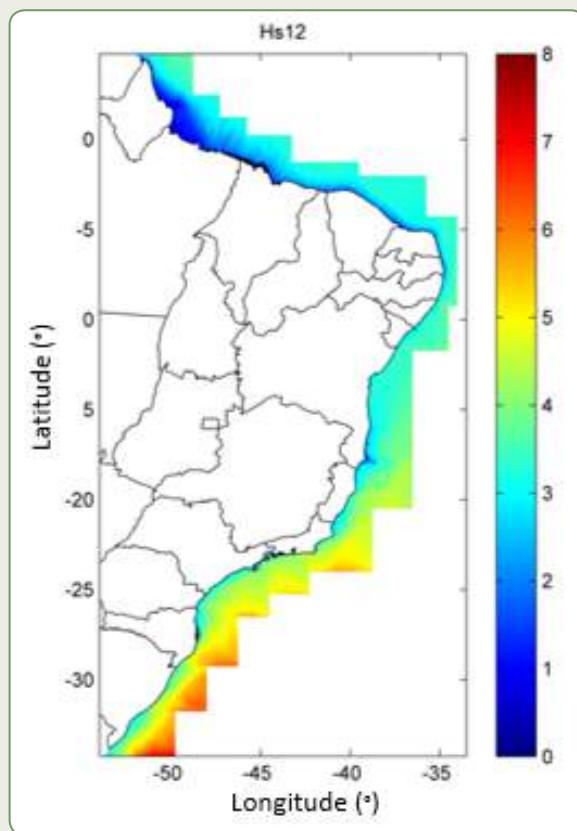


Fonte: Adaptado de Short e Klein (2016).

Ondas extremas

Para caracterizar os valores extremos de H_s na costa, o mapa de H_{s12} (altura significativa de onda excedida 12 horas ao ano) é mostrado na Figura 1.15. Como esperado, apenas a região mais ao sul recebe ondas de até 5 m. No entanto, essas ondas tendem a diminuir rapidamente devido à ação da plataforma continental. Como pode ser observado, estados de mar de até 3 m são extremamente raros na costa norte do Brasil (SHORT; KLEIN, 2016).

Figura 1.15 – Mapa dos valores de H_{s12} , em metros, ao longo da costa brasileira usando a base de dados DOW do período de 1948-2008



Fonte: Adaptado de Short e Klein (2016).

Base de dados de reanálise do nível do mar

O nível do mar é definido como a elevação instantânea da superfície do mar. Essa elevação varia temporal e espacialmente, principalmente devido aos efeitos das marés astronômica e meteorológica. A maré astronômica é produzida pelos efeitos gravitacionais da Lua, do Sol e de outros corpos celestes, enquanto a maré meteorológica é produzida pelas bruscas variações de pressão atmosférica e pelo efeito de arrasto dos ventos fortes. Sobre o nível do mar momentâneo, as ondas de gravidade viajam e chegam até a costa. Assim, a inundação é uma combinação desses três fenômenos. Na seção anterior, o *downscaling* para a costa do Brasil de 60 anos de dados de onda foi apresentado; nesta seção, para completar o banco de dados, a base de dados de reanálise de marés astronômica e meteorológica será descrita.

Além disso, são descritas duas metodologias para calcular a cota de inundação. A primeira metodologia é uma simplificação do problema e foi desenvolvida no documento “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundação costeira do Brasil” (BRASIL, 2018a). Esse documento é útil para prever uma configuração ou dimensão geral da inundação em uma área costeira. A segunda metodologia é uma análise completa da inundação em uma praia. Essa metodologia requer o uso de batimetrias detalhadas e modelos numéricos, sendo assim implementada no Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil).

Global Ocean Tides (GOT)

A base de dados de maré astronômica global, intitulada *Global Ocean Tides* (GOT) é composta por um conjunto de séries temporais horárias de 60 anos ao longo da costa brasileira. Essa base de dados foi criada com base nas constantes harmônicas TPXO *Global Tidal Solution*, desenvolvidas pela Universidade do Oregon (EGBERT; BENNETT; FOREMAN, 1994; EGBERT; EROFEEVA, 2002).

Metodologia

A base de dados GOT foi obtida seguindo os seguintes passos:

- Seleção de pontos:

Um total de 130 pontos ao longo da costa brasileira foi selecionado. Esses pontos possuem intervalos de 50 km entre eles (Figura 1.16).

Figura 1.16 – Pontos da base de dados GOT



Legenda: Distância média entre os pontos = 50 km

Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2018).

- Constantes harmônicas:

As constantes harmônicas para cada ponto selecionado foram obtidas a partir do TPXO *Global Tidal Solution*, desenvolvido pela Universidade do Oregon (EGBERT BENNETT; FOREMAN, 1994; EGBERT; EROFEEVA, 2002). O TPXO é o modelo global de marés oceânicas que melhor se ajusta no que diz respeito aos mínimos quadrados, às equações de marés de Laplace e aos dados cruzados dos

primeiros 116 ciclos orbitais do TOPEX/Poseidon. Os métodos utilizados para calcular o modelo são descritos em detalhe por Egbert, Bennett e Foreman (1994). As marés são fornecidas como complexas amplitudes de elevação da superfície do mar relativa à terra para as oito constantes harmônicas primárias (K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 , M_2 , S_2 , N_2 , K_2) em uma malha de 1440x721 com resolução espacial de 0,25°. Também são adicionadas as constantes harmônicas de longo período M_F e M_M .

- Série temporal de previsão de maré:

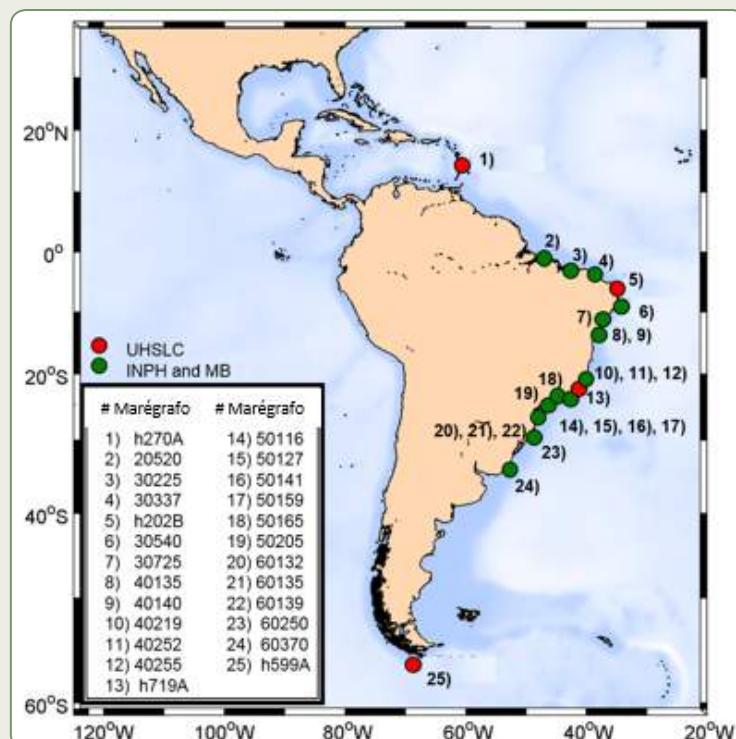
Para cada um dos pontos selecionados, uma série de 60 anos de maré foi prevista, no período de 1948-2008, por meio do *RomsTools* desenvolvido pelo Institut de Recherche pour le Développement (<http://www.romsagrif.org/>) e do programa de análise harmônica *t_tide* (PAULOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002).

Validação

A base de dados GOT foi validada com marégrafos localizados ao longo da costa brasileira. Os dados foram obtidos a partir do Centro de Nível do Mar da Universidade do Havaí (UHSLC), do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH) e da Marinha do Brasil (MB).

Os registros dos marégrafos provenientes da base de dados da UHSLC têm muitos anos de duração, abrangendo de 1940 a 2007, com uma resolução temporal horária. Mas de todo o conjunto de dados, apenas dois marégrafos estão localizados na costa brasileira, portanto outros dois marégrafos em locais mais próximos foram considerados para a validação. O primeiro está localizado ao norte, na costa do Caribe, e o segundo ao sul, na costa da Patagônia. Por outro lado, o INPH e a Marinha do Brasil possuem uma base de dados com 21 marégrafos mais bem distribuídos ao longo da costa brasileira que abrangem o período de 1955 a 2011, porém os registros têm apenas um ou dois anos. A Figura 1.17 mostra a localização dos marégrafos.

Figura 1.17 – Marégrafos distribuídos ao longo da costa brasileira



Fonte: Dos autores (2018).

A metodologia seguida no processo de validação foi:

- 1) Análises harmônicas foram feitas para cada série medida nos marégrafos, a fim de obter as amplitudes e fases de cada componente de maré. As análises harmônicas foram feitas segundo Foreman (1977), implementado no programa *t_tWide* (PAULOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002).
- 2) Com base nas constantes harmônicas, uma série temporal de um ano foi prevista. O ano selecionado foi 2000.
- 3) O ponto mais próximo da base de dados GOT para cada marégrafo foi selecionado para as validações. Se a distância entre o ponto GOT e o marégrafo fosse maior que 100 km, a validação não era realizada.
- 4) A previsão do ano 2000 foi obtida a partir de pontos GOT.
- 5) Todos os pares de séries previstos foram comparados em termos de BIAS, do Erro Quadrático Médio (RMSE), do coeficiente de regressão (ρ) e do coeficiente de correlação de Pearson (r). O Quadro 1.1 mostra a definição desses parâmetros.

Quadro 1.1 – Parâmetros estatísticos usados na validação das bases de dados

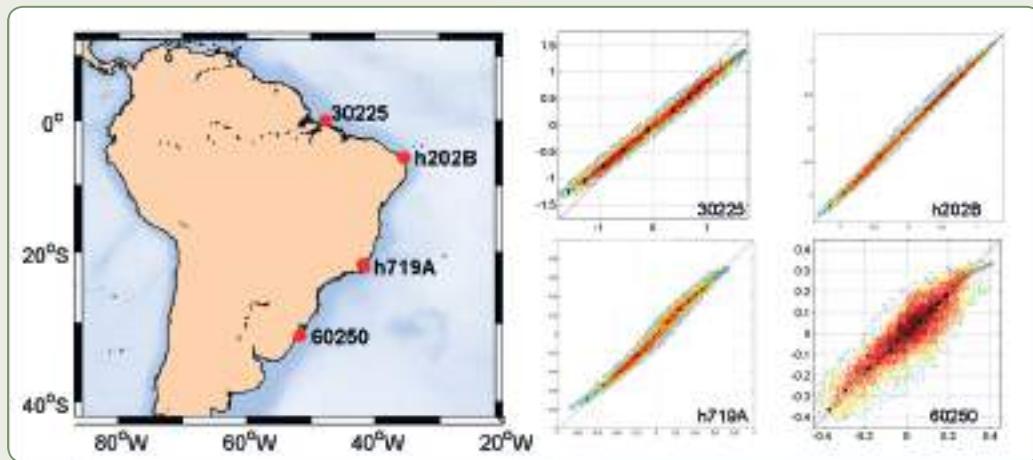
Parâmetro	Definição
BIAS	$BIAS = \bar{x} - \bar{y}$
RMSE	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$
R^2	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 + (x_i - \bar{y}_i)^2}$
ρ	$\rho = \sqrt{R^2}$
r	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$

Fonte: Dos autores (2018).

Nas 22 comparações, foi encontrado um bom ajuste entre a amplitude e a fase de cada par de séries de marés.

A Figura 1.18 mostra, como exemplo, a comparação entre a elevação da maré astronômica medida por um ano em quatro marégrafos e a série GOT, no norte, nordeste, centro e sul da costa brasileira.

Figura 1.18 – Gráficos de dispersão dos quatro marégrafos mais próximos do ponto do GOT, no norte, nordeste, centro e sul da costa brasileira



Fonte: Dos autores (2018).

O Quadro 1.2 mostra os parâmetros encontrados em cada comparação. No geral, existe um bom consenso entre as bases de dados, com $R^2 \sim 0,9$, RMSE $\sim 0,1$ e BIAS $\sim 10\text{-}4$.

Quadro 1.2 – Parâmetros estatísticos de comparação entre a base de dados GOT e os marégrafos

Marégrafo	R^2	RMSE	BIAS
20520	0,871	0,520	0,00025
30225	0,955	0,179	-0,00020
30337	0,974	0,116	-0,00001
30540	0,979	0,094	0,00013
30725	0,976	0,086	-0,00012
40135	0,920	0,196	0,00024
40140	0,952	0,138	0,00008
40219	0,781	0,217	-0,00044
40252	0,976	0,060	-0,00003
40255	0,963	0,074	0,00066
50116	0,894	0,111	-0,00016
50127	0,864	0,137	0,00053
50141	0,940	0,071	-0,00022
50159	0,900	0,093	0,00132
50165	0,844	0,137	-0,00096
50205	0,943	0,069	0,00034
60132	0,803	0,238	-0,00040
60135	0,895	0,119	-0,00037
60139	0,733	0,350	-0,00018
60250	0,797	0,082	0,00038
60370	0,642	0,091	0,00016
h270A	0,964	0,028	0,0002
h202B	0,993	0,054	-0,0003
h719A	0,967	0,059	-0,0003
h599A	0,983	0,046	0,0004

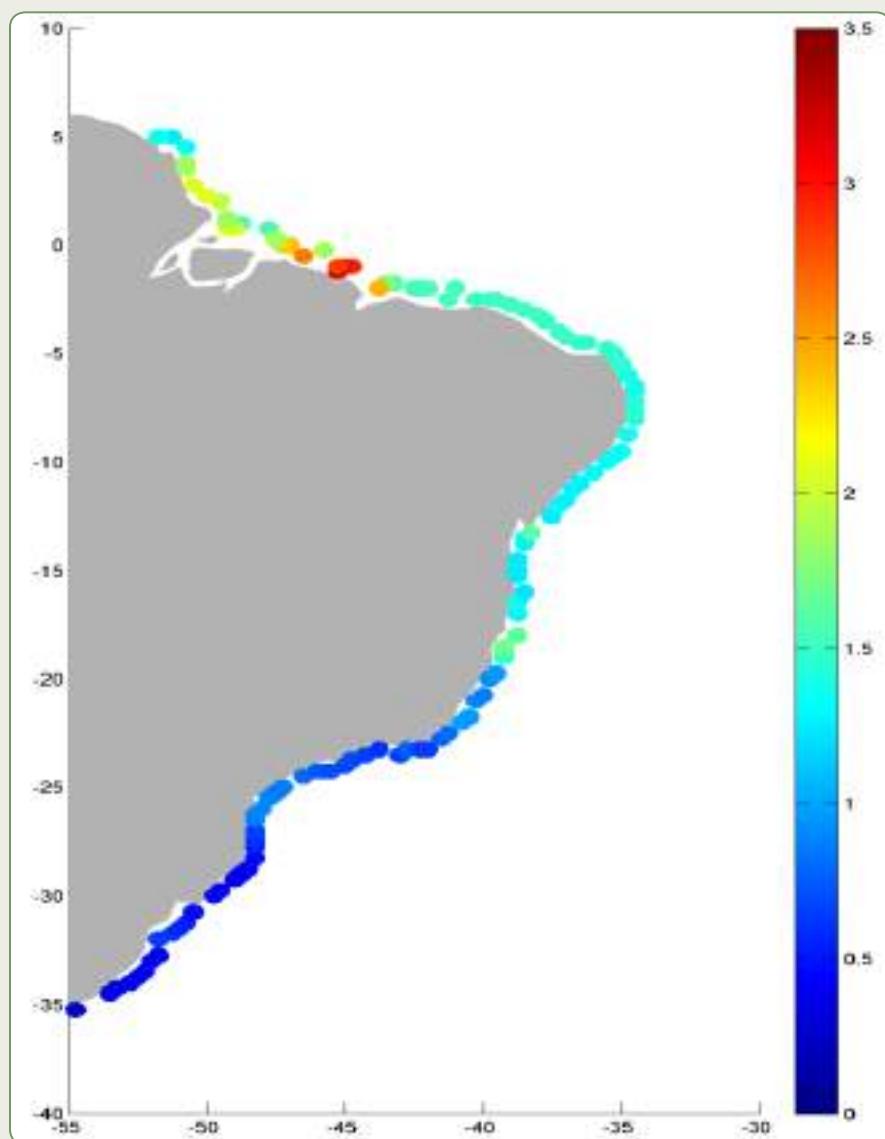
Fonte: Dos autores (2018).

Caracterização da maré astronômica ao longo da costa brasileira

A caracterização da maré astronômica ao longo da costa brasileira foi realizada através da base de dados GOT previamente validada. A base de dados consiste em uma série temporal de maré astronômica de 1948 a 2008 (60 anos).

A Figura 1.19 mostra a elevação máxima da maré (aproximadamente metade da amplitude da maré) alcançada em todos os pontos da base de dados GOT. Como pode ser visto, a elevação diminui para o sul, e a máxima está localizada ao norte do estado do Maranhão. A Figura 1.20 mostra, como exemplo, a função de distribuição de três desses pontos localizados ao norte, centro e sul da costa brasileira.

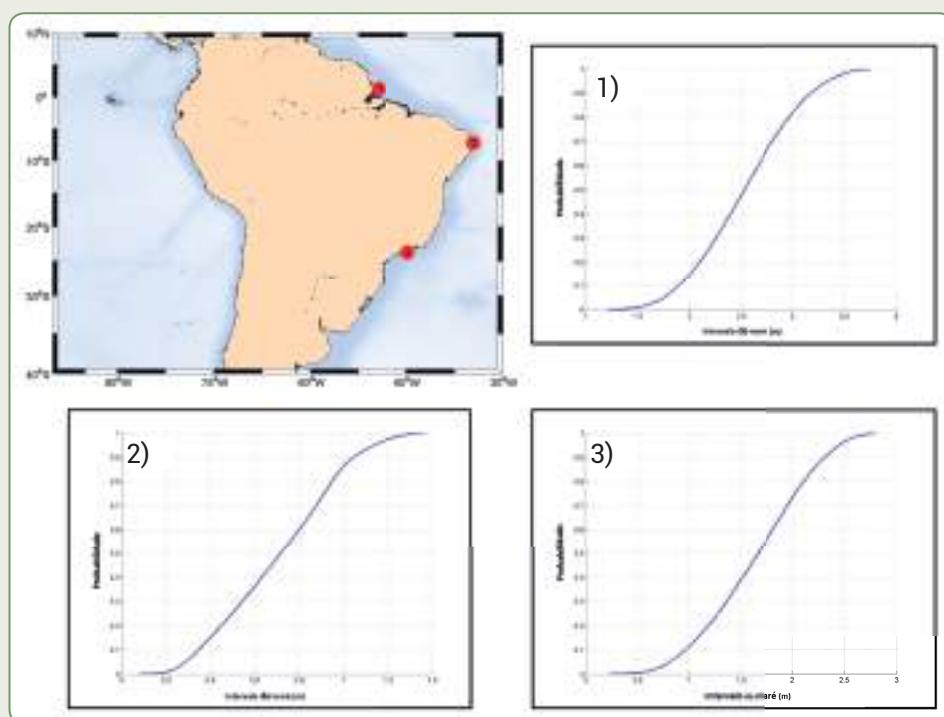
Figura 1.19 – Elevação máxima da maré astronômica da base de dados GOT ao longo da costa brasileira para o período de 1948-2008



Legenda: Elevação em metros

Fonte: Dos autores (2018).

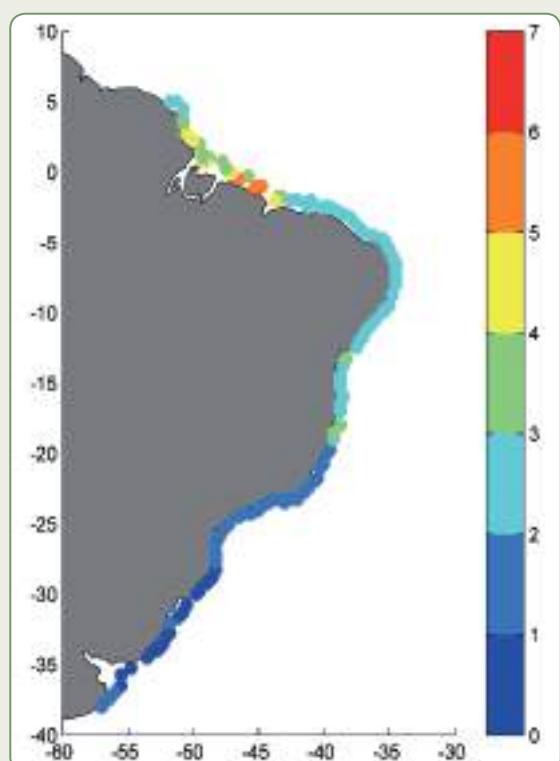
Figura 1.20 – Funções de distribuição da elevação, em metros, da maré astronômica em três pontos ao longo da costa brasileira



Legenda: 1) norte, 2) sul e 3) centro

Fonte: Dos autores (2018).

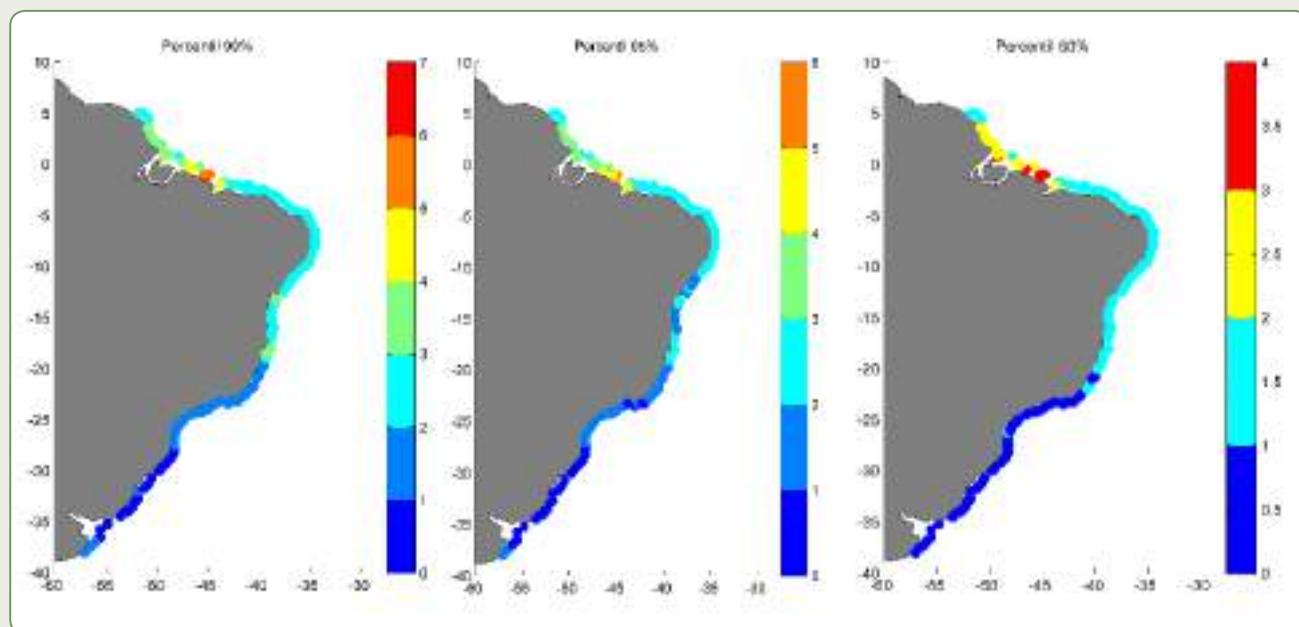
Figura 1.21 – Amplitude máxima, em metros, da maré astronômica ao longo da costa brasileira a partir da base de dados GOT para o período de 1948-2008



Fonte: Short e Klein (2016).

A elevação da maré é medida a partir do nível médio do mar; entretanto, determinar esse nível na costa não é uma tarefa simples. Portanto, é conveniente usar a amplitude de maré para caracterizar o comportamento da maré na costa. A amplitude da maré é definida entre uma maré alta e baixa consecutivas. A Figura 1.21 mostra valores máximos de amplitude de maré. Na Figura 1.22, são apresentadas as amplitudes de maré astronômica superada em 1, 5 e 50% do tempo, que corresponde ao percentual de 99, 95 e 50%.

Figura 1.22 – Amplitude, em metros, da maré astronômica superada em 1% (à esquerda), 5% (ao centro) e 50% (à direita) do tempo para o período de 1948-2008 da base de dados GOT para a costa brasileira



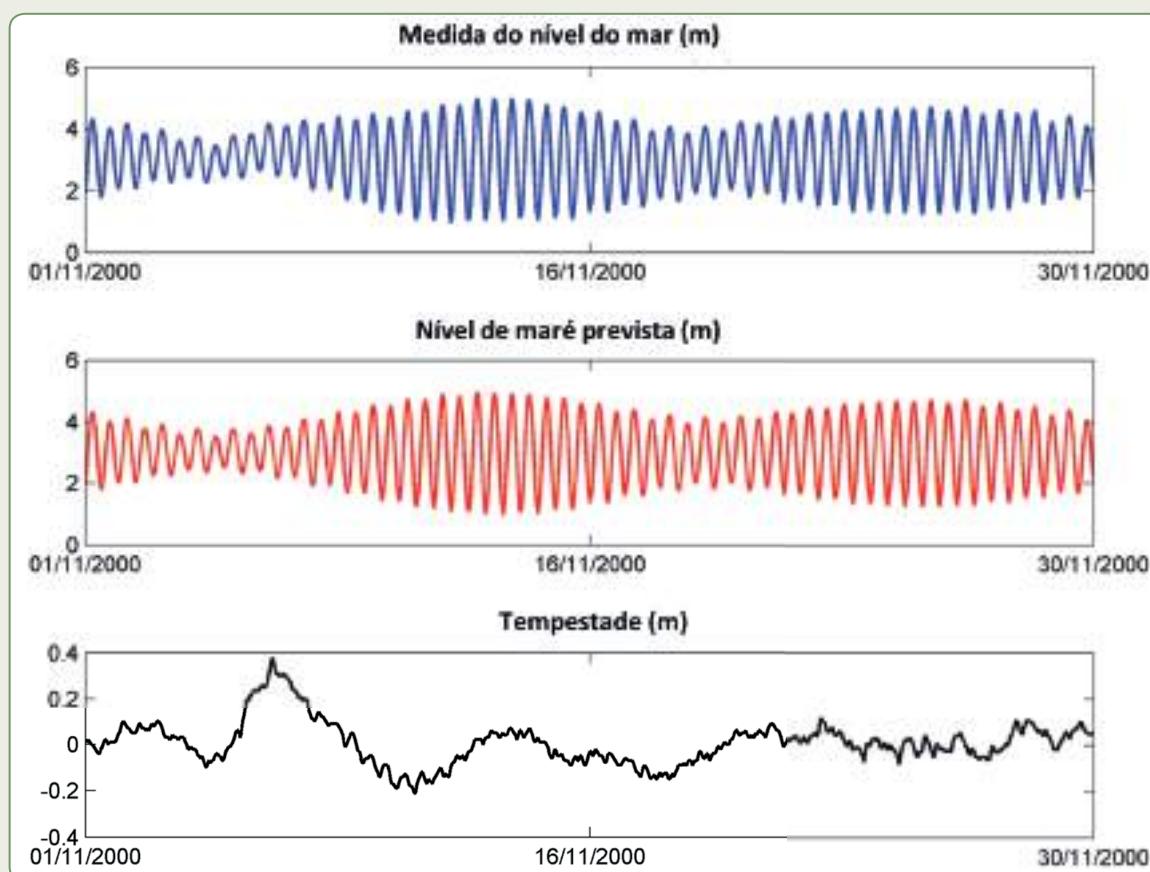
Fonte: Dos autores (2018).

Global Ocean Surge (GOS)

As marés meteorológicas são causadas por uma zona de baixa pressão e ventos fortes, produzindo um aumento do nível do mar na costa. É fundamental considerar esta variabilidade do nível do mar para o cálculo da cota de inundação na costa.

A variação no nível do mar gerada pela maré meteorológica pode ser obtida subtraindo a maré medida pelos marégrafos da maré astronômica prevista (Figura 1.23). Porém, dados medidos fornecidos pelas redes de medição são escassos e apresentam várias limitações, tanto em termos espaciais como temporais (CID et al., 2014). Para superar essas limitações, os modelos numéricos tornaram-se ferramentas úteis para a geração de bases de dados de alta resolução e de longo prazo (SHORT; KLEIN, 2016).

Figura 1.23 – Exemplo de uma série de maré meteorológica (inferior) obtida a partir da subtração de dados de um marégrafo (superior) e da previsão de maré (centro)



Fonte: Dos autores (2018).

Assim sendo, a base de dados de maré meteorológica GOS foi obtida por meio de simulação numérica e foi validada usando séries de marégrafos.

Metodologia

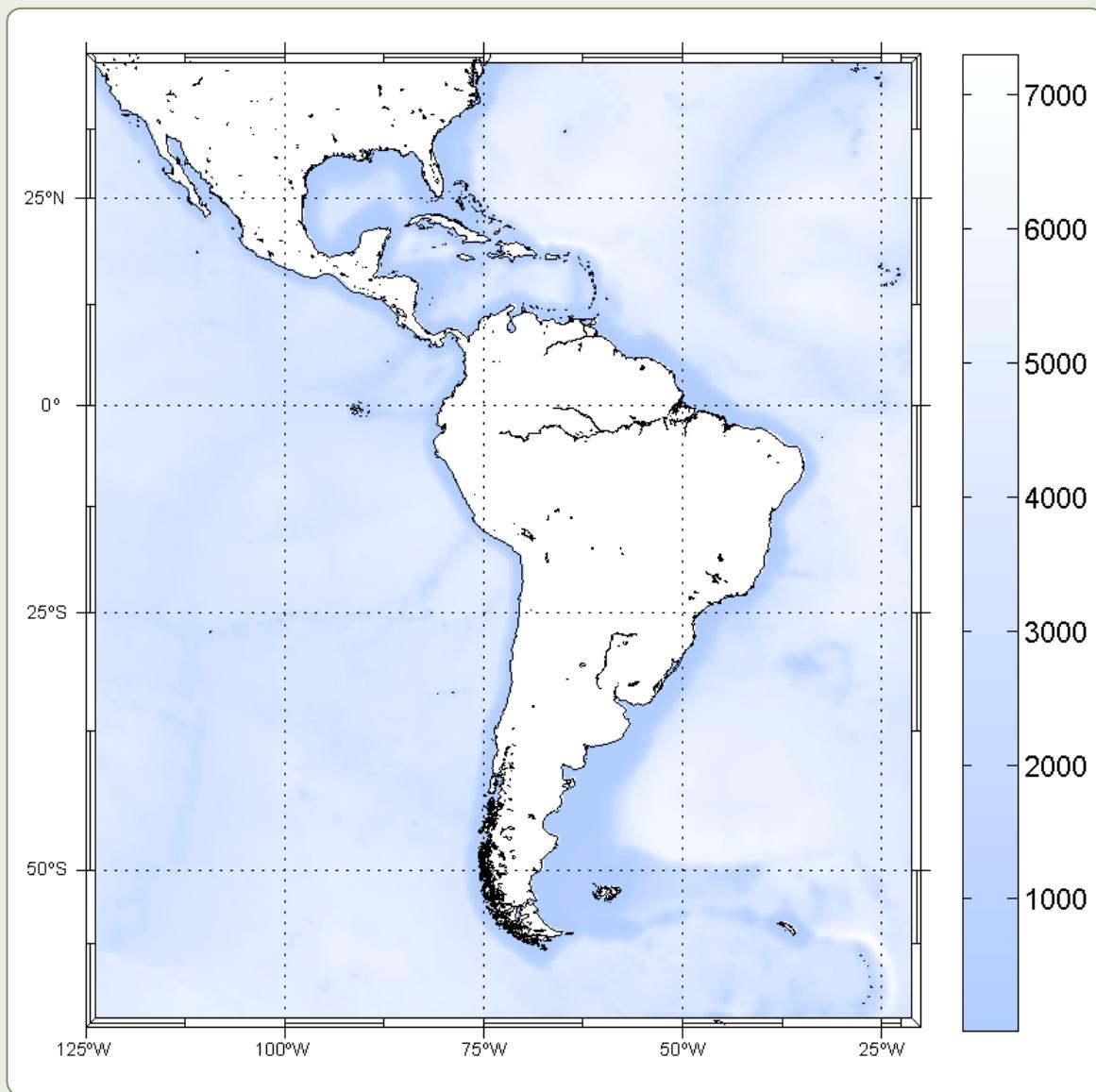
Marés meteorológicas foram simuladas usando o *Regional Ocean Model System* (ROMS) desenvolvido pela Universidade de Rutgers. ROMS é um modelo oceânico tridimensional, de superfície livre e com sistema de coordenadas verticais do tipo influenciada pelo terreno (*terrain-following*), que resolve as equações médias de Navier-Stokes (*Reynolds-averaged Navier Stokes equations* – RANS) usando o balanço do *momentum* vertical hidrostático e a aproximação de Boussinesq com um algoritmo de passo de tempo explícito fracionado (HAIDVOGEL et al., 2000; SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005; HAIDVOGEL et al., 2008). Utiliza uma malha curvilínea horizontal do tipo Arakawa C e coordenadas verticais do tipo influenciadas pelo terreno (*terrain-following*).

O modelo foi configurado para o Atlântico Sul cobrindo a área mostrada na Figura 1.24, que se estende de 65°S a 35°N em latitude e de 20°W a 125°W em longitude com uma resolução horizontal de 0,25°. A batimetria foi extraída da base de dados ETOPO 2, uma topografia global com resolução de 2 min, derivada de sondagens de profundidade oceânica e observações de gravidade por satélite (SMITH; SANDWELL, 1997).

Neste estudo, o modelo ROMS é executado em modo barotrópico. O efeito do barômetro invertido é imposto nos limites abertos do domínio, usando a condição de Chapman de superfície livre e a condição de *2D Flather* para o *momentum*.

O modelo é conduzido com dados meteorológicos de 6 h de vento e pressão atmosférica fornecida pelo *downscaling* dinâmico da reanálise do NCEP/NCAR. Essa reanálise tem uma resolução espacial de $1,9041^{\circ}$ em latitude e $1,875^{\circ}$ em longitude por um período de 60 anos (1948-2008).

Figura 1.24 – Batimetria utilizada na simulação da base de dados GOS

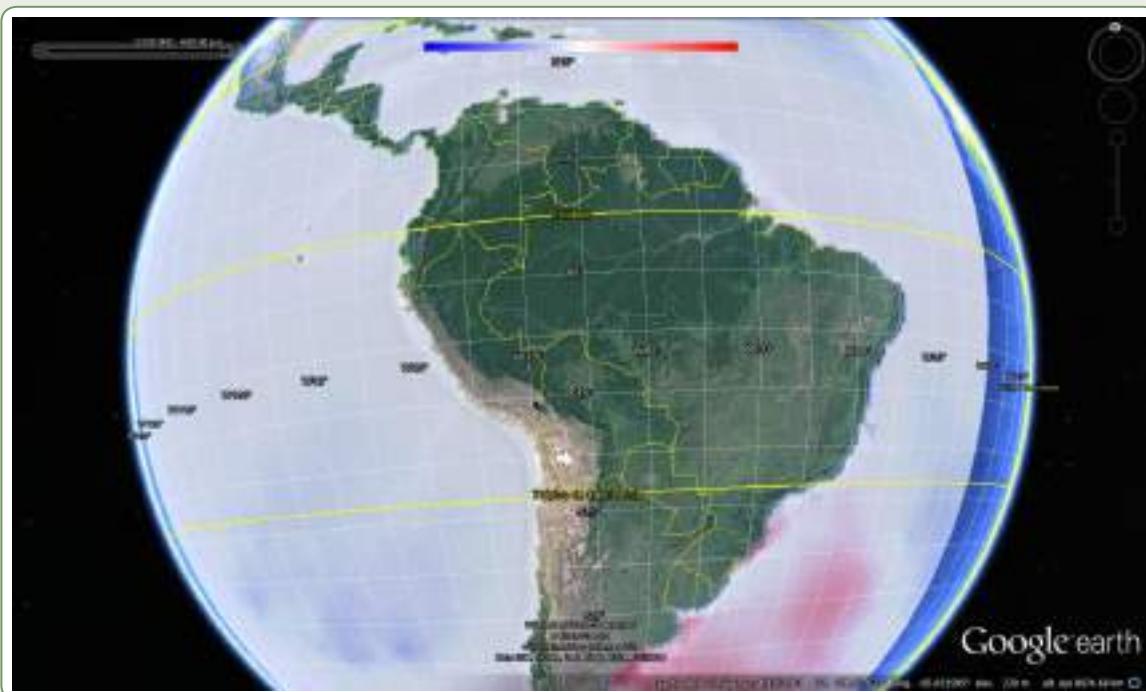


Legenda: Resolução = $0,25^{\circ}$

Fonte: Dos autores (2018).

A Figura 1.25 mostra um exemplo de elevação da superfície do mar devido a uma maré meteorológica.

Figura 1.25 – Mapa de elevação da superfície do mar devida a maré meteorológica (base de dados GOS) em 19 dez. 1992, 4:00 am



Fonte: Dos autores (2018).

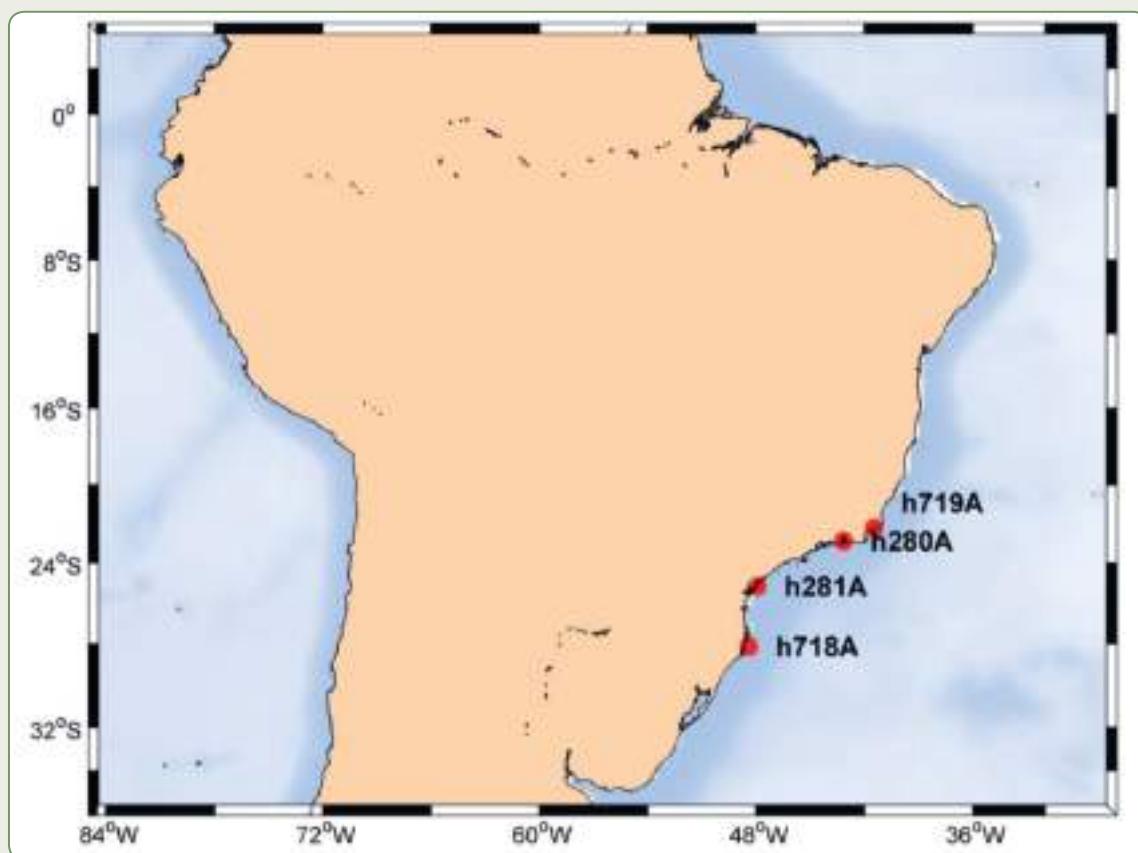
Validação

Os resultados dos modelos são validados usando medidas *in situ* dos marégrafos locais. Os registros de marégrafos são da UHSLC, INPH e Marinha do Brasil. Embora existam diversos marégrafos, eles não foram considerados para validação porque sua posição e qualidade não estavam adequadas para uma validação representativa da base de dados GOS. A Figura 1.26 apresenta a localização dos marégrafos disponíveis para validação. Esses marégrafos também se encontram a uma distância menor que 0,5° do ponto mais próximo na base de dados GOS.

O procedimento para obter a série de maré meteorológica a partir dos marégrafos foi o seguinte:

- 1) A análise harmônica foi feita para os marégrafos aplicando a técnica Foreman (1977) implementada no pacote *t_tide* (PAULOWICZ; BEARDSLEY; LENTZ, 2002).
- 2) A maré astronômica foi prevista para o mesmo período do marégrafo usando as constantes harmônicas previamente obtidas.
- 3) As séries de marés meteorológicas foram obtidas subtraindo a série do marégrafo e a previsão.
- 4) Cada par de séries foi comparado em termos de BIAS, RMSE, coeficiente de regressão (ρ) e coeficiente de correlação de Pearson (r). O Quadro 1.1 mostra a definição desses parâmetros.

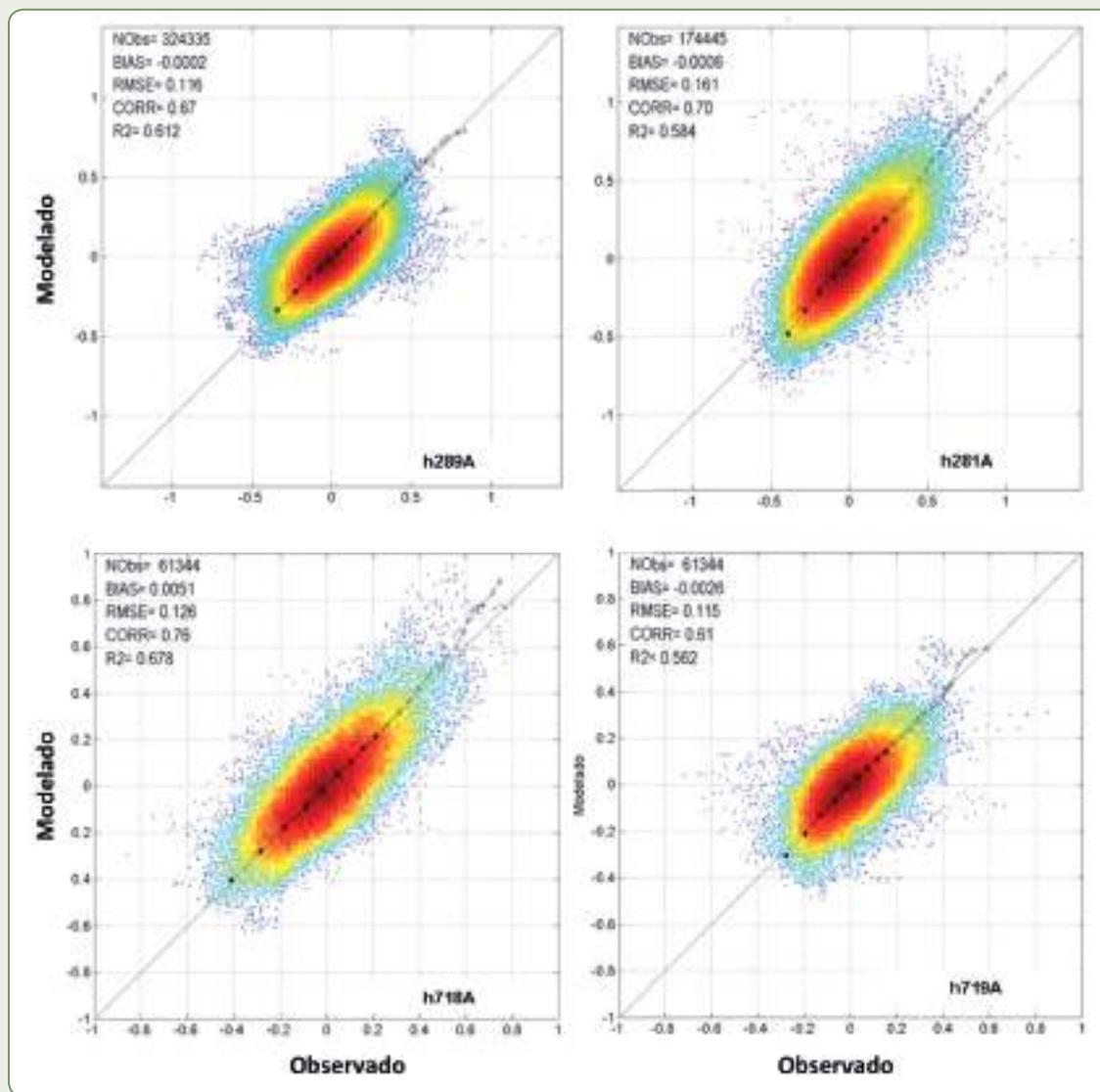
Figura 1.26 – Marégrafos utilizados para a validação da base de dados GOS



Fonte: Dos autores (2018).

A Figura 1.27 mostra gráficos de dispersão para as quatro comparações. A maioria dos dados (áreas vermelhas) estão em torno da bissetriz, embora pequenas discrepâncias sejam observadas na parte superior da distribuição. Essas discrepâncias são devidas a efeitos locais relacionados à batimetria. A cor indica a densidade das comparações, e alguns parâmetros estatísticos são mostrados. Existe uma boa concordância entre as séries observadas e simuladas, com RMSE ~ 10 cm, BIAS próximo a zero e R² ~ 0,6.

Figura 1.27 – Gráficos de dispersão da série GOS e séries de marés meteorológicas dos quatro marégrafos



Legenda: O número de observações e estatísticas é mostrado na parte superior dos gráficos. As cores indicam a densidade de observações, e a linha preta do gráfico, os quantis. NObs = Número de observações. RMSE (Root Mean Square Error) = Erro Quadrático Médio. CORR = Coeficiente de Correlação de Pearson. R² = Porcentagem de ajuste entre duas variáveis

Fonte: Dos autores (2018).

Variabilidade espacial

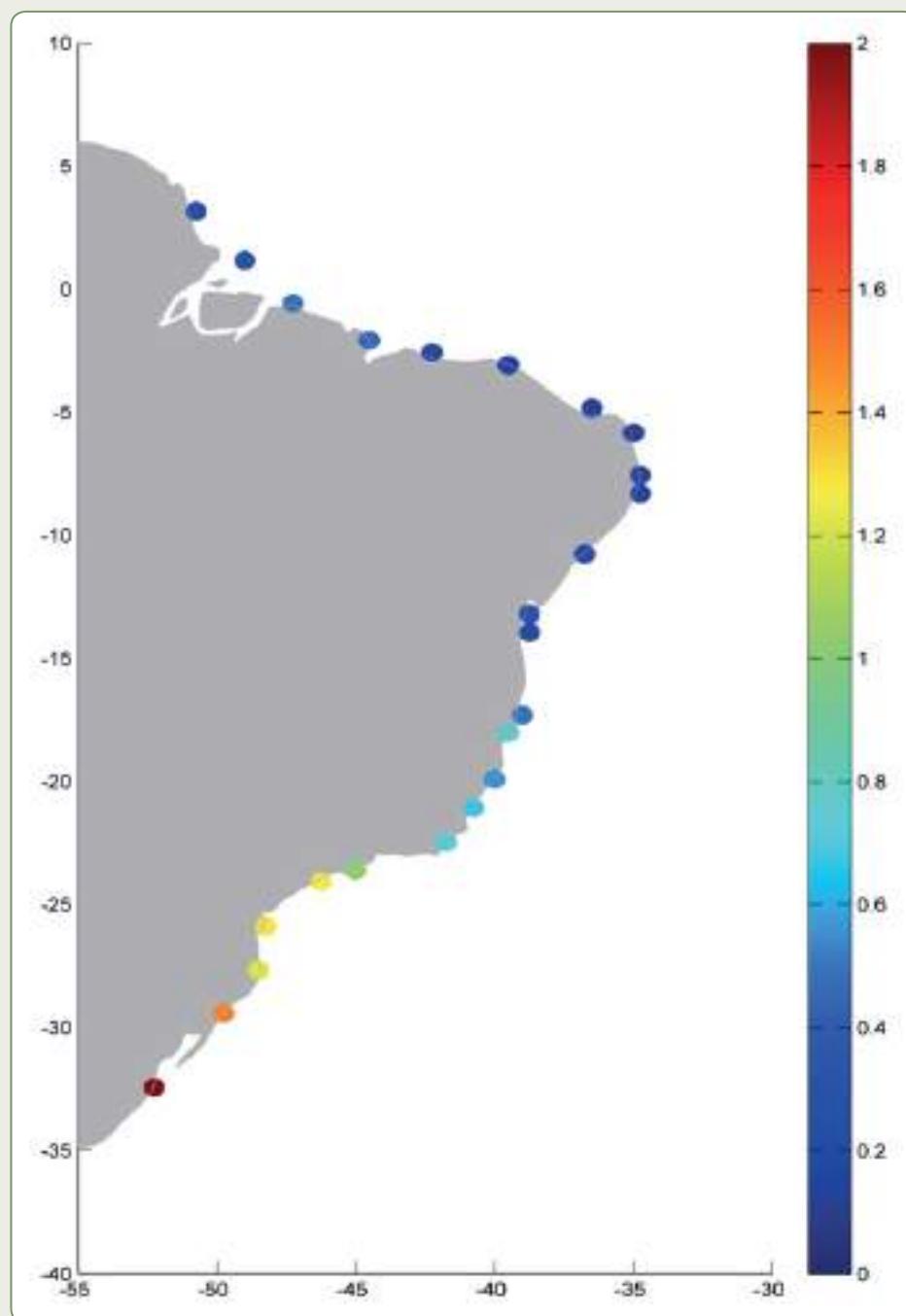
Para caracterizar a base de dados GOS ao longo da costa brasileira foram calculadas as seguintes variáveis: elevação máxima histórica, média e desvio padrão da elevação e elevação superada em 50, 10 e 1% do tempo.

A Figura 1.28 mostra a elevação histórica máxima ao longo da costa brasileira. As elevações mínimas são encontradas na costa norte (menos de 0,5 m), enquanto que no sul atingem os valores máximos (maiores que 2 m) devido à exposição a tempestades extratropicais. Parise, Calliari e Krusche (2009) mostraram que as maiores elevações do nível do mar por maré meteorológicas no sul estão relacionadas aos ventos de sudoeste. Machado et al. (2010) encontraram quatro padrões dessas situações sinóticas, os três primeiros confirmaram as observações de Parise Calliari e Krusche (2009) e o quarto está relacionado a um sistema de alta pressão.

Os valores médios estão próximos de zero (Figura 1.29), embora haja uma tendência de valores negativos no norte e nordeste e positivos no sul. Os negativos apresentam uma dominância das zonas de alta pressão, enquanto para os positivos observam-se as tempestades extratropicais no Atlântico Sul.

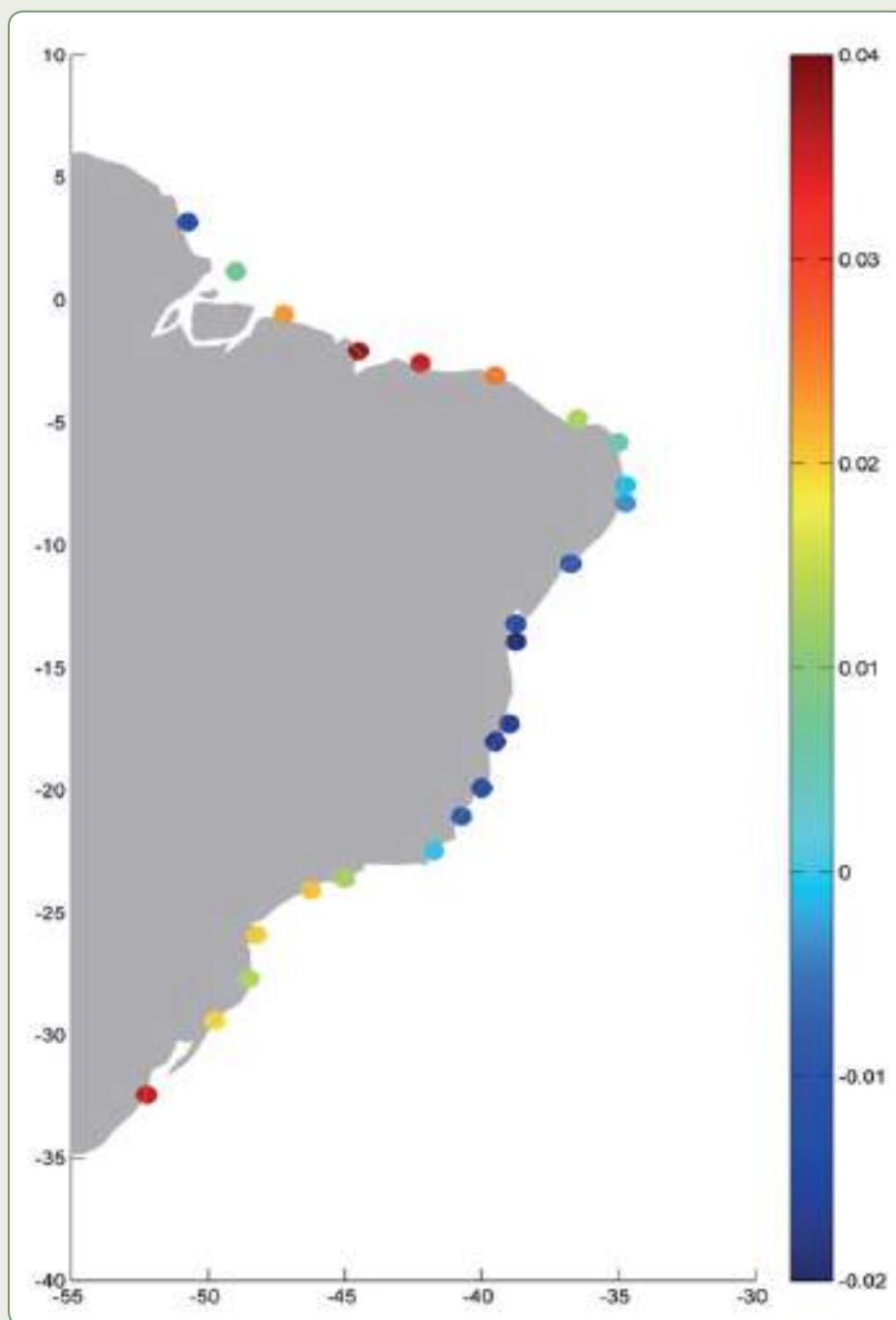
O desvio padrão (Figura 1.30) apresenta uma medida da variação espacial das marés meteorológicas. Na região norte, a maré meteorológica é menor que 15 cm, já na região sul pode chegar a 40 cm. Além disso, na Figura 1.31, são apresentadas as alturas de maré meteorológica que excedem 1, 5 e 50% do tempo.

Figura 1.28 – Elevação máxima, em metros, da maré meteorológica obtida a partir da base de dados GOS para o período de 1948-2008



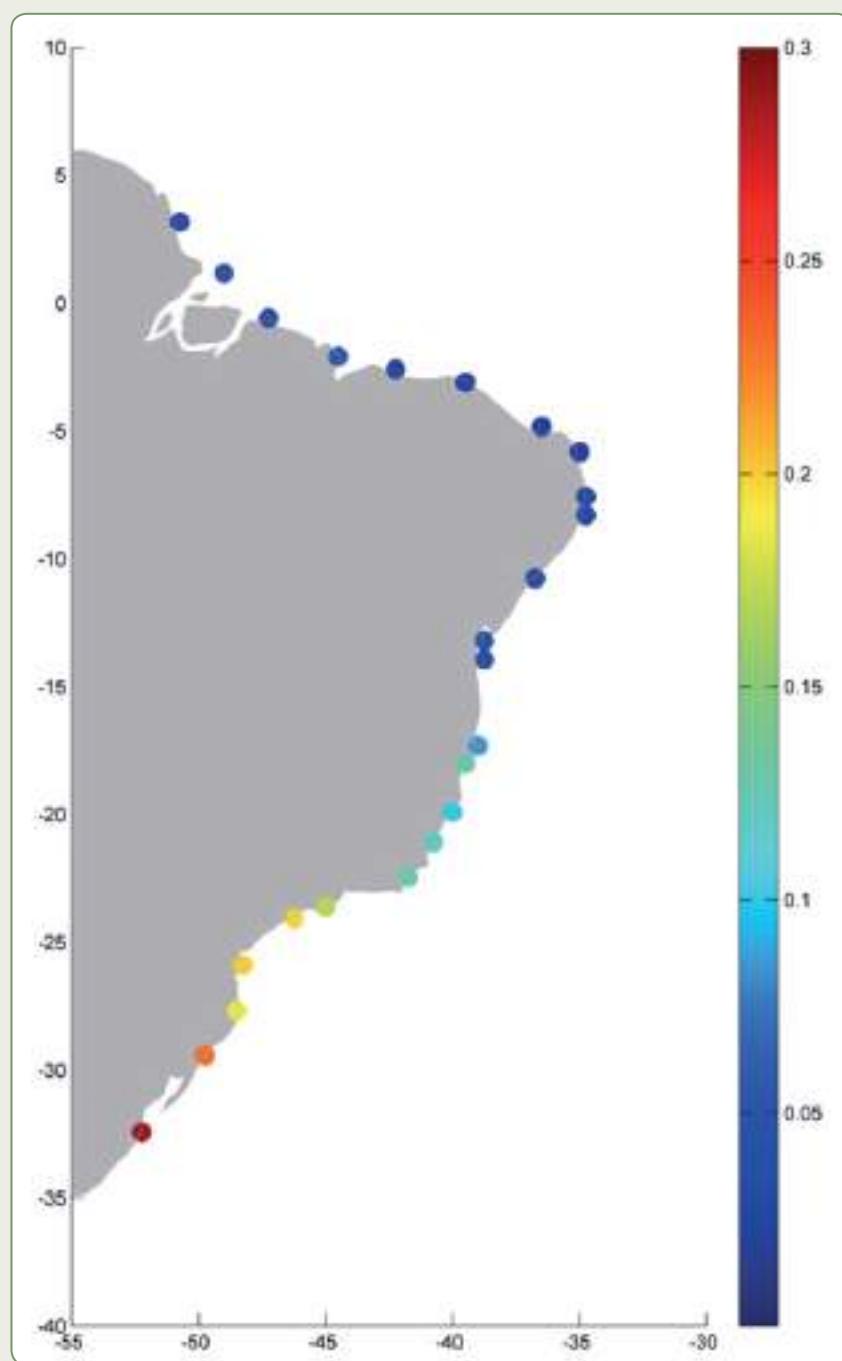
Fonte: Dos autores (2018).

Figura 1.29 – Elevação média, em metros, da maré meteorológica obtida ao longo da costa brasileira a partir da base de dados GOS para o período de 1948-2008



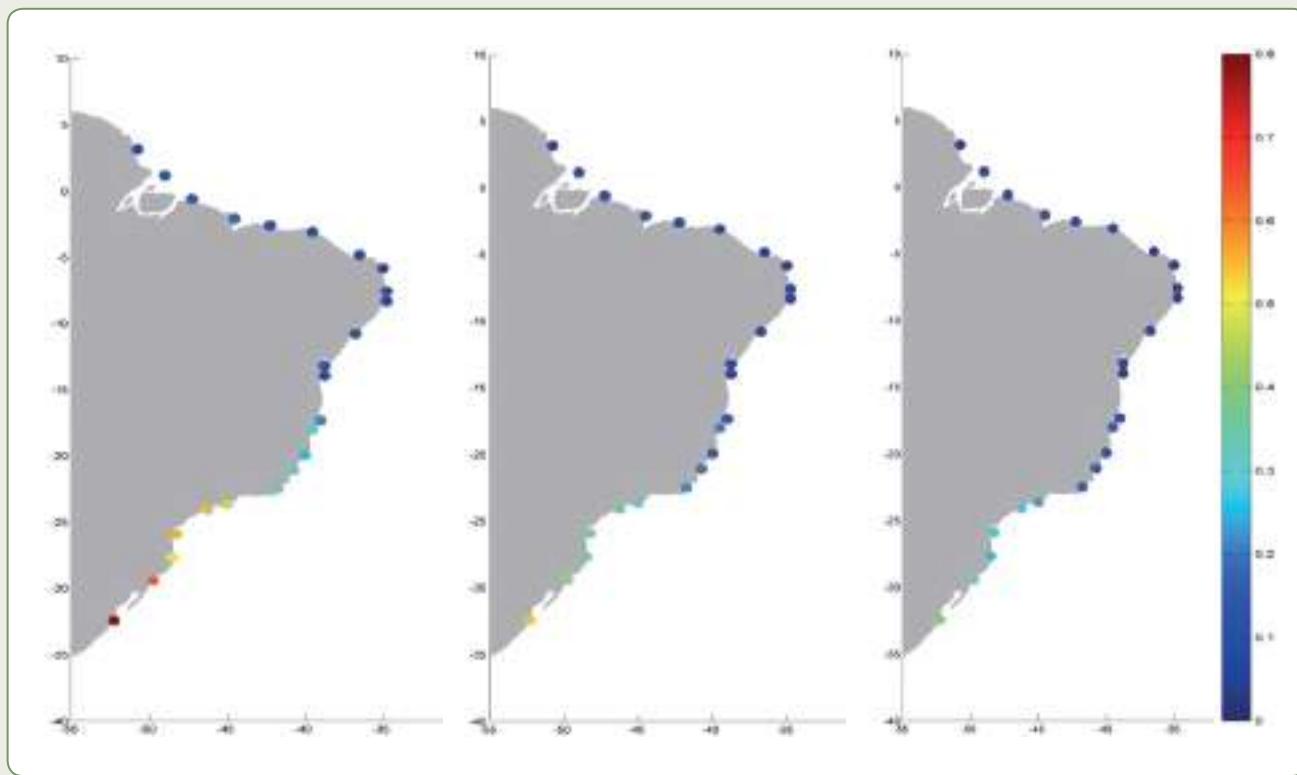
Fonte: Dos autores (2018).

Figura 1.30 – Desvio padrão da elevação, em metros, da maré meteorológica obtida a partir da base de dados GOS para o período de 1948-2008



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 1.31 – A elevação da maré, em metros, superada 10% (direita), 5% (centro) e 1% (esquerda) do tempo para o período 1948-2008, obtida a partir da base de dados GOS



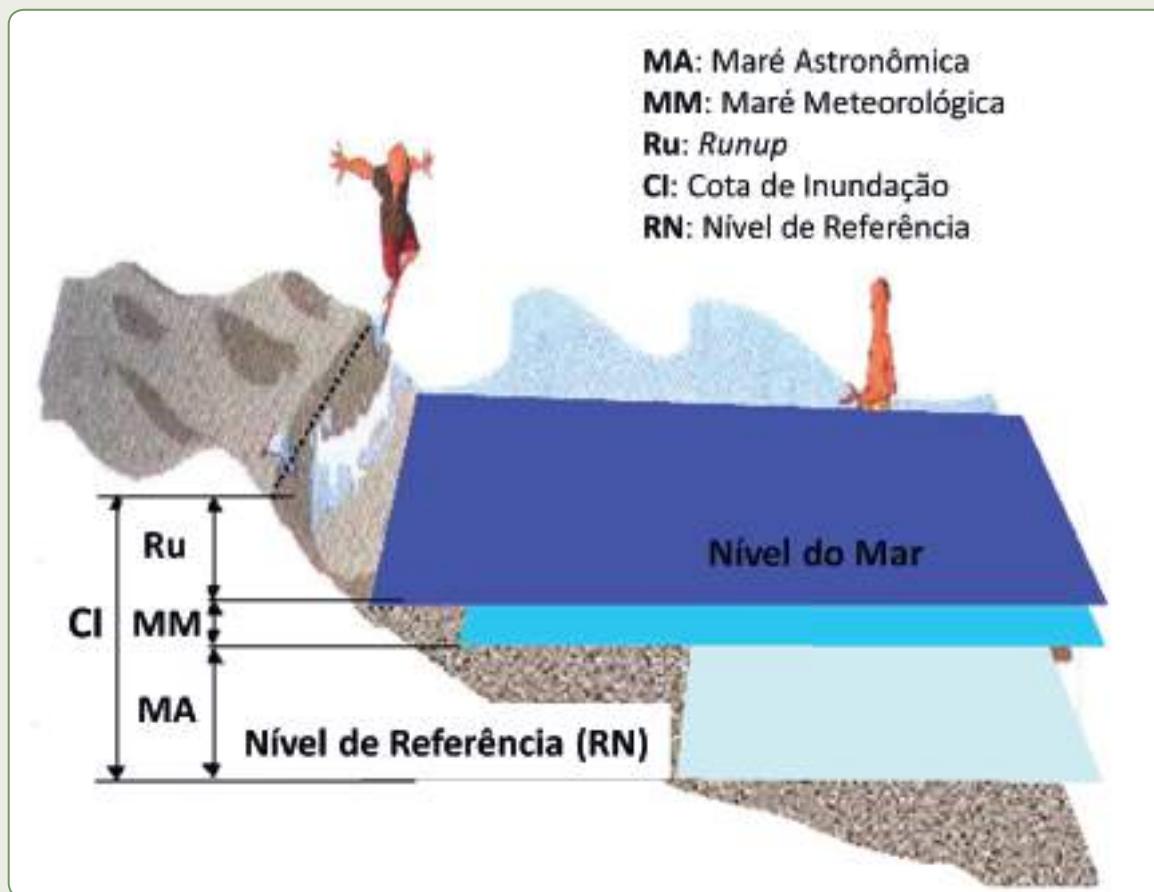
Fonte: Dos autores (2018).

Inundação costeira

A determinação da cota de inundação em uma praia requer a consideração de diversas variáveis meteorológicas e oceanográficas e a interação entre elas. Essas variáveis se modificam espacial e temporalmente e interagem com a morfologia da praia. As variáveis mais importantes são a maré astronômica, a maré meteorológica e o nível mais alto alcançado pelas ondas de gravidade geradas pelo vento sobre o perfil praial (*runup*).

A cota de inundação em um instante de tempo pode ser definida como a elevação sobre um nível de referência (RN) produzida pela combinação do nível do mar instantâneo e do *runup* (Ru). O nível do mar é a combinação da elevação da maré astronômica (MA) e da maré meteorológica (MM), como mostra a Figura 1.32. Alguns dos fatores que afetam a maré meteorológica e o *runup* são aleatórios e têm uma probabilidade de ocorrência. Portanto, a determinação da cota de inundação é um problema estocástico. A consequência é que é impossível calcular uma cota de inundação determinística e, portanto, a probabilidade de ocorrência deve estar associada a cada tempestade específica. A associação da cota de inundação com uma probabilidade é fundamental para o desenho de estruturas, para a delimitação de domínios públicos, para a proteção dos ecossistemas costeiros etc. (SHORT; KLEIN, 2016).

Figura 1.32 – Fatores que definem a cota de inundação



Fonte: Adaptado de GIOC (2003).

Nesta seção, são descritas duas metodologias para calcular a cota de inundação e a probabilidade associada. A primeira é a simplificação do problema e fornece informações gerais sobre as inundações nas zonas costeiras. Esses resultados podem ser utilizados para obter valores aproximados da inundação de forma rápida e simples. Para tal, o documento “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundação costeira do Brasil” (BRASIL, 2018a), que resume esses resultados, foi elaborado. O segundo é complexo e considera todos os processos dinâmicos e variáveis morfológicas. Esse método deve ser aplicado a uma praia específica para avaliação de inundações locais.

Metodologia simplificada para a cota de inundação

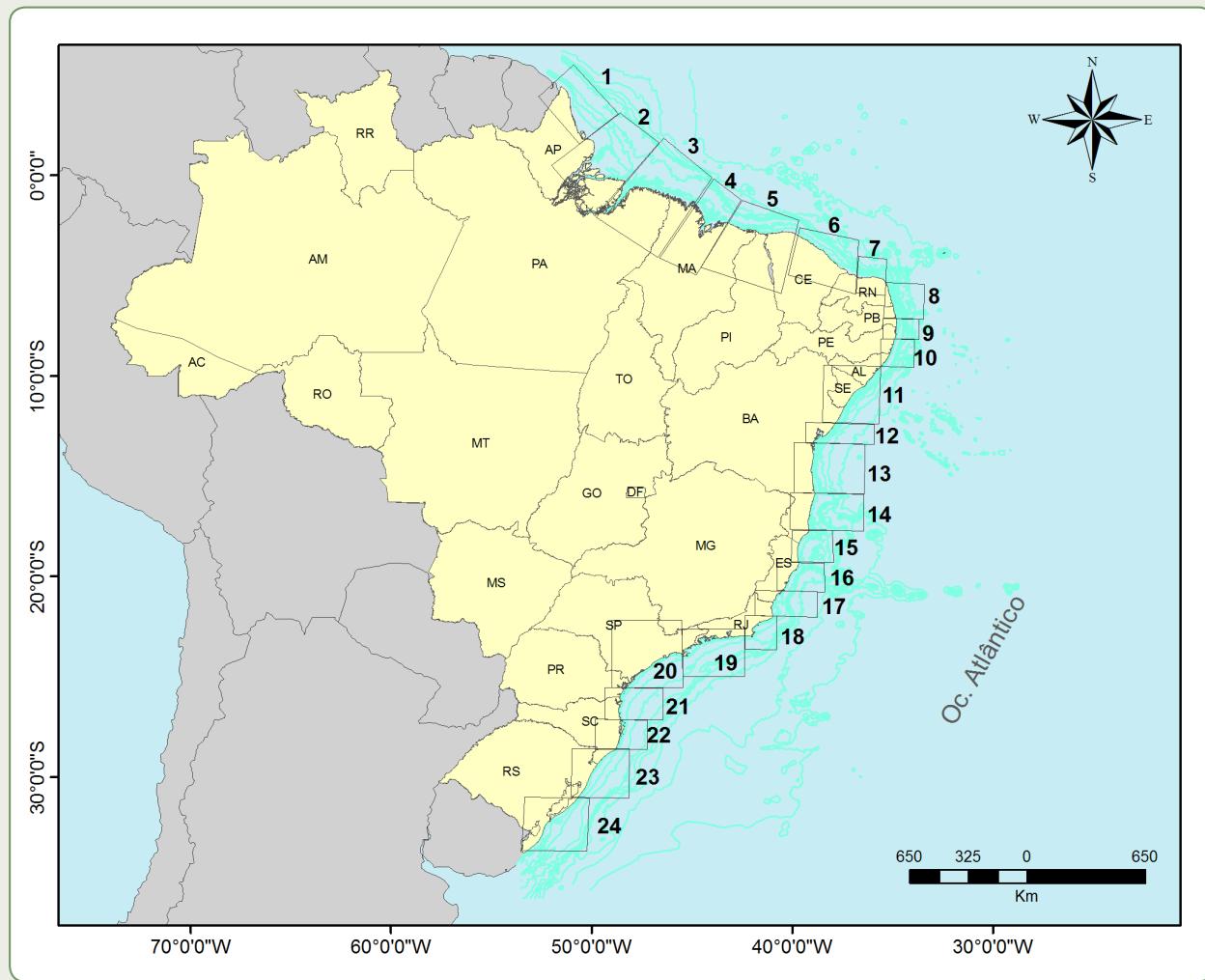
Os resultados obtidos com a aplicação dessa metodologia são utilizados para uma primeira estimativa aproximada de cota de inundação e estão disponíveis em *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundação costeira do Brasil* (BRASIL, 2018a). Esse documento fornece uma caracterização das inundações em áreas ao longo da costa brasileira, considerando diferentes orientações e perfis de praia.

Essa metodologia utiliza a maré astronômica, a maré meteorológica e as bases de dados de ondas de gravidade geradas pelo vento descritas anteriormente para os cálculos, como forçantes. No caso de ondas geradas pelo vento é necessário propagá-las de águas profundas para águas rasas, e encontrar a zona de quebra. Para fazer uma propagação simplificada utilizou-se a aproximação de Snell.

A metodologia utilizada é uma modificação da metodologia utilizada para o cálculo da inundação ao longo da costa espanhola (GIOC, 2003). Ela é resumida da seguinte forma:

- 1) Compartimentalização do litoral brasileiro de acordo com características morfológicas e dinâmicas. No morfológico, a orientação principal da linha de costa e a batimetria foram levadas em consideração devido à aproximação de Snell. Em seguida, foram consideradas as características dinâmicas como a amplitude de maré e o comportamento das ondas. A Figura 1.33 mostra a compartimentalização das zonas.

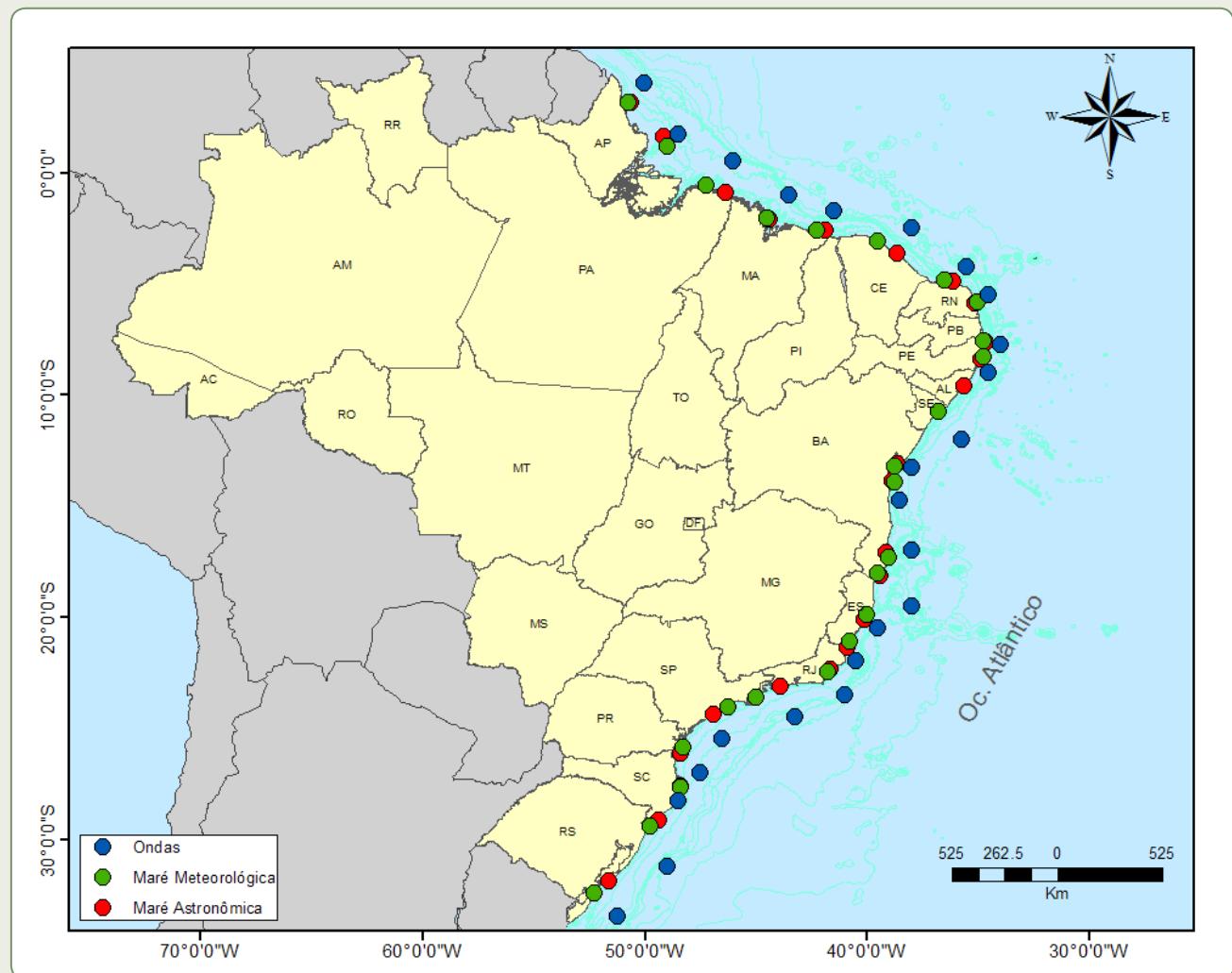
Figura 1.33 – As 24 zonas consideradas para o documento *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundação costeira do Brasil* (BRASIL, 2018a)



Fonte: Brasil (2018a).

- 2) Para cada área foi selecionado um valor de maré astronômica, um de maré meteorológica e uma série de ondas como representantes da área, com base nas bases de dados de reanálise (GOT, GOS e DOW, respectivamente) previamente descritas. A Figura 1.34 mostra a posição das séries temporais selecionadas para cada área.
- 3) Foram determinadas as orientações e os perfis de cada praia em cada área, de forma a definir as orientações mais comuns por área e a declividade típica dos perfis de praias dissipativas e refletivas.

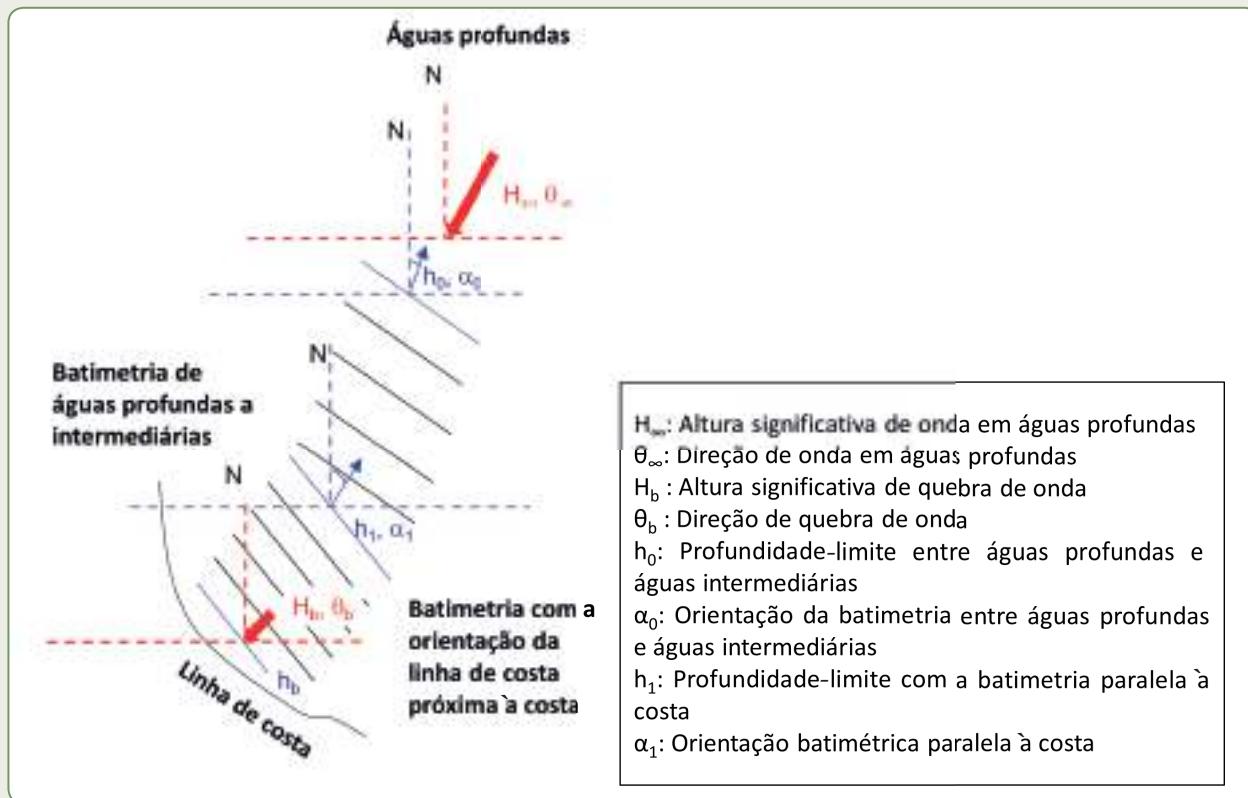
Figura 1.34 – Posição das séries temporais de maré astronômica GOT (vermelho), de maré meteorológica GOS (verde) e de ondas DOW (azul) selecionadas para cada área



Fonte: Brasil (2018a).

- 4) As séries temporais de 60 anos de dados de ondas de águas profundas foram propagadas usando a aproximação de Snell à profundidade de quebra. Essa aproximação leva em conta o empinamento e a refração, mas não a difração. Esse método assume as isóbatas retas e paralelas ao longo da propagação. Portanto, para tornar mais realista a propagação, consideraram-se dois setores com diferentes orientações de batimetria na propagação, conforme mostra a Figura 1.35. A profundidade de quebra (h_b) foi definida com base no parâmetro adimensional $H_b / h_b = 0,8$, onde H_b é a altura de quebra da onda.

Figura 1.35 – Esquema de dois setores de propagação de ondas de Snell



Fonte: Adaptado de Brasil (2018a).

- 5) O *runup* ($R_{2\%}$) foi estimado como a elevação superada por 2% das ondas com base na formulação proposta por Nielsen e Hanslow (1991). Esse modelo diferencia as praias refletivas ($\tan \beta > 0,1$) das dissipativas ($\tan \beta < 0,1$)

$$R_{2\%} = 1,98z$$

onde:

$$z = 0,47(H_b L_0)^{0,5} \tan \beta_F \text{ para } \tan \beta_F > 0,1 \quad (\text{Eq. 4})$$

$$z = 0,04 (H_b L_0)^{0,5} \text{ para } \tan \beta_F < 0,1 \quad (\text{Eq. 5})$$

e H_b é a altura de quebra da onda, L_0 é o comprimento de onda em águas profundas e $\tan \beta$ é a declividade da praia.

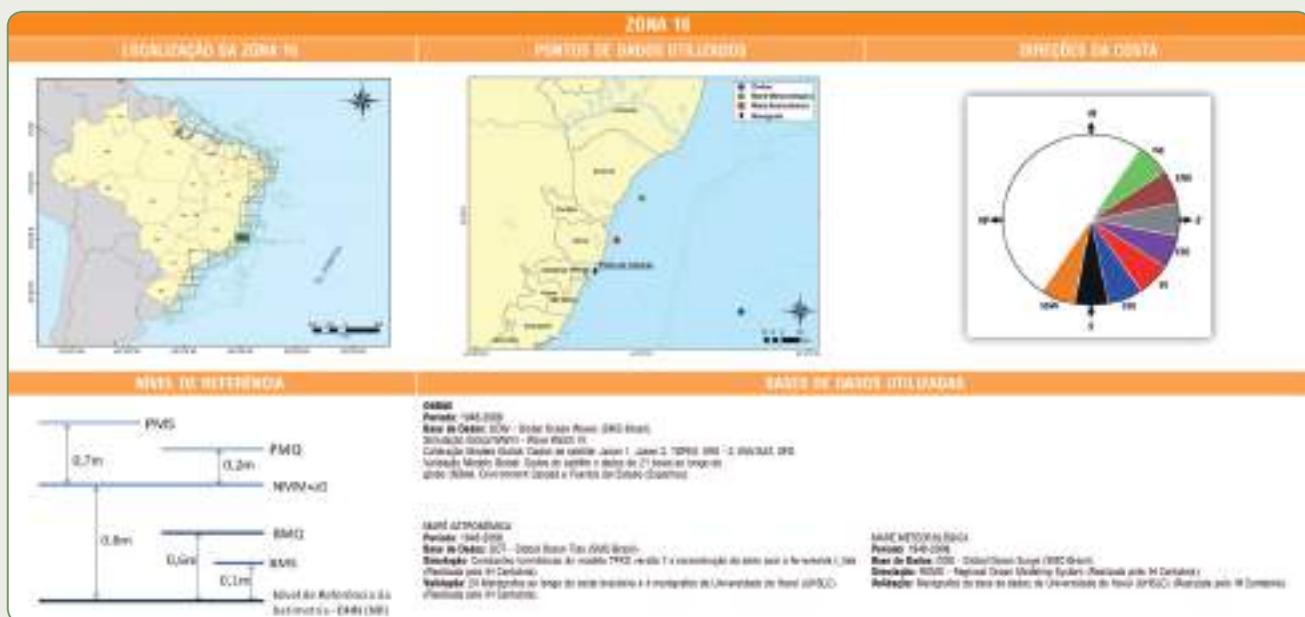
- 6) Foram calculadas séries temporais de 60 anos para cada área, considerando a orientação e a declividade da praia, como a combinação linear do nível médio do mar (NMM), a maré astronômica (MA), a maré meteorológica (MM) e o *runup* (Ru).

$$CI = NMM + MA + MM + Ru \quad (\text{Eq. 6})$$

- 7) Finalmente, calcularam-se a análise de distribuição de longo prazo e o valor extremo da cota de inundação em cada zona.

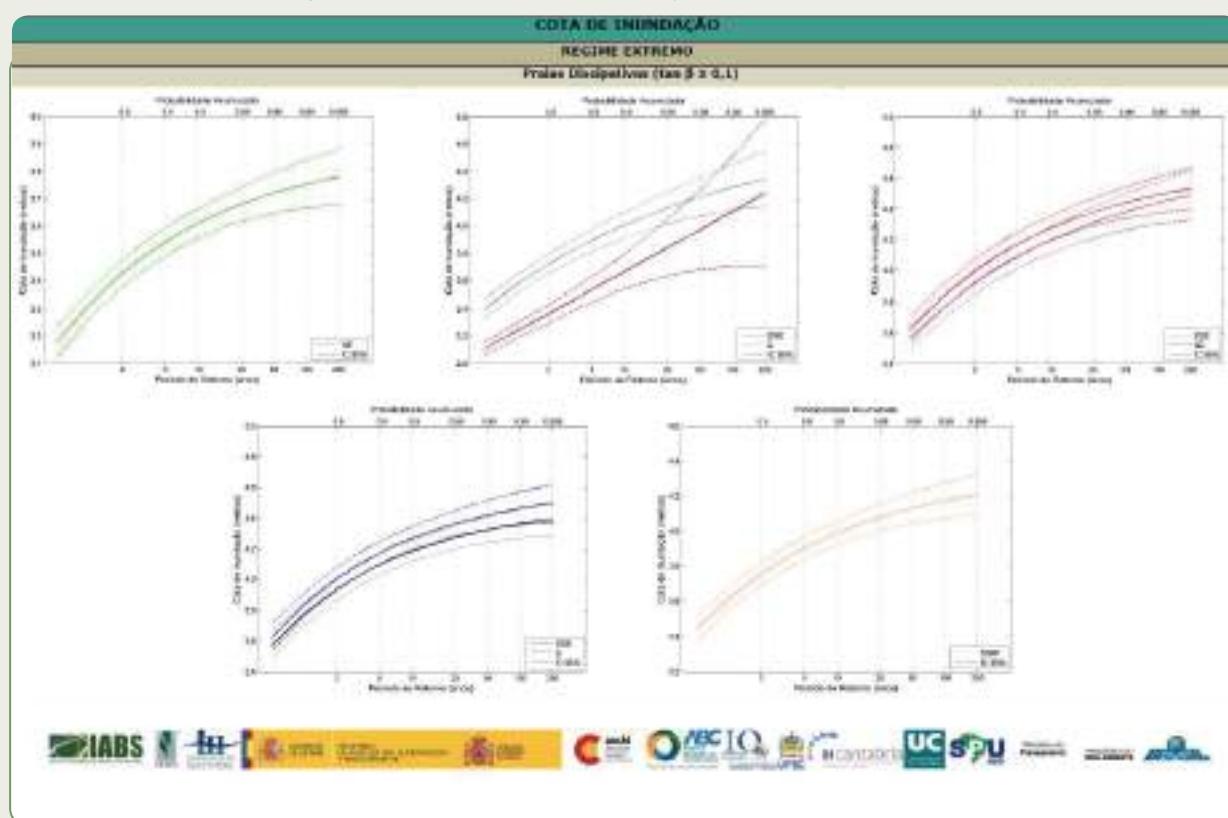
Os resultados foram organizados e apresentados para as zonas indicando a orientação das praias e declividades. Por exemplo, nas Figuras 1.36 e 1.37 são mostrados os resultados para uma das zonas.

Figura 1.36 – Exemplo de resultados de inundações para a zona 16 do documento *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundaçao costeira do Brasil*



Fonte: Brasil (2018a).

Figura 1.37 – Exemplo de resultados de inundações para a zona 16 do documento *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundaçao costeira do Brasil*



Fonte: Brasil (2018a).

Metodologia detalhada da cota de inundação

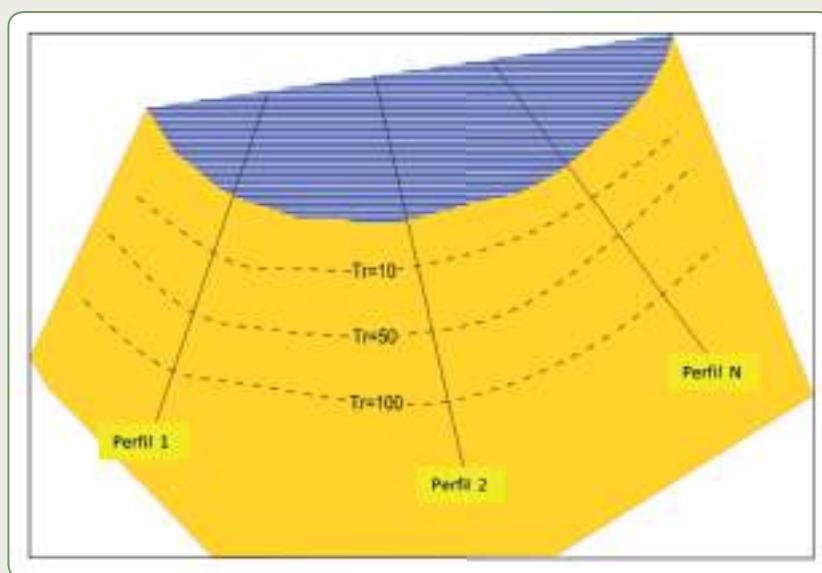
Os resultados obtidos com a aplicação dessa metodologia são aplicáveis ao nível de cálculo de projeto em uma praia específica. Esta metodologia é implementada no Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil). O SMC inclui as bases de dados previamente explicadas e essa metodologia, assim como outras metodologias e modelos para aplicações em praias.

A cota de inundação calculada fundamentada nessa metodologia também usa as bases de dados de marés astronômicas, de marés meteorológicas e de série de ondas geradas pelo vento descritas anteriormente. No entanto, ao contrário da metodologia simplificada, as ondas são propagadas para a costa usando o modelo OLUCA-SP (BRASIL no prelo (a)). Trata-se de um modelo numérico de propagação de ondas espectrais e irregulares, que resolve as equações da declividade suave em sua forma parabólica, considerando empinamento, refração e difração. Esse modelo também tem vários esquemas de quebra para ondas irregulares. As simulações devem ser feitas usando uma batimetria detalhada de alta resolução obtida a partir de cartas náuticas e de levantamentos de dados batimétricos.

A metodologia utilizada para o cálculo da cota de inundação é a seguinte:

- 1) Definições do perfil: A inundação é calculada para uma série horária de 60 anos de maré astronômica, maré meteorológica e ondas, onde cada estado de mar é propagado à costa. Devido às características espectrais das ondas irregulares o ponto de quebra não é constante, em vez disso uma área de quebra sobre um perfil deve ser considerada.
- 2) Propagação de ondas: O modelo OLUCA-SP (BRASIL, no prelo (a)) é usado para propagar uma série de ondas para a zona de arrebentação, usando uma batimetria de alta resolução.
- 3) Cálculo do *runup*: A fórmula empírica de Nielsen e Hanslow (1991) é utilizada em cada perfil. No entanto, um modelo de inundação bidimensional poderia ser aplicado.
- 4) A série de níveis de inundação é calculada como uma combinação linear de maré astronômica, maré meteorológica e *runup* sobre o perfil.
- 5) Finalmente, calcula-se a análise de distribuição de longo prazo e de valor extremo da cota de inundação em cada perfil. Com base no período de retorno e usando a cota de inundação de diferentes perfis (Figura 1.38), as curvas de cota de inundação podem ser determinadas.

Figura 1.38 – Diagrama de contorno de cotas de inundação sobre uma praia hipotética



Fonte: Dos autores (2018).

Diferenças metodológicas

Embora ambas as metodologias produzam cotas de inundação, e ambas sejam usadas para definir cotas de inundação associadas a períodos de retorno, há muitas diferenças entre os resultados. Essas diferenças levam a diferentes aproximações e usos dos resultados. A metodologia simplificada dá uma ideia aproximada das inundações em uma área costeira e foi usada para gerar o documento “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundação costeira do Brasil” (BRASIL, 2018a), para uso imediato. Já a metodologia detalhada fornece uma abordagem adequada para as inundações costeiras, tendo em conta todas as características morfológicas e dinâmicas de uma praia específica. Nesse caso, as cotas de inundação devem ser obtidas através de ferramentas numéricas implementadas no SMC-Brasil (SHORT; KLEIN, 2016).

As principais diferenças entre as duas metodologias estão nas características consideradas da praia e da propagação das ondas. No Quadro 1.3 são listadas as diferenças entre ambas as metodologias.

Quadro 1.3 – Resumo das diferenças entre a metodologia simplificada, utilizada no documento *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundação costeira do Brasil* (BRASIL, 2018a), e a metodologia detalhada, utilizada no SMC-Brasil, para o cálculo da cota de inundação

	Elementos	Metodologia simplificada	Metodologia detalhada (SMC-Brasil)
Geral	Aproximação	Costa brasileira regional	Aplicações locais
	Abordagem espacial	Para regiões costeiras (~100 km)	Para praias específicas
	Maré astronômica	Série de dados de 60 anos (GOT)	Série de dados de 60 anos (GOT)
	Maré meteorológica	Série de dados de 60 anos (GOS)	Série de dados de 60 anos (GOS)
	Base de dados	Série de dados de 60 anos (GOW)	Série de dados de 60 anos (DOW)
	Propagação de ondas	Aproximação de Snell. Usando batimetria reta e paralela	Modelo numérico OLUCA-SP. Usando batimetria de alta resolução
Ondas	Propagação de dados	Todos os dados um a um (por hora)	Propagação de um número pequeno de casos representativos
	Critérios de quebra da onda	Definido como $H_b/h_b = 0,8$	OLUCA-SP (Quebra de onda espectral): ▪ Battjes e Janssen (1978) ▪ Thornton e Guza (1983) ▪ Winyu e Tomoya (1998)
	Runup	Nielsen e Hanslow (1991)	Nielsen e Hanslow (1991) ou modelo numérico de inundação
	Batimetria	Cartas náuticas + topografia	Cartas náuticas + levantamentos locais + topografia
	Declividade da praia	Somente para praias dissipativas e refletivas	Perfil real
	Orientação da praia	Para diferentes orientações de praia na região	Sem relevância
Praia			

Fonte: Dos autores (2018).

SMC-BRASIL: BASE DE DADOS DE REANÁLISE DE DINÂMICA E FERRAMENTAS NUMÉRICAS PARA PROCESSOS COSTEIROS

O SMC-Brasil é um composto de documentos metodológicos para tópicos específicos do litoral e de dois sistemas de fácil utilização. O primeiro inclui bases de dados de batimetria e de dinâmica marinha, obtidos por reanálise. O segundo inclui o modelo numérico e as ferramentas estatísticas e permite a aplicação das metodologias e formulações propostas nos documentos anteriores em projetos costeiros brasileiros. É portanto estruturado em duas partes principais (Figura 1.39):

Documentos temáticos:

Uma série de documentos técnicos reúne toda a descrição das bases de dados e as metodologias utilizadas para estimar e analisar as ondas, o transporte de sedimentos, a estabilidade das praias, os efeitos das mudanças climáticas nas praias etc. Todas essas informações foram resumidas em quatro documentos temáticos:

- Ondas (BRASIL, 2018b): Esse documento reúne todas as informações sobre geração, calibração e validação de bases de dados de ondas, processos de propagação de ondas, metodologias utilizadas para transferir o clima de ondas de águas profundas para a costa (seleção de casos de ondas, modelos de propagação de ondas etc.) e formulações de transporte litorâneo.
- Níveis e cota de inundação (BRASIL, 2018c): Esse documento reúne toda a informação sobre a geração das bases de dados de nível (maré astronômica e meteorológica) e a metodologia utilizada para calcular a cota de inundação.
- Recuperação de praias (BRASIL, 2018d): Esse documento trata de estudos de estabilidade das praias e descreve como realizar a recuperação de praia.
- Mudanças climáticas em praias (BRASIL, 2018e): Nesse documento são propostas várias metodologias para estimar os potenciais efeitos e impactos das mudanças climáticas na morfodinâmica das praias.

Ferramentas numéricas:

Trata-se de um conjunto de modelos numéricos e ferramentas estatísticas que permite desenvolver projetos costeiros e gerenciar o litoral utilizando metodologias e bases de dados, descritos nos documentos temáticos. Existem dois módulos principais:

- SMC-Tools (BRASIL, no prelo (b)): Esse módulo permite realizar todos os trabalhos do pré-processamento (coleta de dados, análise e caracterização de dados, seleção de casos de onda etc.) e todas as tarefas do pós-processamento (cálculo do clima de onda em pontos-alvo ou perfis de praia, cálculo do transporte de sedimento litorâneo, cálculo do *runup* e da inundação, estimativa dos efeitos das mudanças climáticas na praia etc.). Está estruturado em três submódulos: IH-DATA, IH-AMEVA e IH-DYNAMICS. Esses elementos serão detalhadamente descritos na seção a seguir.
- SMC 3.0 (BRASIL, no prelo (c)): Inclui modelos numéricos para transferir o clima de ondas para a costa e calcular a dinâmica do litoral. Possui também ferramentas numéricas para analisar a estabilidade da praia em diferentes escalas com base na dinâmica das séries temporais obtidas a partir do SMC-Tools. O SMC 3.0 é composto de submódulos diferentes (Figura 1.39):

- Modelagem do terreno: Esse módulo permite atualizar a batimetria obtida a partir da base de dados SMC-Tools (IH-DATA), incluindo diferentes estruturas costeiras, alterações de batimetria (engordamento de praia, dragagem etc.) ou outras batimetrias de diferentes fontes para obter uma batimetria de trabalho única que será utilizada nos diferentes módulos para caracterizar a dinâmica marinha e litoral na área de estudo. Esse módulo é uma ferramenta útil para a concepção e avaliação de diferentes alternativas propostas.
- Análise de curto prazo: Permite analisar a evolução morfodinâmica da praia em curto prazo (escala de horas a dias). Esse módulo inclui modelos numéricos de evolução morfodinâmica (MOPLA-2DH) e perfil (PETRA-2DV) (BRASIL, no prelo (d)) para ondas monocromáticas e espectrais, o que permite simular todos os processos numa escala de horas a dias para estimar a resposta da praia a um evento de tempestade e verificar se os requisitos de estabilidade e funcionalidade de um projeto de recuperação de praia foram atingidos. O módulo também fornece informações sobre processos costeiros: sistema de correntes (COPLA) (BRASIL, no prelo (e)) e transporte potencial (EROS) (BRASIL, no prelo (f)).
- Análise de longo prazo: Esse módulo permite analisar os processos de médio prazo (mudanças sazonais) e a resposta a longo prazo do sistema numa escala de anos a décadas. As formulações existentes para essa análise de longo prazo não se concentram nos processos, mas nas magnitudes agregadas a eles (direção média do fluxo anual, altura de onda excedendo 12 horas por ano etc.). Esse módulo inclui uma ferramenta de interface gráfica para o usuário testar a estabilidade ou para projetar novas praias de equilíbrio, levando em consideração a forma de equilíbrio em planta e perfil.

Figura 1.39 – O SMC-Brasil é composto de documentos metodológicos específicos para a costa



Fonte: Dos autores (2018).

SMC-Tools

O SMC-Tools foi desenvolvido especialmente para a versão SMC-Brasil, a fim de ajudar os engenheiros e gestores costeiros brasileiros a obter dados de entrada (séries de ondas e nível médio do mar, batimetria e imagens), dinâmica marinha e litoral, e processar toda essa informação facilmente para realizar projetos de gerenciamento costeiro.

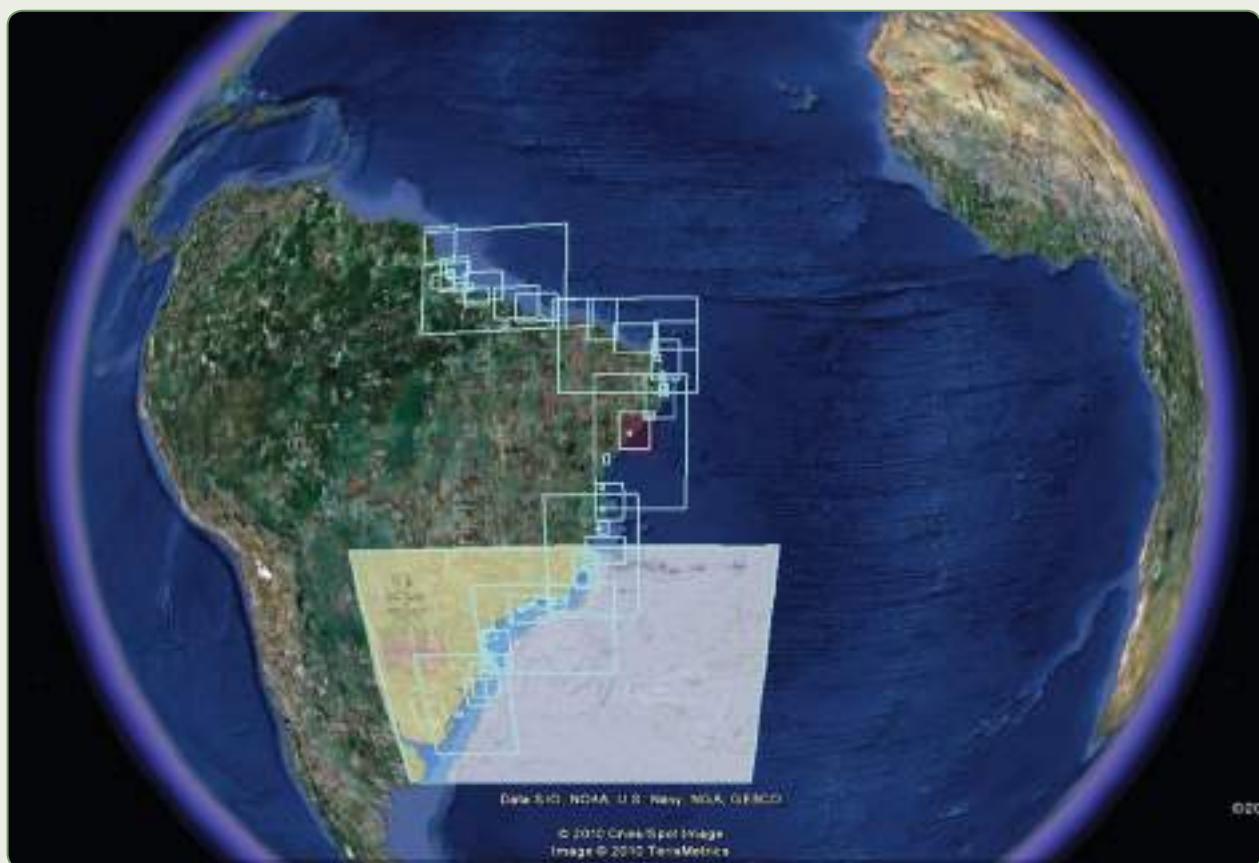
O SMC-Tools inclui três submódulos:

- **IH-DATA:** É um sistema de gerenciamento de banco de dados que permite acessar as bases de dados desenvolvidas para o SMC-Brasil e obter todos os dados necessários para o desenvolvimento do projeto ou estudo na costa brasileira. Esse banco de dados contém:
 - Batimetria: obtida a partir da base de dados da *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) para caracterizar águas profundas e a costa brasileira uniformemente. Essas batimetrias foram sobrepostas com a batimetria digitalizada das cartas náuticas brasileiras para melhorar a resolução da área costeira (Figura 1.40).
 - Clima de ondas GOW e DOW: séries temporais horárias contínuas do clima de ondas, que se estendem de 1948 a 2008. Essas séries são baseadas na reanálise global *Global Ocean Waves* (GOW) (REGUERO et al., 2012) desenvolvida para o projeto “*Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe (C3A)*”, financiada pela Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL) e melhorada com o aumento de sua resolução para caracterizar melhor o clima de ondas próximo à costa brasileira. Além disso, foram geradas novas séries de ondas DOW com base na série GOW, aplicando técnicas de *downscaling* para caracterizar o clima de ondas na zona costeira ao longo da costa brasileira. Todos estes dados de clima de onda foram calibrados e validados por satélites e dados de boias.
 - Nível do Mar GOT e GOS: séries de níveis do mar ao longo da costa brasileira de 1948-2008 (60 anos, horária). Essas séries incluem a maré astronômica (*Global Ocean Tide Series*, GOT) e informações da maré meteorológica (*Global Ocean Surge*, GOS). Esses dados foram calibrados e validados com marégrafos.
- **IH-AMEVA (Ferramenta de análise estatística ambiental):** Esse submódulo permite o processamento de todas as séries de dados em escalas temporal e espacial diferentes, para caracterizar o clima marítimo em águas profundas, selecionar os casos para propagar o clima de ondas para a costa, obter séries de clima de ondas em pontos-alvo ou perfis etc. O conjunto de ferramentas estatísticas permite observar regimes de tempestade, regimes de estado do mar, rosas de clima de ondas etc.
- **IH-DYNAMICS:** Esse conjunto de ferramentas permite aos usuários:
 - Transferir o clima de ondas obtido do IH-DATA (DOW) em direção à costa (face da praia, portos etc.) usando modelos espectrais de propagação de ondas e técnicas de reconstrução de ondas.
 - Desenvolver uma avaliação probabilística das inundações costeiras, levando em conta a maré astronômica, a maré meteorológica e o *runup* das ondas na área de estudo. Essa ferramenta é útil para elaborar mapas de inundações em zonas costeiras.
 - Calcular as possíveis séries temporais de transporte longitudinal de sedimentos a partir do clima de ondas em perfis praiais ao longo da costa.

- Avaliar o fluxo médio de energia (magnitude e direções) e sua evolução temporal em diferentes pontos-alvo definidos pelos usuários ao longo da área de estudo (praia, porto etc.). Esse fluxo médio de energia pode ser calculado em diferentes escalas temporais (sazonais, plurianuais etc.) que são úteis para analisar a evolução da estabilidade da praia e a forma de equilíbrio em planta das praias.
- Avaliar os efeitos e impactos das alterações climáticas na morfodinâmica das praias, estudando as tendências de longo prazo das dinâmicas locais (nível do mar, altura das ondas, cota de inundação, mudanças na altura e direção das ondas) e sua influência no retrabalhamento e orientação da linha de costa e nas inundações costeiras (Figura 1.41).

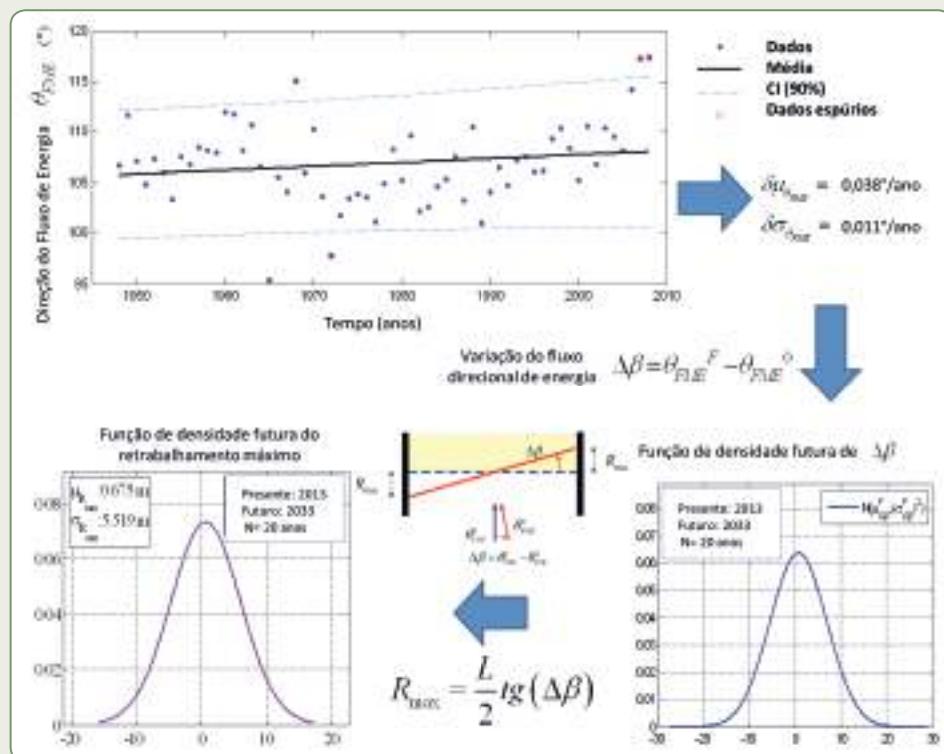
Outra vantagem do SMC-Tools é ter um módulo que permite gerenciar facilmente todas as informações de dados necessárias para o projeto ou estudo e os resultados obtidos e resumi-los em um conjunto de informações para incluí-los em um relatório técnico ou para ajudar na tomada de decisão. Essas informações permitem resumir as características do clima marinho associado ao ponto DOW, a seleção dos casos que o usuário deseja propagar, as malhas selecionadas, o clima de ondas nos pontos-alvo e perfis, o transporte potencial de sedimentos ao longo da área de estudo e os potenciais efeitos e impactos que a mudança climática poderia causar na praia. Na Figura 1.42, é apresentado um resumo do tipo de produtos técnicos que podem ser obtidos com SMC-Tools de acordo com a fase do projeto, e na Figura 1.43 são mostrados alguns desses produtos.

Figura 1.40 – Cartas náuticas incluídas no IH-DATA para caracterizar a batimetria da costa brasileira



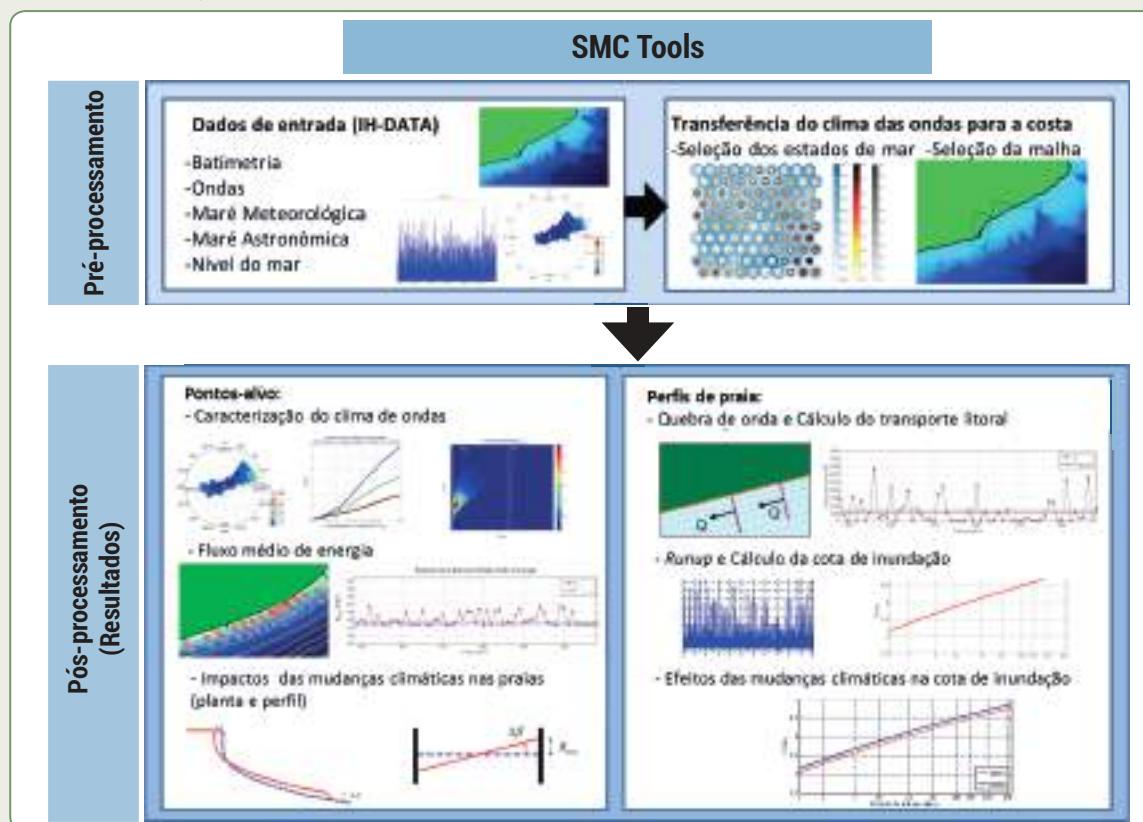
Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2018).

Figura 1.41 – Metodologia utilizada no SMC-Tools para estimar o máximo de retrabalhamento da praia devido a alterações climáticas



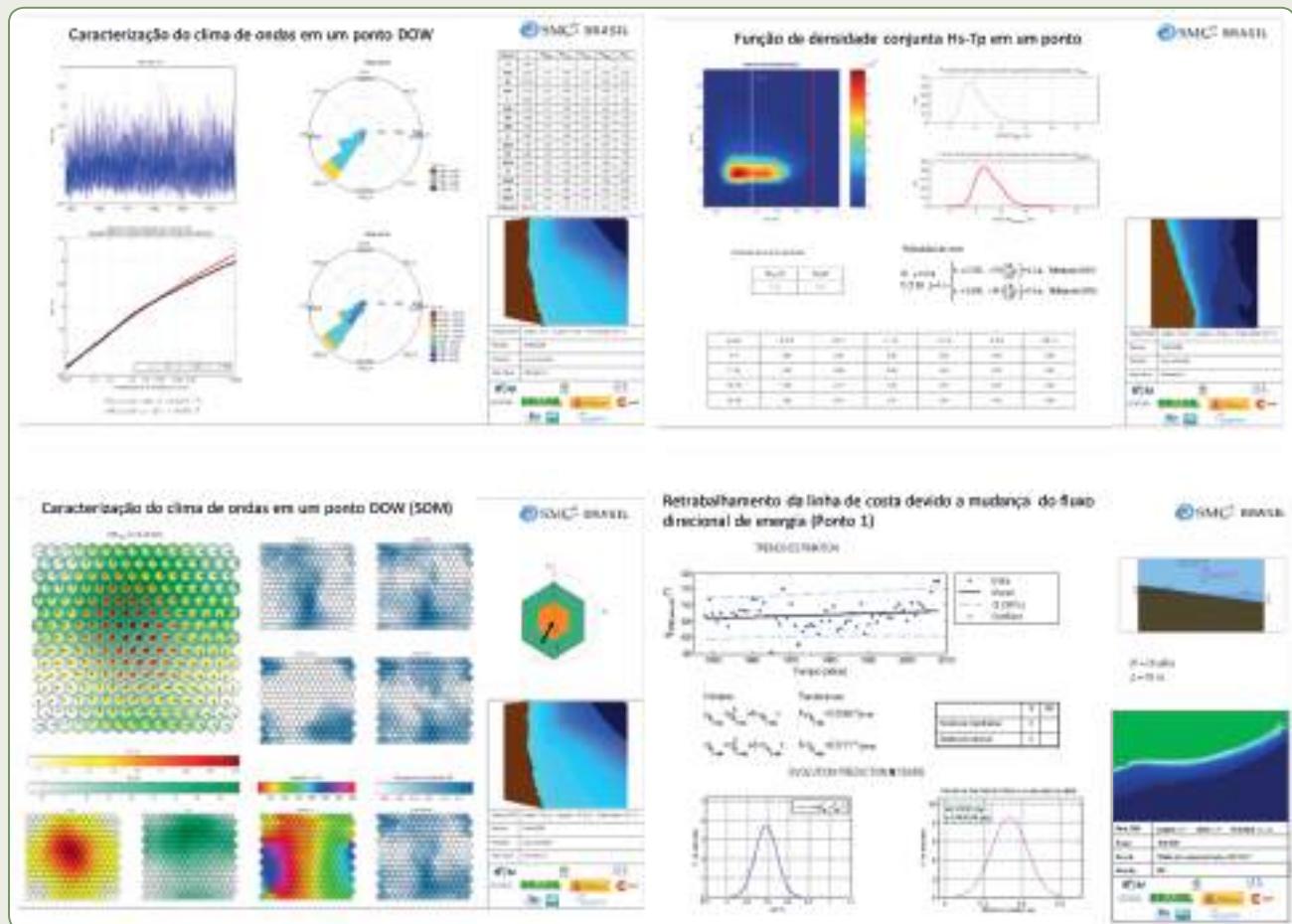
Fonte: Dos autores (2018).

Figura 1.42 – Informações técnicas que podem ser obtidas utilizando o SMC-Tools



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 1.43 – Exemplo de produtos extraídos do SMC-Tools que podem ser utilizados em relatórios técnicos



Legenda: Caracterização do clima de ondas; diagrama de probabilidade H_s - T_p ; profundidade de fechamento em um ponto-alvo; classificação do clima de ondas; avaliação do impacto da variação do fluxo de energia em uma praia

Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÃO

O Brasil possui uma larga zona costeira, com aproximadamente 9000 km de linha de costa, resultando em uma considerável diversidade física e ambiental, a qual é caracterizada pela heterogeneidade da morfologia costeira, do clima marinho (ondas, maré etc.) e da meteorologia (gradiêntes de pressão atmosféricos, ventos etc.).

Neste capítulo, esse comportamento diverso da dinâmica costeira é confirmado pela análise dos dados de reanálise de ondas, maré astronômica, maré meteorológica, vento e cota de inundação gerados na costa brasileira. Essas bases de dados têm sido calibradas e validadas, apresentam um bom ajuste aos dados medidos e corroboram estudos anteriormente realizados.

Durante as últimas décadas, o interesse no estudo das zonas costeiras tem se intensificado devido ao aumento de problemas ambientais e de erosão costeira (SHORT, KLEIN, 2016). De forma a auxiliar esse estudo sobre as dinâmicas costeiras e os seus efeitos na costa, uma nova versão do Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) foi desenvolvida.

O SMC-Brasil é um sistema de fácil utilização projetado especificamente para auxiliar engenheiros e gestores costeiros na análise das dinâmicas marinha e litoral, promovendo a compreensão do impacto dessas dinâmicas nas mudanças da costa brasileira. Ele inclui novas bases de dados (60 anos de dados horários), metodologias e ferramentas que permitem analisar as dinâmicas e sua resposta na costa a curto, médio e longo prazo, ou mesmo estimar mudanças em um futuro próximo (menos de 50 anos) (BRASIL, no prelo (b), (c)). Essas características tornam esse sistema adequado para muitas aplicações de engenharia costeira. Por exemplo, esse sistema permite calcular o fluxo de energia associado e o transporte de sedimentos ao longo da costa e sua evolução temporal e espacial, a fim de avaliar as potenciais áreas de sedimentação ou erosão, a evolução do perfil e a forma final de equilíbrio para, caso necessário, estimar a gravidade do problema e propor obras costeiras para reduzi-lo; ou ainda, analisar as inundações costeiras para evitar grandes desastres ou danos.

Outro tópico importante atualmente é a inundaçāo costeira, pois o aumento do nível do mar e níveis extremos de chegada da água estão inundando áreas que não eram anteriormente inundadas ou que não eram tão frequentemente inundadas quanto hoje em dia (SHORT; KLEIN, 2016). Com o objetivo de ajudar a estimar potenciais áreas de inundaçāo no Brasil, um documento chamado *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundaçāo costeira do Brasil* (BRASIL, 2018a) foi elaborado. Esse documento fornece informação geral sobre inundaçāo nas áreas costeiras e pode ser utilizado para obter valores robustos de inundaçāo para fases de pré-projetos de obras. Contudo, uma estimativa mais confiável pode ser obtida com o uso do próprio SMC-Brasil, ao implementar as suas metodologias e bases de dados no estudo de processos dinâmicos e morfológicos na área de interesse.

Recentemente, tem aumentado a preocupação com as futuras mudanças na dinâmica marinha e seus impactos no litoral, e o SMC-Brasil auxilia na avaliação dessas mudanças e dos impactos potenciais associados sobre a estabilidade das praias.

REFERÊNCIAS

- BATTJES, J. A.; JANSEEN, J. P. F. M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 16., 1978, Hamburg, Alemanha. **Proceedings...** Hamburg: ASCE, p. 569-587.
- BENAVENTE, J. et al. Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cádiz Bay Natural Park, SW Spain). **Continental Shelf Research**, v. 26, p. 1061-1076, 2006.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions 1. Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regimes probabilísticos de inundaçāo costeira do Brasil**. Brasília: MMA, 2018a.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Documento Temático – Ondas. Brasília: MMA, 2018b.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Documento Temático – Níveis. Brasília: MMA, 2018c.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Documento Temático – Recuperação de Praias. Brasília: MMA, 2018d.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Documento Temático – Mudanças Climáticas em Praias. Brasília: MMA, 2018e.

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil:** Manual de Referência – Modelo de Propagação de Ondas Espectrais em Praias (OLUCA-SP). Brasília: MMA, no prelo (a).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil:** Manual do Usuário – SMC Tools. Brasília: MMA, no prelo (b).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil:** Manual do Usuário – SMC 3.0. Brasília: MMA, no prelo (c).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil:** Manual do Usuário – Petra. Brasília: MMA, no prelo (d).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil:** Manual de Referência – Modelo de Correntes por Quebra em Praias (COPLA MC/SP). Brasília: MMA, no prelo (e).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil:** Manual de Referência – Modelo de Erosão/Sedimentação de Praias (EROS). Brasília: MMA, no prelo (f).
- CAMUS, P. et al. Statistical and dynamical downscaling to transfer wave climate to coastal areas. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION, 12., 2010, Viena, Áustria. **Proceedings...** Viena: EGU2010-12590.
- CAMUS, P.; MÉNDEZ, F.; MEDINA, R. A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. **Coastal Engineering**, 2011. DOI 10.1016/j.coastaleng.2011.05.007.
- CAVALERI, L. et al. Wave Modelling: The State of the Art. **Progress in Oceanography**, v. 75, n. 4, p. 603-674, 2007.
- CID, A. et al. A high resolution hindcast of the meteorological sea level component for Southern Europe: The GOS Dataset. **Climate Dynamics**, 2014. DOI 10.1007/s00382-013-2041-0.
- COTTON, P. A feasibility study for a global satellite buoy intercalibration experiment. **Southampton Oceanography Centre Resolution Consultation Report**, v. 26. Southampton Oceanography Centre: Southampton, UK, 1998, 73 p.
- DEE, D. P. et al. The Era-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, p. 553-597, 2011.
- EGBERT, G. D.; BENNETT, A. F.; FOREMAN, M. G. G. TOPEX/POSEIDON Tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, p. 24821-24852, 1994.
- EGBERT, G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modelling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 193-204, 2002.
- FENG, H. et al. Assessment of wind-forcing impact on a global wind-wave model using the topex altimeter. **Ocean Engineering**, v. 33, n. 11-12, p. 1431-1461, 2006.
- FOREMAN, M. G. G. Manual for tidal heights analysis and prediction. **Pacific Marine Science Report**, 77-10. Sidney: Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, 1977.
- GARCIA, C. A. E. et al. Chlorophyll variability and eddies in the Brazil–Malvinas confluence region. **Deep-Sea Research**, v. 51, p. 159-172, 2004. DOI 10.1016/j.dsr2.2003.07.016.
- GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). **Atlas de inundación del litoral peninsular español:** documento temático. Ministerio de Medio Ambiente (Dirección General de Costas), Universidad de Cantabria: 2003.
- HAIDVOGEL, D. B. et al. Model evaluation experiments in the North Atlantic Basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 32, p. 239-281, 2000.
- HAIDVOGEL, D. B. et al. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system. **Journal of Computational Physics**, v. 227, p. 3595-3624, 2008. DOI 10.1016/j.jcp.2007.06.016.

- HARDY, R. L. Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method. **Computers and Mathematics with Applications**, v. 19, n. 8-9, p. 163-208, 1990.
- HEMER, M.; CHURCH, J.; HUNTER, J. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. **International Journal of Climatology**, v. 30, p. 475-491, 2010.
- KALNAY, E. et al. The NCEP/NCAR Reanalysis project. **Bulletin of the American Meteorology Society**, v. 77, p. 437-471, 1996.
- LOSADA, I. J.; LIU, P. Wave propagation modeling in coastal engineering. **Journal of Hydraulic Research**, v. 40, n. 3, 2002.
- MACHADO, A. A. et al. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in Southern Brazil and their relation to erosion episodes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 5, n. 2, p. 277-286, 2010.
- MUEHE, D. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 476 p.
- NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER (NOAA), 2006. Disponível em: <<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html>>. Acesso em: 26 abr. 2018.
- NICOLODI, J. L.; PETERMANN, R. M. Vulnerability of the Brazilian Coastal Zone in its environmental, social, and technological aspects. **Journal of Coastal Research**, v. SI 64, p. 1372-1379, 2011.
- NIELSEN, P.; HANSLOW, D. J; Wave run-up distributions on natural beaches. **Journal of Coastal Research**, v. 7, n. 4, p. 1139-1152, 1991.
- ONOGI, K. et al. The JRA-25 reanalysis. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85, n. 3, p. 369-432, 2007.
- PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the South of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, n. 3, p. 175-188, 2009.
- PAULOWICZ, R.; BEARDSLEY, B.; LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. **Computers and Geosciences**, v. 28, p. 929-937, 2002.
- REGUERO, B. G. et al. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, 2012. DOI 10.1016/j.coastaleng.2012.03.003.
- ROGERS, W. E. et al. Forecasting and hindcasting waves with the SWAN model in the Southern California bight. **Coastal Engineering**, v. 54, p. 1-15, 2007.
- SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS J. C. The regional ocean modelling system: a split-explicit, free-surface, topography following coordinates ocean model. **Ocean Modelling**, v. 9, p. 347-404, 2005.
- SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. **Brazilian Beach Systems**. Switzerland: Springer, 2016. 611p.
- SMITH, W. H. F.; SANDWELL, D. T. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. **Science**, 1997.
- THORNTON, E. B.; GUZA, R. T. Transformation of wave height distribution. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, c. 10, p. 5925-5938, 1983.
- TOLMAN, H. User manual and system documentation of Wavewatch-III version 3.14. **NOAA/NWS/NCEP Technical Note** (276), p. 194, 2009.
- TOLMAN, H. Validation of Wavewatch III version 1.15 for a global domain. **NOAA/ NWS/NCEP/OMB Technical Note** (213), p. 33, 2002.
- UPPALA, S. et al. The ERA-40 Reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, p. 2961-3012, 2005.

- WEISSE, R.; VON STORCH, H. Past and future changes in wind, wave, and storm surge climates. In: _____ . **Marine Climate and Climate Change**: Storms, Wind Waves and Storm Surges, 2010. p. 165-203.
- WINYU, R.; TOMOYA, S. Energy dissipation model for regular and irregular breaking waves. **Coastal Engineering**, v. 40, n. 4, p. 327-346, 1998.
- WOOLF, D.; CHALENOR, P. G. Variability and predictability of the North Atlantic wave climate. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. C10, p. 3145, 2002.

O USO DO SMC-BRASIL COMO FERRAMENTA DE ENSINO DE PROCESSOS COSTEIROS EROSIVOS

Pedro de Souza Pereira
Rodolfo Jorge Vale de Araújo

RESUMO

A erosão costeira é um problema que assola uma grande parte das costas arenosas e rochosas de todo o mundo. Na esfera nacional, o estado de Pernambuco tem tido notório destaque devido a diversos problemas de erosão tanto de ordem natural quanto antrópica. Nesse sentido, capacitar gestores e pesquisadores para atuarem na gestão desses problemas, não só na escala local, mas também na global, tem sido uma das metas do Departamento de Oceanografia da UFPE, através da oferta de disciplinas de processos e erosão costeira. Com o intuito de atingir essa meta, a disciplina de Erosão e Proteção Costeira, do curso de bacharelado em Oceanografia, tem exemplificado o conteúdo teórico através do uso do SMC-Brasil. Em suas práticas, os alunos têm tido a oportunidade de trabalhar com os dados-base do modelo, discutindo os diferentes climas de onda e comportamentos das marés astronômicas e meteorológicas ao longo da costa brasileira, bem como a interferência causada por obras de contenção costeira sobre os processos físicos atuantes no litoral. Além disso, o uso da ferramenta tem sido de suma importância para despertar nos alunos a necessidade de rigor técnico na coleta de dados, tratamento e interpretação. Conclui-se que a possibilidade de utilizar o SMC-Brasil como ferramenta de ensino não só tem atingido o objetivo do projeto em escala nacional, que é a transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão da costa brasileira, contribuindo para uma melhor gestão, como também tem assessorado na assimilação do conhecimento teórico os jovens profissionais em formação no Brasil.

Palavras-chave: Clima de ondas. Bacharelado em Oceanografia. Práticas de ensino.

INTRODUÇÃO

A erosão costeira é um problema que assola as costas arenosas e rochosas de todo o mundo (BIRD, 1985; ZHANG; DOUGLAS; LEATHERMAN, 2004), sobretudo na América Latina (SILVA et al., 2014). Diversas são as fontes dos processos que geram erosão, sendo normalmente divididas em causas de origem antrópica e causas de origem natural (SOUZA, 2009). Como exemplos de causas antrópicas pode-se citar a ocupação desordenada, a remoção de areia da praia, a supressão de dunas e de pós-praia, a construção de obras de engenharia rígida, o barramento de sedimentos, entre outras. Já as causas naturais podem ser a focalização da energia das ondas, o déficit sedimentar, a subsidência, as tempestades extremas, o aumento do nível do mar, entre outras (SOUZA, 2009).

Na esfera nacional, o estado de Pernambuco tem tido notório destaque devido a diversos problemas de erosão tanto de ordem natural quanto antrópica (MANSO et al., 2006; MALLMANN; PEREIRA, 2014; MARTINS; PEREIRA, 2014).

A história da erosão costeira do estado de Pernambuco remete à década de 1950, quando da ampliação do porto do Recife, durante a implantação de molhes e diques que alteraram o padrão de distribuição de sedimentos pela deriva litorânea. Nas décadas subsequentes, uma grande quantidade de obras de engenharia rígida foi implementada na região, com o intuito de reduzir os impactos da erosão costeira sobre equipamentos costeiros, bem como fixar a linha de costa (MANSO et al., 2006).

Somada a esse fato, a necessidade de proporcionar aos moradores costeiros opções de lazer e deslocamento culminou em um avanço das benfeitorias urbanas sobre áreas naturalmente destinadas ao amortecimento da energia incidente sobre a costa, como as dunas e o pós-praia. Como resultado desse avanço da urbanização sobre o ambiente praial, surgem a erosão costeira e a necessidade de fixação da linha de costa contra as perdas geradas pela erosão.

Nesse sentido, a erosão costeira gera um conflito entre a necessidade natural do ambiente em requerer sedimentos para atingir um novo equilíbrio e a população em proteger seu patrimônio. Esse conflito requer uma gestão colaborativa, na qual o conhecimento gerado pela academia e a necessidade de obter soluções adequadas caminham lado a lado (SOUZA, 2009).

Um exemplo produtivo da união entre o conhecimento acadêmico e a gestão por meio dos órgãos públicos foi o projeto MAI, sigla para Monitoramento Ambiental Integrado (FINEPE/UFPE, 2009). O projeto MAI teve sua conclusão em 2009 e contou com a participação e interação entre gestores da esfera municipal, estadual e nacional com pesquisadores e alunos das áreas de oceanografia, geologia, geografia e cartografia. O projeto levantou uma série de dados inéditos no momento para a região, referentes a topografia praial, batimetria, ondas, correntes, marés, estado da ocupação costeira, variações da linha de costa, sedimentos, entre outros.

Como resultados do projeto, destacam-se a determinação do grau de vulnerabilidade frente à erosão das praias da região metropolitana, a determinação dos principais focos de erosão, a criação de um banco de dados local e, sobretudo, diretrizes para a gestão do problema. Dentre as diretrizes sugeridas se destaca a indicação da engorda praial como medida de proteção costeira para as praias da região metropolitana. Tal medida tem sido implementada, sendo já efetivada nas praias do município de Jaboatão dos Guararapes.

É dentro do contexto acima elucidado que capacitar gestores e pesquisadores para atuarem na gestão dos problemas relativos à erosão, não só na escala local, mas também na global, tem sido uma das metas do Departamento de Oceanografia da UFPE, através da oferta de disciplinas de processos e erosão costeira. Dentro da ementa dessas disciplinas, os alunos têm sido constantemente confrontados

com exemplos e problemas do cotidiano, sendo provocados para refletir em termos não só da gestão dos problemas, mas também dos processos costeiros.

Através da priorização da identificação dos processos, os alunos têm sido instigados a atuarem no reconhecimento das variáveis envolvidas no processo de erosão, de forma que as medidas a serem tomadas como forma de redução dos impactos sejam as mais adequadas possíveis.

De acordo com Freire (1996), é através da prática que os alunos sintetizam o conhecimento teórico discutido e apresentado em sala de aula, favorecendo sua fixação e compreensão a partir da replicação. Dessa forma, buscou-se utilizar o SMC-Brasil durante a disciplina de Erosão e Proteção Costeira oferecida aos alunos do curso de bacharelado em Oceanografia como forma de replicar e sintetizar os conhecimentos referentes a processos físicos e sedimentológicos, bem como os problemas expostos de forma teórica em sala de aula.

SMC-BRASIL

O SMC-Brasil é composto por duas principais ferramentas numéricas, o SMC-Tools e o SMC propriamente dito. Essa primeira ferramenta tem a capacidade de processar séries temporais referentes à dinâmica que são necessárias como dados de entrada para os modelos numéricos que compõem o SMC.

O SMC-Tools funciona a partir de três módulos principais: o IH-DATA, que reúne uma série de bases e banco de dados; o IH-AMEVA, que realiza análises estatísticas de variáveis ambientais, processando os dados inclusos no IH-DATA, que servirão como dados de entrada para o módulo IH-DYNAMICS; e os modelos numéricos do SMC. Os módulos IH-DATA e IH-AMEVA formam o submódulo de pré-processo do SMC-Tools, enquanto o módulo IH-DYNAMICS constitui o submódulo de pós-processo (BRASIL, no prelo (a)).

O IH-DATA conta com banco de dados contendo informações sobre a costa brasileira com séries históricas de estado de mar que abrangem um período de 60 anos (1948-2008). O banco de dados do SMC/IH-DATA possui informações referentes a imagens, cartas náuticas, dados batimétricos, linhas de costa (Base de Dados de Batimetria e Cartas Náuticas da Costa – BACO); dados de ondas (séries reconstituídas de ondas com características globais, *Global Ocean Waves* – GOW (REGUERO et al., 2012) e séries reconstituídas de ondas com características regionais, *Downscaled Ocean Waves* – DOW) além de dados referentes ao nível de mar (marés meteorológicas, *Global Ocean Surges* – GOS e marés astronômicas, *Global Ocean Tides* – GOT) (BRASIL, 2018a, 2018b, no prelo (a)).

O segundo módulo do SMC-Tools, o IH-AMEVA (Análise Matemática de Variáveis Ambientais), que é um módulo complementar ao IH-DATA, faz parte do pré-processamento de dados de entrada para o terceiro módulo do SMC-Tools e para os modelos numéricos do SMC. Esse módulo, através de análises estatísticas, irá processar e caracterizar as variáveis ambientais relativas às informações contidas nos bancos de dados de ondas do IH-DATA. O IH-AMEVA utiliza a base de dados de onda DOW como entrada e uma série de programas estatísticos independentes, sendo esse módulo o responsável por reconstituir a série completa dos estados de mar para qualquer ponto próximo à costa a partir de um ponto DOW selecionado, fazendo uso do módulo de interpolação *Radial Basis Function* (RBF) e da base de dados de ondas exteriores GOW (BRASIL, 2018a, no prelo (a)).

Porém, antes da realização da propagação dos dados dos estados de mar da base de onda DOW, é necessário garantir que apenas os dados mais representativos sejam transferidos até a costa. Como a base de dados de onda DOW possui informações de mais de 500 mil estados de mar de onda em águas

profundas e intermediárias, torna-se inviável realizar a propagação de todos esses estados, um a um, até a costa. Dessa forma, cálculos estatísticos foram utilizados para diminuir a quantidade de dados a serem propagados, sem que a variância máxima que esses dados representam fosse perdida. Sendo assim, a última etapa do submódulo de pré-processo do SMC-Tools é a aplicação do algoritmo de Desigualdade Máxima (MaxDiss) (CAMUS et al., 2010), que seleciona os casos mais representativos a serem propagados, preservando a variância máxima das componentes consideradas (BRASIL, 2018a, no prelo (a)).

O terceiro módulo, IH-DYNAMICS, possui modelos numéricos que fazem a simulação da transferência de ondas de um ponto DOW à costa e as avaliações do transporte de sedimento, dos fluxos médios de energia e da cota de inundação na costa. Esse módulo inicia suas simulações em um pré-processo que consiste em propagar os estados de mar contidos na série de um ponto DOW escolhido, através da criação de uma ou mais malhas de propagação de ondas. Essa propagação é realizada pelo modelo numérico OLUCA, que resolve os processos aos quais as ondas estão submetidas ao se aproximar da costa (refração, difração, empinamento e arrebentação). O segundo passo consiste em uma simulação numérica, aplicando o algoritmo MaxDiss, selecionando assim um número determinado de estados de mar a serem propagados. Com o resultado das simulações numéricas obtém-se um acervo de casos que permite reconstruir as séries temporais de ondas, dando início à fase de pós-processo no IH-DYNAMICS. Esta reconstrução é realizada através da técnica de interpolação com base em funções RBF (a mesma utilizada pelo IH-AMEVA). As séries reconstruídas por essa técnica (FRANKE, 1982) são adequadas para a simulação do comportamento de uma praia, entre elas estão a área de arrebentação, o transporte de sedimentos e o fluxo médio de energia das ondas (BRASIL, 2018a).

A segunda ferramenta numérica do SMC-Brasil, o SMC propriamente dito, funciona a partir de dois módulos que permitem analisar os sistemas costeiros em escala espacial e temporal: um módulo de análise de curto prazo, formado pelos modelos numéricos MOPLA (Morfodinâmica de Praias) e PETRA (Perfil Transversal), e um segundo módulo, formado pelo modelo de praia em equilíbrio, de análise de médio e longo prazo (BRASIL, no prelo (b)).

O módulo do Programa de Morfodinâmica de Praia (MOPLA) é composto ainda por mais seis submódulos numéricos, divididos em dois grupos, sendo três monocromáticos (MC) e três espectrais (SP). Os monocromáticos são aqueles que modelam a propagação de um trem de ondas monocromáticas e são aplicados para caracterizar a morfodinâmica média em um determinado trecho da costa. Os espectrais modelam a propagação de um estado de mar, representado por um espectro de energia de ondas, aplicando-se nos eventos extraordinários e em casos onde se deseja uma maior precisão no cálculo das alturas de ondas para projetos de engenharia costeira (BRASIL, no prelo (b)).

Os submódulos contidos no MOPLA são modelos numéricos que resolvem a simulação da propagação de ondas monocromáticas e espectrais (modelo parabólico OLUCA MC e SP), das correntes na praia induzidas pela quebra das ondas e pela quebra do movimento de onda espectral (modelo COPLA MC e SP) e da sedimentação e evolução batimétrica das praias (modelo de erosão EROS MC e SP) (BRASIL, no prelo (b), (c), (d), (e), (f)).

O outro módulo do SMC, o Programa de Evolução do Perfil Transversal de Praias (PETRA), simula os processos dinâmicos envolvidos na evolução morfológica de um perfil de praia ao longo do tempo (ondas, correntes, transporte de sedimentos e variações do fundo), modelando o novo perfil de praia trabalhado pela ação dinâmica das ondas e pela variação temporal dos níveis de maré. O modelo numérico PETRA resolve a equação para o fluxo de sedimentos da área de quebra de onda e as alterações da batimetria associadas às variações espaciais do transporte de sedimentos em um curto prazo de tempo (horas/dias), sendo útil para simular o comportamento de um perfil praial apenas quando submetido a ondas de tempestade, obtendo assim a retração da linha de costa e a feição final do

perfil de praia. Esse modelo não deve ser utilizado para simular recuperação de volumes de sedimentos perdidos por uma praia após eventos de ondas de tempestades. O PETRA é um modelo numérico aberto de onda baseado em processos, em que o transporte de sedimentos é modelado em função do fluxo e das concentrações de sedimento (BRASIL, no prelo (b), (g)).

AULAS PRÁTICAS

Com o intuito de atingir uma das metas do Departamento de Oceanografia, que é capacitar recursos humanos, a disciplina de Erosão e Proteção Costeira, do curso de bacharelado em Oceanografia, tem exemplificado o conteúdo teórico através do uso do SMC-Brasil. A disciplina apresenta uma ementa que visa discutir as evidências de erosão, relacionando-as com as suas causas, sejam elas de origem antrópica ou natural, além de discutir as consequências dos processos erosivos e os métodos comumente empregados na proteção do litoral.

Para o adequado cumprimento da ementa da disciplina, optou-se por dividi-la em teórica e prática. Nesse sentido, foram ministradas 15 aulas teóricas e 15 práticas. As práticas foram ministradas na forma de visitas técnicas ao campo e de exercícios em computadores. É justamente neste último que se utilizou a plataforma SMC-Brasil e seus submódulos.

O quadro 2.1, abaixo, elenca alguns dos exemplos realizados em sala e escolhidos para serem aqui ilustrados, bem como os módulos utilizados e os objetivos de cada aula.

Nos exemplos escolhidos para ilustração, utilizaram-se os módulos SMC-Tools, MOPLA, OLUCA, IH-AMEVA e COPLA. Em todos esses módulos discutiram-se as características das ondas e a sua transformação durante o processo de propagação, os padrões de circulação gerados pelas ondas e os processos sedimentares de erosão/acréscio.

Quadro 2.1 – Temas de aula, módulos do SMC utilizados e objetivo de quatro aulas práticas realizadas ao longo da disciplina de Erosão e Proteção Costeira

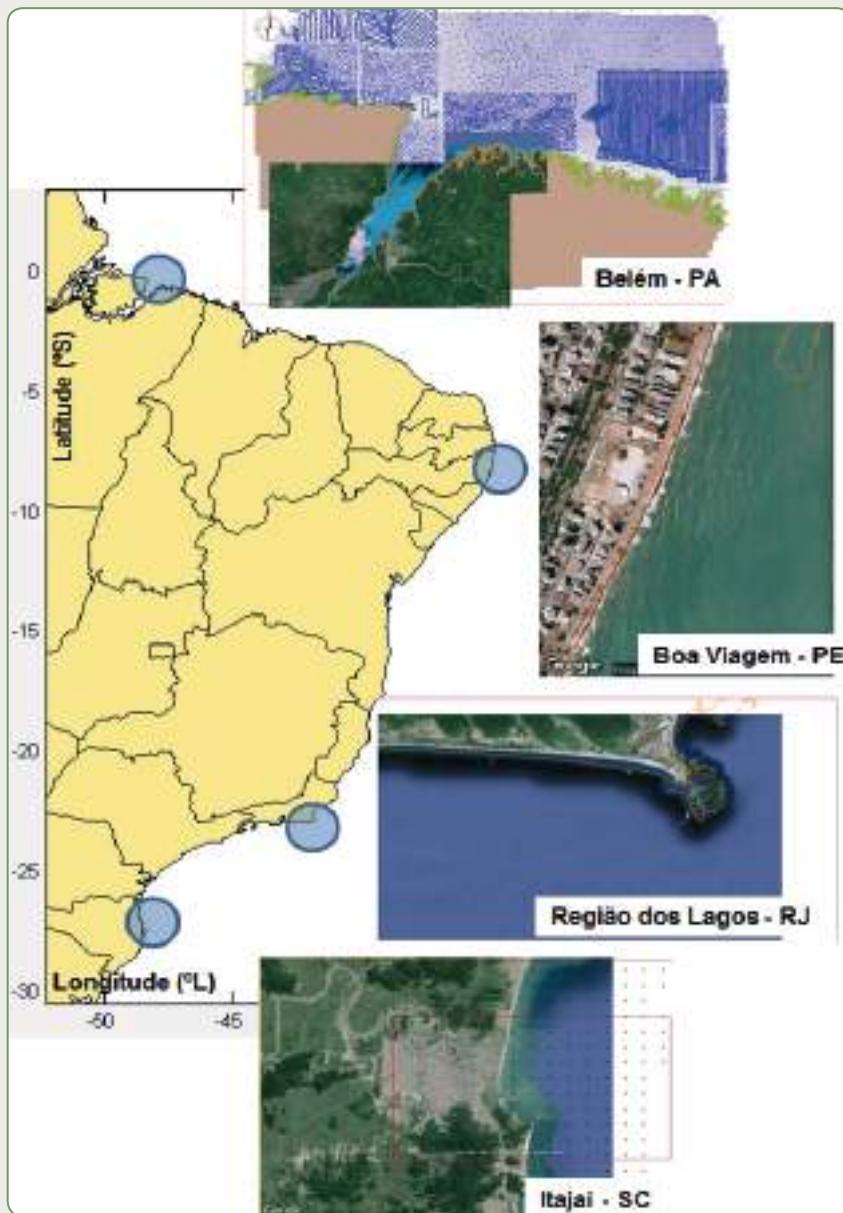
TEMA DA AULA	MÓDULO UTILIZADO	OBJETIVO DA AULA
Clima de ondas, marés astrológicas e meteorológicas ao longo da costa brasileira	SMC-Tools	Discutir a variabilidade do clima das ondas e das marés ao longo da costa brasileira
Propagação de ondas desde águas profundas até águas rasas	SMC-Tools / MOPLA / IH-AMEVA	Discutir alterações sofridas pelo clima de ondas durante a sua propagação de águas profundas para águas rasas
Efeito de uma estrutura costeira como um quebra-mar sobre a dinâmica das ondas e dos sedimentos	SMC-Tools / OLUCA / COPLA	Discutir aspectos relacionados à interação das ondas com estruturas
Desenho de múltiplos quebra-mares e determinação dos seus efeitos sobre a dinâmica costeira	SMC-Tools / OLUCA / COPLA	Discutir a importância do adequado desenho de estruturas e suas consequências sobre a dinâmica das ondas e sedimentos

Fonte: Dos autores (2018).

Variação do clima de ondas e marés ao longo da costa brasileira

Com o intuito de discutir a variação do clima de ondas e das marés astronômicas e meteorológicas, ao longo da costa brasileira, cada aluno selecionou um ponto ao longo da costa em cada uma das regiões do país (Figura 2.1). Na região Norte, escolheu-se um ponto DOW na plataforma externa na altura da cidade de Belém, no estado do Pará (PA). Na região Nordeste, as informações da dinâmica foram selecionadas ao largo da Praia de Boa Viagem, no estado de Pernambuco (PE). A região do Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro (RJ), foi escolhida como a região representativa da região Sudeste e, por fim, a região ao largo da Praia de Navegantes, município de Itajaí, Santa Catarina (SC), foi selecionada como sendo a representante da região Sul. Cada praia ou região foi escolhida pelos alunos de acordo com seus interesses pessoais e com sua curiosidade.

Figura 2.1 – Imagens do Google Earth® utilizadas pelo SMC-Tools ilustrando os locais escolhidos para análise pelos alunos de norte a sul do país

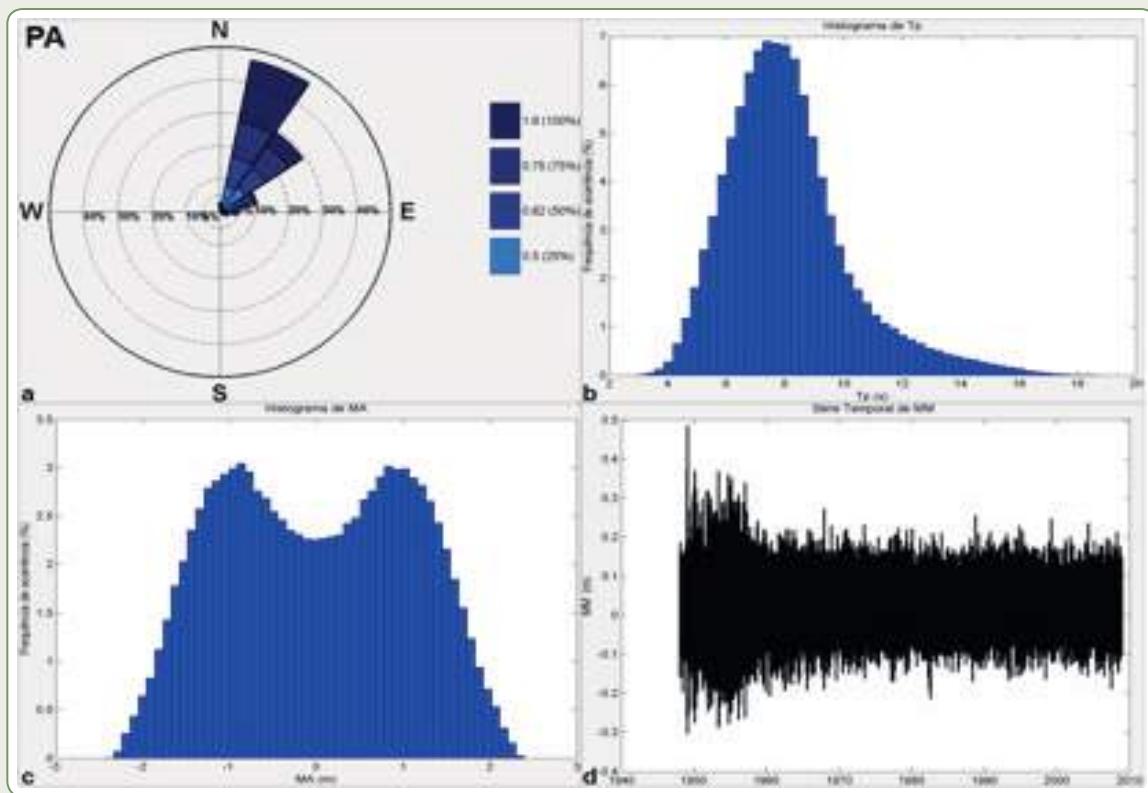


Fonte: Dos autores (2018).

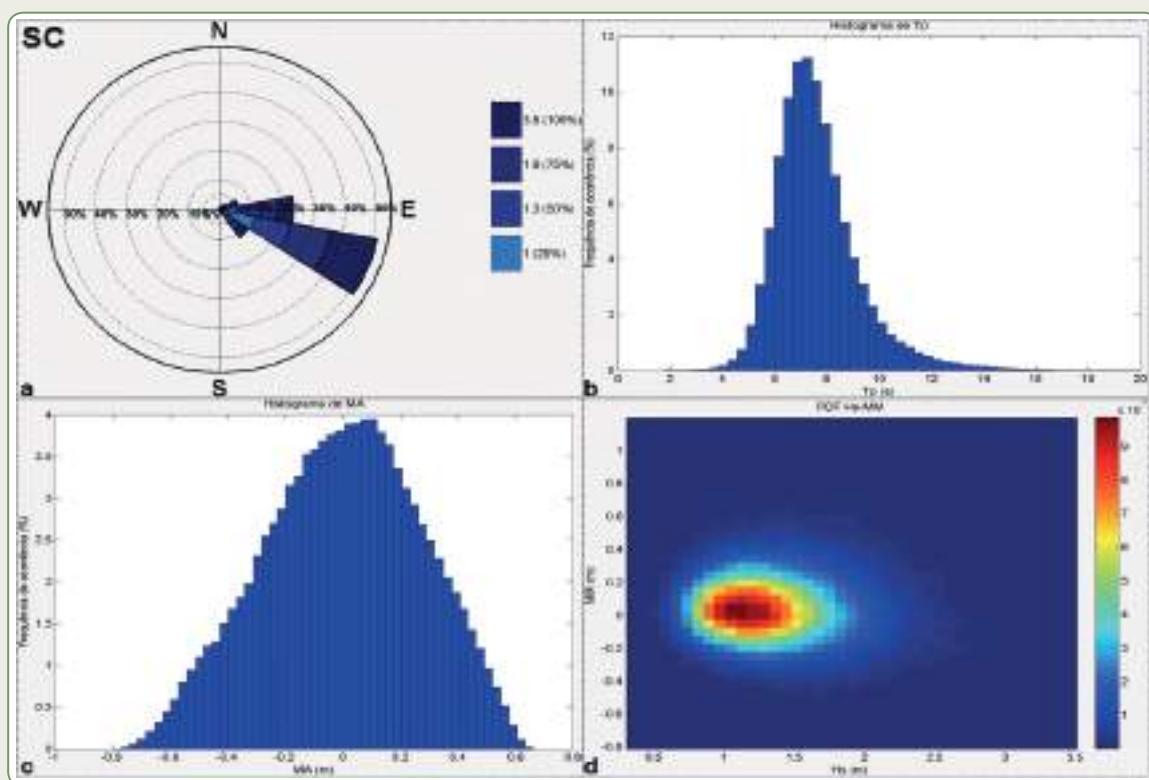
Assim que se procedeu com a obtenção das características dos pontos DOW, discutiram-se as peculiaridades locais de cada ponto escolhido. Fatores como localização geográfica, padrão de circulação atmosférica, largura e profundidade da plataforma, são exemplos dos elementos levados em consideração no momento da discussão dos dados. Conforme é ilustrado na Figura 2.2, as maiores alturas e os maiores períodos de ondas são encontrados para o estado de SC. Na Figura 2.3, pode ser observado que a média da altura significativa de onda, entre os estados de PE e RJ, exibe valores aproximados; porém, é neste último que as ondas podem alcançar alturas potencialmente maiores. A direção de ondas, como esperado, também apresentou variações significativas, com ondas oriundas de N-NE no PA, E-SE em SC (Figura 2.2), S-SE no RJ e E-SE em PE (Figura 2.3). As maiores marés astronômicas foram encontradas ao largo da costa do PA (aprox. 7 m) seguida por PE (2,7 m), RJ (1,3 m) e SC (1,2 m). No que tange às marés meteorológicas, nos pontos em águas profundas, as maiores foram encontradas em SC (Figura 2.2) e, em águas rasas, os maiores valores foram encontrados para o RJ (Figura 2.3).

Com essas informações, os alunos puderam constatar a variada dinâmica presente na costa brasileira, resultado de um clima de onda bem diferenciado, não só em altura, mas também em período e direção. Dessa forma, foi possível discutir a importância de sempre conhecer e levar em conta a dinâmica local, quando da gestão dos ambientes costeiros ao longo do litoral brasileiro.

Figura 2.2 – Variação do clima de ondas, maré astronômica e meteorológica nos estados do PA e SC



(cont.)



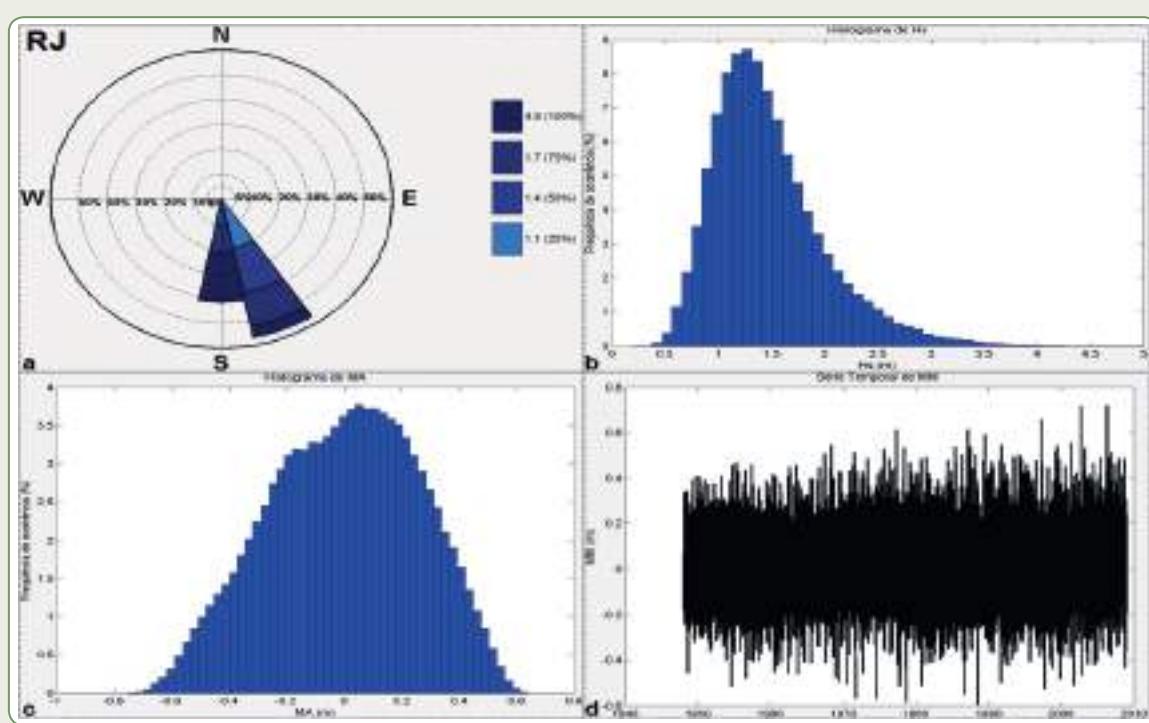
Legenda:

Pará: Pontos DOW em águas profundas, plataforma externa: a) direção e altura das ondas; b) histograma do período de onda – T_p (s); c) histograma da maré astronômica – MA (m); d) série temporal da maré meteorológica – MM (m).

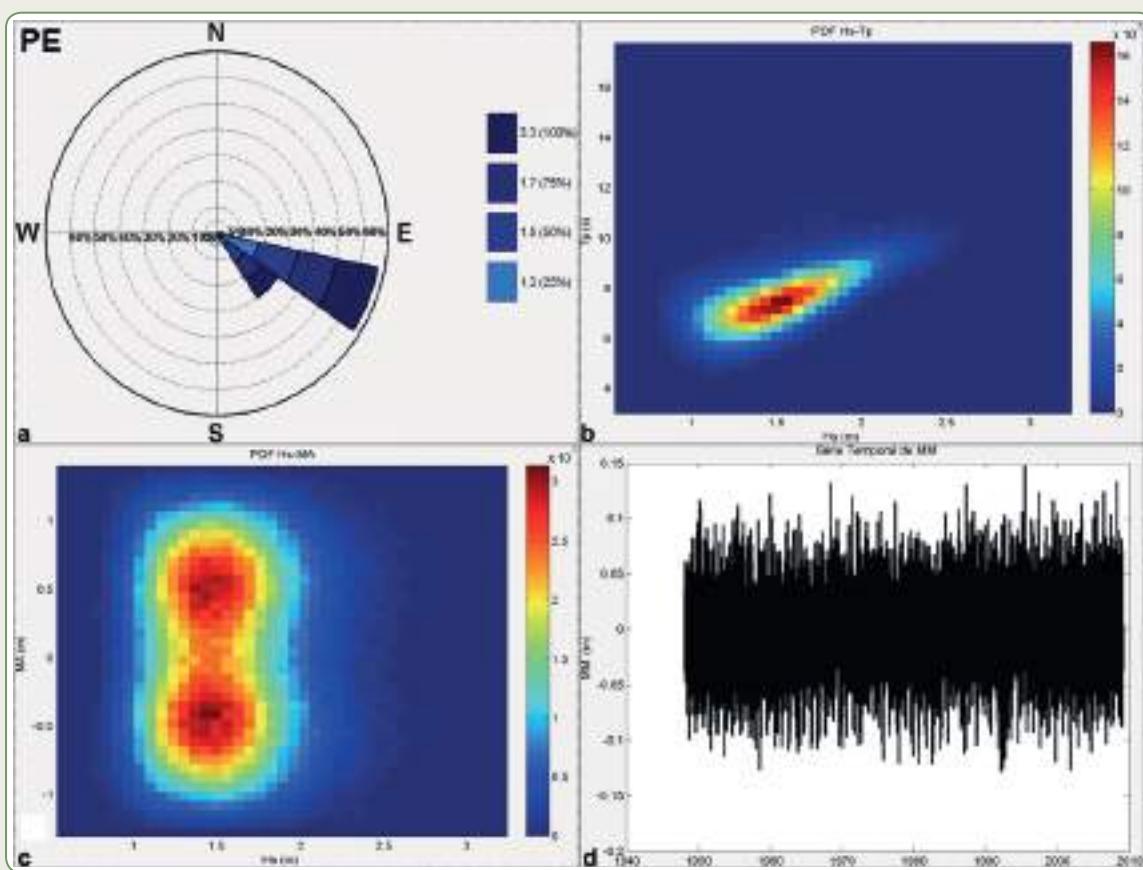
Santa Catarina: Pontos DOW em águas profundas, plataforma externa: a) direção e altura das ondas; b) histograma do período de onda – T_p (s); c) histograma da maré astronômica – MA (m); d) altura significativa de onda – H_s (m) x Maré meteorológica – MM (m)

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 2.3 – Variação do clima de ondas, maré astronômica e meteorológica nos estados do RJ e PE



(cont.)



Legenda:

Rio de Janeiro: Pontos DOW em águas rasas, plataforma interna: a) direção e altura das ondas; b) histograma da altura significativa de onda – H_s (m); c) histograma da maré astronômica – MA (m); d) série temporal da maré meteorológica – MM (m)

Pernambuco: Pontos DOW em águas rasas, plataforma interna: a) direção e altura das ondas; b) altura significativa da onda – H_s (m) x período da onda – T_p (s); c) altura significativa da onda – H_s (m) x maré astronômica – MA (m); d) série temporal da maré meteorológica – MM (m)

Fonte: Dos autores (2018).

Variação do clima de ondas entre águas profundas e rasas

Com o propósito de discutir a variação do clima de ondas entre águas profundas, intermediárias e rasas, uma comparação foi realizada pelos alunos entre os pontos DOW ao largo e pontos próximos à costa, em uma mesma latitude nas localidades previamente descritas. O clima de ondas incidente nesses lugares é diretamente dependente das ondas incidentes ao largo, da topografia da antepraia e da geração de ondas sobre a plataforma.

A Figura 2.4 ilustra as diferenças entre o clima de ondas ao largo e aquele incidente sobre a costa. A análise dos resultados gerados pelos alunos ilustra diferentes aspectos discutidos em sala de aula a respeito do clima de ondas. A comparação entre as Figuras 2.4a e 2.4b, referente às ondas incidentes na costa do Pará, ilustra a redução da altura significativa das ondas. Nesses histogramas observa-se uma redução de aproximadamente 50% da altura das ondas modeladas para águas profundas e aquelas incidentes sobre a costa. O padrão geral encontrado no histograma demonstra que toda a série de onda é reduzida e a frequência das ondas com menores alturas é amplificada.

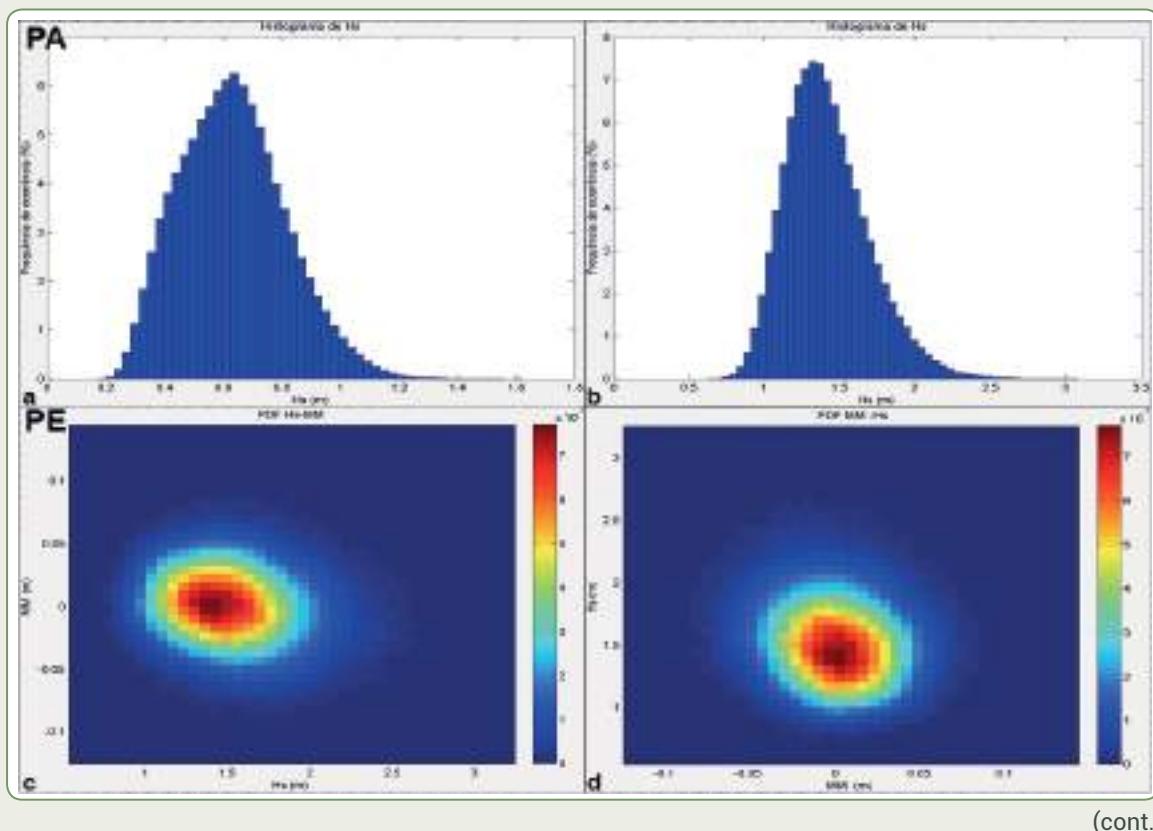
Já para a costa de Pernambuco, foram discutidas as diferenças entre as funções de distribuição acumulativa entre a maré meteorológica e a altura significativa (Figuras 2.4c e 2.4d). Em ambos os casos, devido à posição da costa pernambucana (entre, aproximadamente, 7,5 e 9,0° de latitude), a maré meteorológica pode ser considerada desprezível.

No Rio de Janeiro, assim como em Santa Catarina, discutiu-se com os alunos o efeito da batimetria na refração e difração das ondas (Figuras 2.4e, 2.4f, 2.4g e 2.4h). A região de Cabo Frio, por ser um cabo, permite a incidência de diversas direções de ondas. No entanto, devido à refração ao longo de sua plataforma, com cerca de 95 km de largura, as direções de incidência são reduzidas para apenas duas direções SE-S e S.

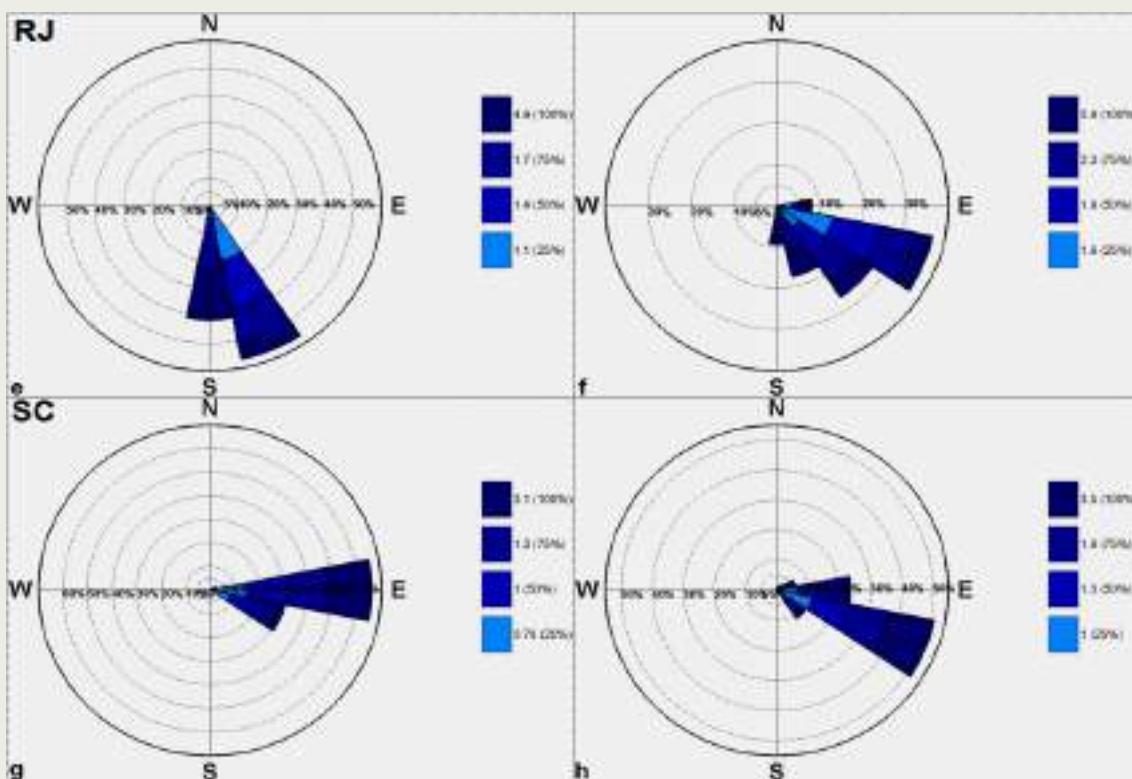
Nas adjacências da Praia de Navegantes, a direção das ondas em águas profundas é E-SE e próximo à costa é proveniente de E. Essa alteração na incidência das ondas é reflexo, sobretudo, da batimetria. Através do processo de refração a tendência das ondas é cada vez mais incidir sobre a costa de forma paralela, ou seja, com direção de E uma vez que a costa na praia em questão apresenta uma orientação norte-sul.

Adicionalmente ao processo de refração descrito acima, observou-se também uma redução na altura das ondas, comparando a frequência das alturas ao largo (Figuras 2.4f e 2.4h) com as incidentes próximas à costa (Figuras 2.4e e 2.4g). Todas as classes ilustradas na rosa das ondas tiveram suas alturas reduzidas quando da comparação.

Figura 2.4 – Comparação do clima de ondas para os estados do Pará (PA), Pernambuco (PE), Rio de Janeiro (RJ) e Santa Catarina (SC)



(cont.)



Legenda: Ao largo da costa (água profundas – coluna da direita, letras b, d, f, h) e próximo à costa, entre as isóbatas de 8 a 15 m (água intermediária a rasas – coluna da esquerda, letras a, c, e, g)

Fonte: Dos autores (2018).

Dessa forma, comparando os diferentes climas de ondas em águas profundas com águas intermediárias e rasas foi possível discutir com os alunos aspectos relacionados ao processo de refração/difração, além de aspectos relacionados à geração de ondas por ventos locais soprando sobre a plataforma, alterações nas alturas das ondas devido a dissipação de energia pelo fundo. Esses aspectos são de suma importância não só na caracterização do clima de ondas que incide sobre a costa, mas também nas consequências de eventuais alterações da batimetria por obras de engenharia.

Efeito de estruturas sobre a circulação e deposição de sedimentos

Exemplo constante nos cursos sobre o SMC, a modelagem da propagação de ondas monocromáticas sobre um quebra-mar também foi utilizada na disciplina para ilustrar a interação das ondas com estruturas e as consequências desse processo sobre a dinâmica costeira e a linha de costa.

Através da análise da Figura 2.5, discutiram-se com os alunos as alterações sofridas pelas ondas após passarem por um quebra-mar, difratando e gerando uma zona de sombra (Figura 2.5b). Observa-se a ocorrência do processo de empinamento da onda dentro do domínio do modelo, onde as ondas aumentam de altura até atingirem aproximadamente $x = 250$ m onde ocorre a arrebentação e consequente dissipação da energia.

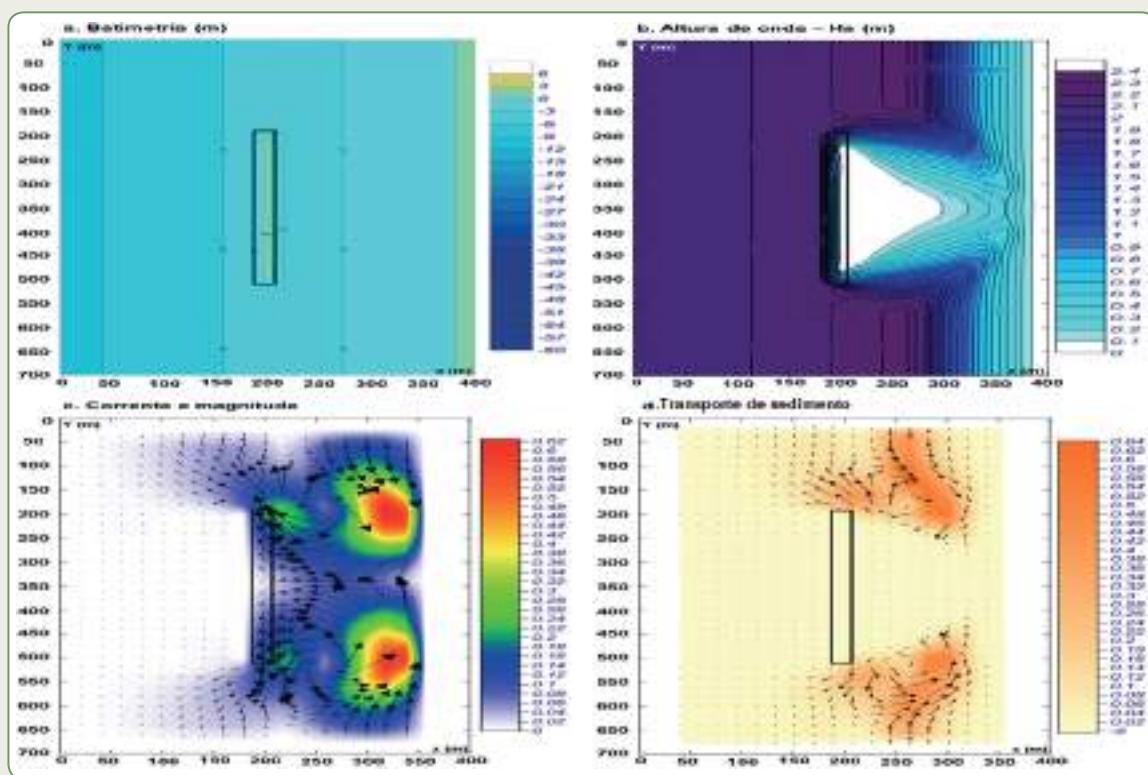
A difração é clara pelo gradiente de cores da Figura 2.5b na retaguarda do quebra-mar, assim como no padrão de circulação da Figura 2.5c. Nesta, é possível a identificação de duas células de

circulação, com maior magnitude próximo à praia, separadas por uma zona de ausência de correntes. A Figura 2.5d representa o transporte de sedimentos.

Os seguintes valores foram utilizados na confecção da Figura 2.5: tamanho dos sedimentos: $D_{50} = 0,25 \text{ mm}$ e $D_{90} = 0,40 \text{ mm}$; intervalo de tempo: tempo total = 500 segundos; resolução e tamanho da malha: a) dimensão: $x = 400 \text{ m}$ e $y = 700 \text{ m}$; b) espaçamento: linhas em $x \times 100 \text{ m}$ e colunas em $y \times 100 \text{ m}$; d) divisão: 5 linhas em x e 10 linhas em y .

Com o intuito de ilustrar como é gerado o perfil de equilíbrio encontrado por Dean (1973) e quais as fundamentações teóricas dele, os alunos realizaram a construção em 3D do perfil de equilíbrio (Figura 2.6a). Como esperado, o perfil apresenta-se de forma côncava e a partir dos valores utilizados para o tamanho dos sedimentos apresentou cotas entre 0 e 4 m de profundidade.

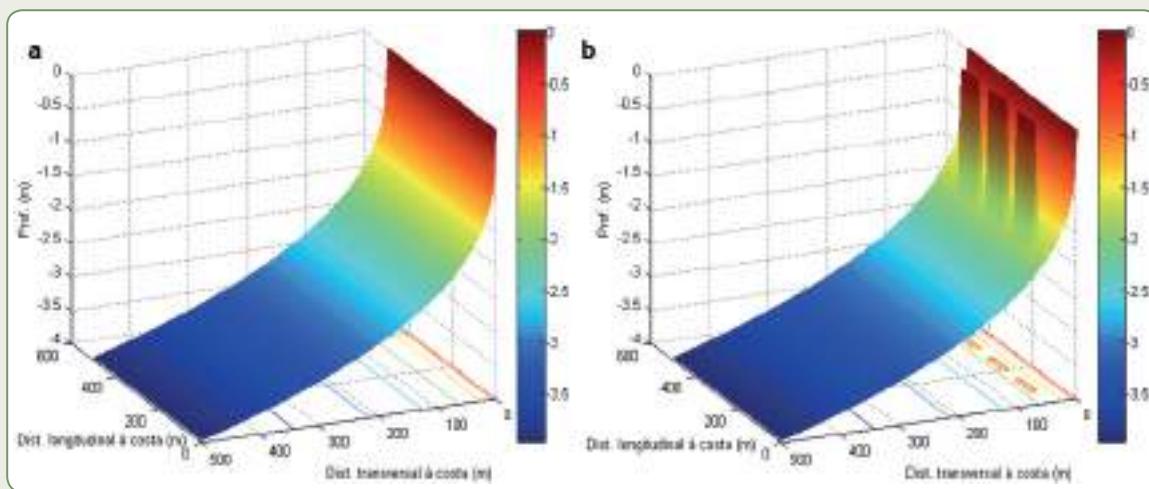
Figura 2.5 – Cenário hipotético contendo um quebra-mar (em $x = 200 \text{ m}$) em uma batimetria plano-paralela, modelado a partir do OLUCA



Legenda: a) batimetria; b) altura das ondas; c) magnitude e direção das correntes; d) transporte de sedimentos. Dados de entrada do modelo: $H_s = 2,0 \text{ m}$; $T_p = 8 \text{ s}$; Dir = 90° (em relação à linha de costa); Nível do mar = 0,0 m

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 2.6 – Batimetria côncava gerada a partir do perfil de equilíbrio de Dean sem (a) e com (b) a presença de um conjunto de três quebra-mares



Fonte: Dos autores (2018).

Visando diversificar mais as atividades práticas da disciplina, foi proposto aos alunos o desafio da implementação de três quebra-mares sobre o perfil criado a parir da equação de Dean. A Figura 2.6b ilustra o resultado obtido para o cenário da inserção de três quebra-mares paralelos à costa escolhidos pelos alunos. Os quebra-mares foram instalados a uma distância de 45 m da costa e apresentam um espaçamento de 60 m com cerca de 1,8 m de altura.

A partir da batimetria gerada contendo os quebra-mares, foram realizadas simulações através do OLUCA nas quais cada aluno reproduziu um cenário com diferentes alturas de ondas com incrementos de 0,5 m ($H_s = 1,0\text{ m}$; $H_s = 1,5\text{ m}$; $H_s = 2,0\text{ m}$; $H_s = 2,5\text{ m}$). Dentre os resultados gerados, optou-se por discutir os resultados obtidos pelo cenário de $H_s = 1,0\text{ m}$ (Figura 2.7). Os resultados ilustrados na Figura 2.7 demonstram os padrões obtidos para a altura significativa das ondas (Figura 2.7b), correntes (Figura 2.7c) e variações topográficas do perfil (Figura 2.7d).

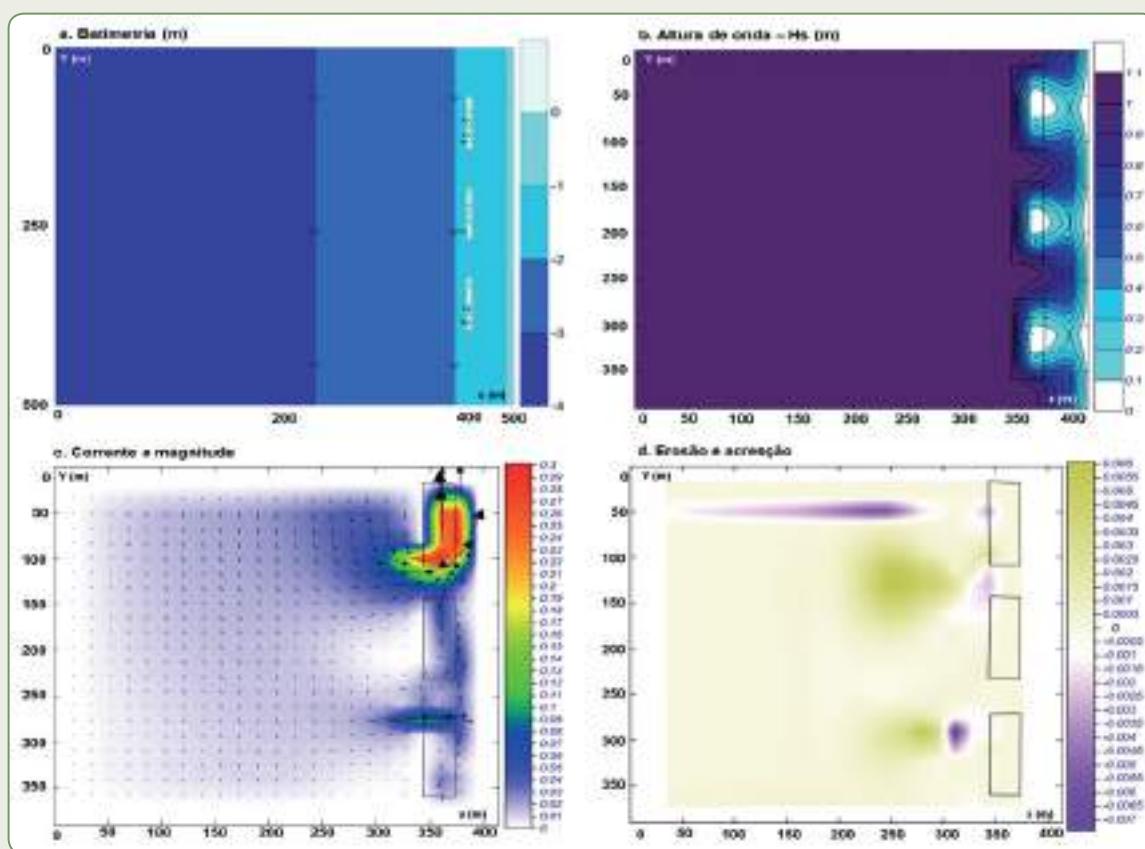
De forma contrária ao esperado pelos alunos, não se obteve a replicação dos padrões dinâmicos encontrados quando da realização do exercício com apenas um quebra-mar (Figura 2.5). A região de sombra das ondas existiu na retaguarda dos quebra-mares (Figura 2.7b), porém a circulação em célula visualizada na Figura 2.5c não foi replicada na Figura 2.7c, assim como os padrões de erosão/acreção (Figura 2.7d).

A partir de então, buscou-se discutir com os alunos as possíveis razões para justificar o inadequado funcionamento da estrutura. Dentre as razões, a mais amplamente discutida foi a da elevada proximidade dos quebra-mares com a costa e as rápidas transformações sobre as ondas impulsionadas pelo perfil côncavo de Dean *versus* a batimetria plano-paralela utilizada no exercício com apenas um único quebra-mar (Figura 2.6a).

Através do exercício de criação e implementação dos quebra-mares, os alunos puderam vivenciar aspectos relacionados à engenharia costeira, como distância da costa e espaçamento entre as estruturas e sua relação com a hidrodinâmica costeira em uma condição batimétrica mais próxima da realidade.

Os seguintes valores foram utilizados na confecção da Figura 2.7: tamanho dos sedimentos: $D_{50} = 0,25\text{ mm}$ e $D_{90} = 0,40\text{ mm}$; intervalo de tempo: tempo total = 500 segundos; resolução e tamanho da malha: a) dimensão: $x = 500\text{ m}$ e $y = 500\text{ m}$ (Figura 2.7a) e $x = 400\text{ m}$ e $y = 400\text{ m}$ (Figuras 2.7b, 2.7c e 2.7d); b) espaçamento: linhas em x 100 m e colunas em y 100 m; d) divisão: 5 linhas em x e 10 linhas em y .

Figura 2.7 – Cenário hipotético contendo três quebra-mares (em x = 360 m) em uma batimetria côncava oriunda do perfil de equilíbrio de Dean modelado a partir do OLUCA



Legenda: a) batimetria; b) altura das ondas; c) magnitude e direção das correntes; d) erosão e deposição de sedimentos. Dados de entrada do modelo: $H_s = 1,0\text{ m}$; $T_p = 8\text{ s}$; Dir. = 90° (em relação à linha de costa); Nível do mar = $0,0\text{ m}$

Fonte: Dos autores (2018).

Essa vivência mostrou o quanto é importante considerar aspectos dinâmicos, batimétricos e estruturais para o adequado funcionamento de uma estrutura costeira. Adicionalmente, realizou-se uma comparação entre o insucesso da estrutura criada com quebra-mares implementados na cidade de Olinda, onde o inadequado desenho da estrutura resultou na criação de contrassaliências e na remoção quase que completa dos sedimentos da praia (Figura 2.8). Em Olinda, os quebra-mares são maiores do que os ideais para o clima de ondas da região, além de terem um espaçamento reduzido e não seguirem um mesmo alinhamento.

Figura 2.8 – Quebra-mares construídos paralelamente à linha de costa na Praia do Rio Doce, município de Olinda (PE)*



*Nota-se a falta de alinhamento entre os quebra-mares

Fonte: Roberto Barcellos (2011).

CONCLUSÕES

No presente estudo demonstrou-se o uso do modelo SMC-Brasil como uma ferramenta de apoio à teoria através da modelagem de processos costeiros abordados na disciplina de Erosão e Proteção Costeira, bem como através de problemáticas comuns à região onde os alunos vivem.

Exemplos relacionados a cenários teóricos com um e três quebra-mares foram debatidos e exemplificados em sala de aula, discutindo a influência dessas estruturas sobre as ondas, as correntes, a erosão e a acreção, além do efeito conjunto desses parâmetros sobre a linha de costa. Adicionalmente a esses exemplos, aspectos relacionados à variabilidade do clima de ondas ao longo da costa brasileira e à variação entre águas profundas e rasas também foram discutidos em sala de aula.

Em suas práticas, os alunos têm tido a oportunidade de trabalhar com os dados de base do modelo, discutindo os diferentes climas de onda e o comportamento das marés astronômicas e meteorológicas ao longo da costa brasileira. Além desse fato, o uso da ferramenta tem sido de suma

importância para despertar nos alunos a necessidade de rigor técnico na coleta, no tratamento e na interpretação de dados referentes à batimetria, à hidrodinâmica e aos sedimentos.

Por fim, conclui-se que a possibilidade de utilizar o SMC-Brasil como ferramenta de ensino, não só tem atingido o objetivo do projeto do SMC-Brasil, em escala nacional, que é a transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão da costa brasileira, contribuindo para uma melhor gestão, como também tem assessorado na assimilação do conhecimento teórico os jovens profissionais em formação no Brasil.

REFERÊNCIAS

- BIRD, E. C. F.; KOIKE, K. **Coastline Changes: A Global Review**. Chichester: John Wiley and Sons, 1981.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC**: Documento temático – Ondas. Brasília: MMA, 2018a.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC**: Documento temático – Níveis. Brasília: MMA, 2018b.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual do usuário – SMC-Tools. Brasília: MMA, no prelo (a).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual do usuário – SMC 3.0. Brasília: MMA, no prelo (b).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual de referência – Modelo de propagação de ondas monocromáticas em praias (OLUCA-MC). Brasília: MMA, no prelo (c).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual de referência – Modelo de propagação de ondas espectrais em praias (OLUCA-SP). Brasília: MMA, no prelo (d).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual de referência – Modelo de correntes por quebra em praias (COPLA-MC/SP). Brasília: MMA, no prelo (e).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual de referência – Modelo de erosão/sedimentação de praias (EROS). Brasília: MMA, no prelo (f).
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual de referência – Modelo de evolução do perfil transversal de praia (PETRA). Brasília: MMA, no prelo (g).
- CAMUS, P.; MÉNDEZ, F. J.; IZAGUIRRE, C.; REGUERO, B. G.; MEDINA, R. Statistical and Dynamical Downscaling to Transfer Wave Climate to Coastal Areas. In: European Geosciences Union, 2010, Vienna, Áustria. **Proceedings...** Viena, 2010.
- DEAN, R. G. Heuristic Models of Sand Transport in the Surf Zone. In: Conference on Engineering Dynamics in the Surf Zone, 1., 1973, Sydney. **Proceedings...** Sydney, 1973, p. 208-214.
- FINEP/UFPE. **Monitoramento Ambiental Integrado – MAI**. Recife, 2009. 457 p.
- FRANKE, R. Scattered Data Interpolation: Test of Some Methods. **Mathematics Computation**, v. 38, p. 181-200, 1982.
- FREIRE, P. **Pedagogia da autonomia**: saberes necessários à prática educativa. São Paulo: Paz e Terra, 1996.
- MALMANN, D. L. B.; PEREIRA, P. S. Coastal Erosion at Maria Farinha Beach, Pernambuco, Brazil: Possible Causes and Alternatives for Shoreline Protection. **Journal of Coastal Research**, v. 71, p. 24-29, 2014.
- MANSO, V. A.; COUTINHO, P. N.; GUERRA N. C.; SOARES JÚNIOR, C. F. A. Pernambuco. In: MUEHE, Dieter (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006. p.179-196.

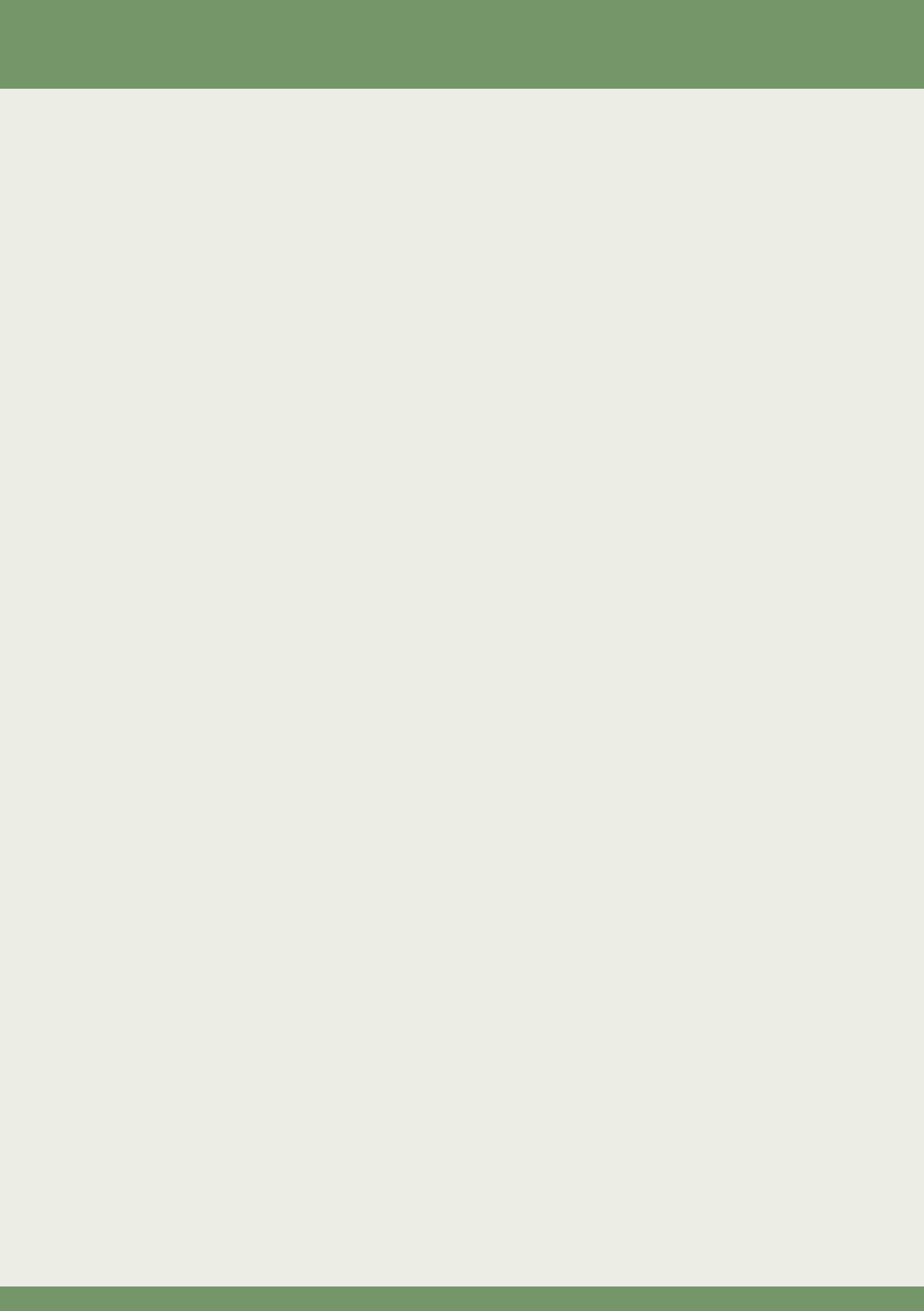
MARTINS, K. A.; PEREIRA, P. S. Coastal Erosion at Pau Amarelo Beach, Northeast of Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 71, p. 17-23, 2014.

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

SILVA, R.; MARTÍNEZ, M. L.; HESP, P.; CATALAN, P.; OSORIO, A. F.; MARTELL, R.; FOSSATI, M.; MIOT DA SILVA, G.; MARIÑO-TAPIA, I.; PEREIRA, P.; CIENFUEGOS, R.; KLEIN, A.; GOVAERE, G. Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. In: SILVA, R.; STRUSIŃSKA-CORREIA, A. (Ed.). **Coastal Erosion and Management along Developing Coasts: Selected Cases**. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 71, p. 1-16, 2014.

SOUZA, C. R. G. A erosão costeira e os desafios da gestão costeira no Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 9, n. 1, p. 17-37, 2009. DOI 10.5894/rgci147.

ZHANG, K.; DOUGLAS, B. C.; LEATHERMAN, S. P. Global Warming and Coastal Erosion. **Climatic Change**, v. 64, Issue 1, p. 41-58, 2004.



COMPARAÇÃO DE VERSÕES DO SMC-BRASIL NO ESTUDO DA CIRCULAÇÃO HIDRODINÂMICA NA PRAIA DE SOLEDADE, LITORAL SETENTRIONAL DO RIO GRANDE DO NORTE, NORDESTE DO BRASIL

David Jefferson Cardoso Araújo
Lívian Rafaely de Santana Gomes
Ana Maria Teixeira Marcelino
Venerando Eustáquio Amaro
Ada Cristina Scudelari

RESUMO

Este artigo trata do regime de ondas e correntes incidentes na Praia de Soledade, litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, mediante a análise comparativa das duas versões mais recentes do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), identificando mudanças na simulação dos processos hidrodinâmicos em setores de plataforma continental extensa, rasa e com alta dinâmica sedimentar. A Praia de Soledade é palco de processos erosivos intensos, que afetam atividades industriais importantes para a economia regional, sendo imprescindível a compreensão dos processos meteoceanográficos que atuam ali. O clima de ondas foi constituído pelo banco de dados que integra o SMC-Brasil. Para propagação de ondas e correntes, foram utilizados os modelos espectrais de geração de ondas e correntes do SMC-Brasil (OLUCA e COPLA). Os resultados obtidos demonstram que na área de estudo predominam ondas incidentes com intervalo de direção entre norte e leste-sudeste.

Dos 24 cenários modelados, apenas aqueles associados ao caso direcional leste-sudeste não obtiveram resultados válidos. Nos demais, a versão mais atual do SMC-Brasil exibiu desempenho superior ao propagar ondas para o restante dos cenários marítimos simulados, enquanto que a versão anterior apresentou dificuldades ao propagar casos direcionais de norte-nordeste, nordeste, leste-nordeste e leste. Com relação às correntes, exceto pelos casos direcionais leste-nordeste e leste, modelados com a versão mais atual, não foram obtidos resultados para as situações de preamar em regime extremo. Em linhas gerais, o uso do SMC-Brasil transcorreu com algumas dificuldades, devido a especificidades da região e das características do modelo.

Palavras-chave: Modelagem numérica. Processos hidrodinâmicos. Praias arenosas.

INTRODUÇÃO

A constante interação de fenômenos provenientes dos compartimentos atmosférico, terrestre e marinho faz da zona costeira uma região com dinâmica única. Suas características físicas, seu atrativo paisagístico e a sua rica biodiversidade marinha e terrestre propiciam um leque de possibilidades de uso e ocupação, destacando-se as atividades econômicas, de transporte, residenciais e recreacionais. A transgressão da linha de costa na Praia de Soledade ameaça as instalações dos campos petrolíferos Macau e Serra, da PETROBRAS, os quais comportam unidades de bombeamento, queimadores de gás natural, torres eólicas e oleodutos (SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011; SANTOS; AMARO, 2013; SANTOS; AMARO; SANTOS, 2014a, 2014b).

Essas atividades e intervenções realizadas em espaço comum geram conflitos e pressões, que acabam por comprometer a capacidade de suporte dessas zonas, bem como seu equilíbrio ambiental. Atrelados à elevada densidade demográfica nas áreas próximas à linha de costa (BRASIL, 2006) estão, entre outros, a expansão urbana de cidades, de serviços e o aumento de plantas industriais. Essas intervenções humanas representam fonte de impactos significativos e uma ameaça constante à qualidade ambiental (BRASIL, 2002).

Apesar das pressões antrópicas, resultantes principalmente da sua ocupação desordenada e de intervenções inapropriadas, diariamente as zonas costeiras estão sujeitas a processos naturais, exercidos por forçantes meteoceanográficas. A ação desses agentes tem grande capacidade de transportar materiais e causar mudanças significativas na paisagem litorânea, principalmente na ocorrência de eventos mais energéticos, tais como tempestades ou ressacas marinhas.

Uma das consequências mais comuns resultantes da complexa interação entre os eventos naturais e as ações antrópicas em um ambiente costeiro é o processo de erosão, sendo a forma mais visível da manifestação desse fenômeno dada pelo recuo da linha de costa (CHARLIER; MEYER, 1998). E dentre os agentes hidrodinâmicos citados, as ondas e as correntes merecem especial atenção por serem dois dos principais componentes ambientais propulsores de mudanças em tais zonas.

Dessa forma, é de fundamental importância que as tomadas de decisões e possíveis intervenções baseadas em obras de engenharia, no âmbito das atividades de competência do gerenciamento costeiro, sejam embasadas em informações confiáveis e de longo prazo sobre o comportamento da dinâmica litorânea.

Recentemente, uma série de instrumentos e técnicas vem sendo desenvolvida para a obtenção de dados de ondas. Dentre eles podem ser citados as observações visuais, os instrumentos técnicos de medida, como boias, e o uso de satélites. No entanto, limitações relacionadas principalmente à confiabilidade e a resoluções espaciais e temporais de dados (REGUERO et al., 2012) motivaram o

interesse no desenvolvimento de modelos numéricos de onda que utilizam como dados de entrada informações sobre velocidade do vento a 10 m de altura (CAIRES; STERL, 2003).

As informações obtidas a partir de técnicas de modelagem e reanálises de onda, apesar de algumas deficiências, apresentam-se como uma forma otimizada para interpolar dados com precisão no tempo e no espaço (CAIRES et al., 2004), possibilitando a obtenção de informações confiáveis sobre o clima de ondas de qualquer região, inclusive para aquelas que não apresentam qualquer tipo de registro. Além disso, esses registros podem ser utilizados como dados de entrada para modelos capazes de transferir as informações para regiões de menor profundidade, representar os fenômenos de transformação sofridos pelas ondas e propagar correntes em zonas mais próximas da costa.

O SMC-Brasil integra um conjunto de ferramentas que inclui metodologias, base de dados de dinâmica marinha e modelos numéricos, que permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais e/ou de atuações antrópicas na costa, em séries temporais longas.

Localizada no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte (RN), a Praia de Soledade está inserida em ambiente de alta vulnerabilidade e sensibilidade ambiental, no qual se constata uma intensa variabilidade na posição da linha de costa, potencializada pela ação de agentes hidrodinâmicos e pelas características geomorfológicas da região. Destaca-se ainda a presença de atividades com alto potencial poluidor, a exemplo das indústrias de petróleo e salineira. No decorrer dos anos, processos associados à alta mobilidade dos sedimentos têm resultado em agravos às instalações e equipamentos alocados ao longo desse trecho (SANTOS; AMARO; SANTOS, 2014a, 2014b). A ocorrência de um acidente de maiores proporções implicaria prejuízos ecossistêmicos significativos.

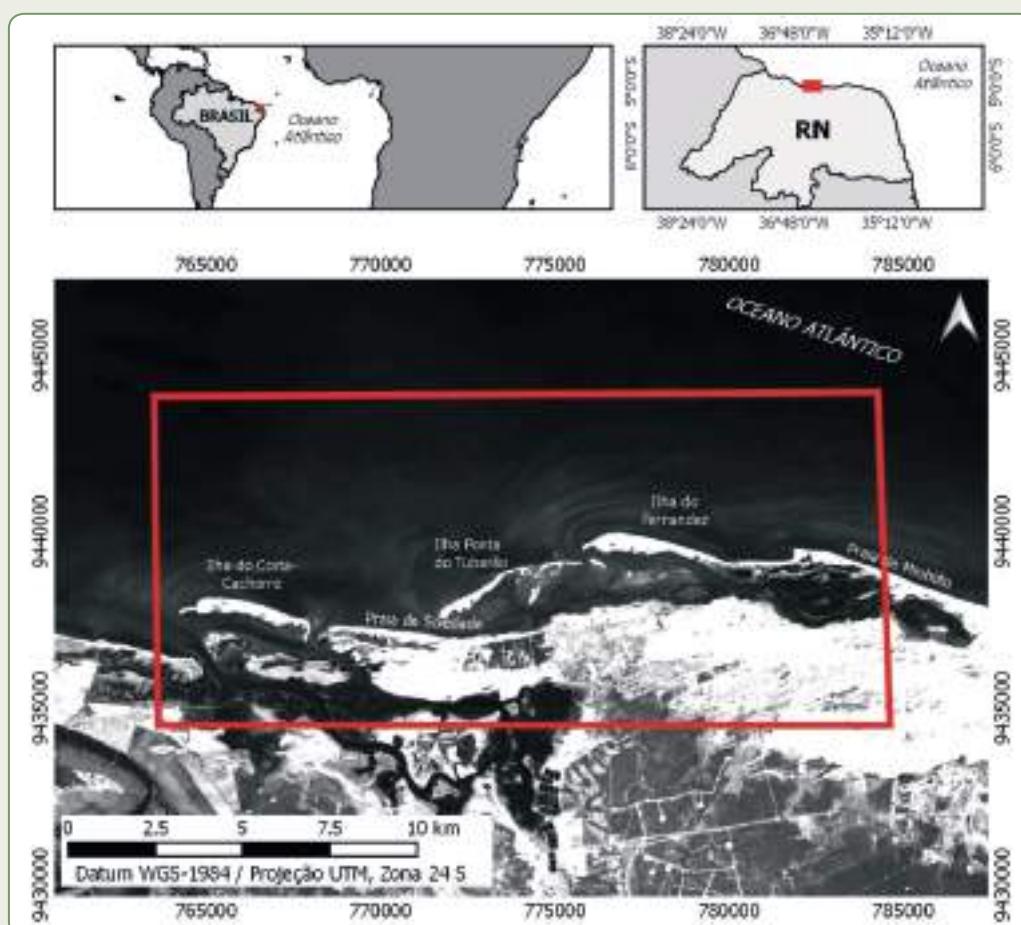
Para auxiliar as tomadas de decisão quanto a possíveis intervenções (existentes e que possam vir a se realizar) nessa zona costeira, bem como para gerar informações que subsidiassem posteriores atividades de licenciamento ambiental e de gestão pelo órgão ambiental do RN (Instituto do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Rio Grande do Norte – IDEMA) foi desenvolvida, por meio do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), uma frente de trabalho com o objetivo de conhecer o comportamento natural de agentes hidrodinâmicos na região (mais especificamente ondas e correntes), e suas possíveis interações com obras públicas e privadas ali instaladas. Verificou-se que, devido às características geomorfológicas e hidrodinâmicas peculiares da área em questão, a aplicação do SMC-Brasil não foi eficaz, concluindo-se, ao final do trabalho, que a impossibilidade da obtenção de resultados satisfatórios ocorreu, principalmente, por limitação da ferramenta.

No entanto, foi desenvolvida e disponibilizada uma nova versão do SMC-Brasil, o que motivou a realização de um novo projeto. Neste trabalho, os resultados obtidos com as duas versões serão comparados de forma a avaliar possíveis melhorias e aperfeiçoamentos efetuados na nova versão e, com isso, verificar a viabilidade de sua aplicação em setores com as características da Praia de Soledade.

ÁREA DE ESTUDO

Localizada no município de Macau, litoral setentrional do Rio Grande do Norte, a Praia de Soledade é banhada pelo Oceano Atlântico Equatorial a norte, limitada a sul por canal de maré e está inserida no sistema de ilhas-barreiras na foz do estuário do Rio Piranhas-Açu (Figura 3.1).

Figura 3.1 – Localização da área de estudo no litoral setentrional do Rio Grande do Norte, compondo o sistema de ilhas-barreiras na foz do estuário do Rio Piranhas-Açu*



* O plano de base da figura é uma imagem do satélite Landsat-8 de 01/06/2013

Fonte: Dos autores (2018).

Aspectos climáticos

Segundo dados da normal climatológica fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), medida entre os anos de 1961 e 1990, o clima da região é semiárido quente, tipo BSW'h na classificação de Köppen-Geiger (NIMER, 1989), com uma estação seca entre junho e janeiro, a estação chuvosa indo de fevereiro a maio, e com a precipitação mensal média de 50 mm. O teor de umidade condiciona a mobilidade potencial dos sedimentos emersos, em função da coesão hidrostática da película de água que envolve os grãos.

A insolação é uma das mais elevadas do Brasil, com média diária de 7,22 horas, acompanhando temperatura atmosférica com média anual de 27°C, podendo ultrapassar os 40°C em termos absolutos no mês de novembro. A transferência de energia solar à massa de água oceânica fomenta as condições de salinidade, em função dos níveis de evaporação, e temperatura, parâmetros determinantes à viscosidade e ao comportamento hidrodinâmico na zona costeira (STEWART, 2006).

O regime de ventos mostra a influência dos alísios de NE, com velocidade média anual de $4,81 \pm 2,0$ m/s, com máximos em setembro, registrando até $6,5 \pm 2,0$ m/s e coincidindo com o período

mais seco (MATOS et al., 2011, 2013). Os ventos mais fortes são os de NE; entretanto, a frequência predominante é de SE para os meses de agosto a setembro, mudando para E durante os meses de outubro a novembro, em virtude do deslocamento meridional da Zona de Convergência Intertropical durante o ano (MELO; CAVALCANTI; SOUZA, 2009). O cisalhamento entre o escoamento atmosférico e a superfície do mar contribui com o trabalho hidráulico envolvido com a ondulação marítima (JEFFREYS, 1925).

Aspectos oceanográficos

O nível do mar varia em regime de mesomarés semidiurnas, segundo a classificação de Davis (1964), com amplitude de aproximadamente 3 m, além de dois eventos de preamar e dois eventos de baixamar por dia.

Os processos deposicionais na área de estudo são originados principalmente por transporte eólico, trabalho hidráulico de ondas, correntes e marés, predominando carreamento para oeste (W) de sedimentos pela deriva litorânea. O período construtivo, maior volume de sedimentos no perfil praial, ocorre entre os meses de março e julho, com ventos suaves de sudeste (SE) e ondas de baixa energia. Entre os meses de agosto e fevereiro, com ventos fortes de NE e ondas de alta energia, configura-se o período destrutivo ou de predominância de retirada de sedimentos de trechos de praias arenosas (SANTOS; AMARO, 2013).

Aspectos geológicos e geomorfológicos

A linha de costa na região de estudo é recortada em ilhas-barreiras, barras, pontais, praias arenosas expostas e abrigadas, além de canais de maré do estuário do Rio Piranhas-Açu, com intensa movimentação de reabertura e fechamento dos canais. A Praia de Soledade se encontra a nordeste parcialmente abrigada pela ilha-barreira da Ponta do Tubarão.

A instabilidade da zona costeira, além dos aspectos hidrodinâmicos, mostra importante interação com o controle tectônico do Sistema de Falhas Afonso Bezerra-Carnaubais (RIOS; AMARO, 2012). Esse aspecto é definido nos locais preferenciais de reabertura e migração de canais de maré pela correlação entre as direções de surgimento de canais e os lineamentos tectônicos, mapeados por Valentim da Silva e Amaro (2008), Souto (2009) e Valentim da Silva et al. (2010), além de evidências em sondagens rasas realizadas com *vibracore* por Rios e Amaro (2012).

A plataforma continental setentrional do Rio Grande do Norte tem largura entre 30 e 40 km, gradiente de 1:1.000, com a quebra a partir das isóbatas de 50 a 60 m (VITAL; SILVEIRA; AMARO, 2005). A porção submersa da Bacia Potiguar alcança cota batimétrica de 2.000 m (PESSOA NETO et al., 2007). Segundo Vital et al. (2008), as dunas submersas longitudinais são em geral assimétricas, apresentam cristas paralelas à linha de costa, estando as maiores alocadas em lâminas d'água de até 10 m, chegando a 6 m de altura, com larguras variando de 400 a 900 m, com predominância de areia siliciclástica. As dunas transversais ocorrem entre as isóbatas de 10 e 20 m, sendo assimétricas e com cristas orientadas na direção NE-SW, predominando areia com bioclastos e grãos carbonáticos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item foram discriminados a base de dados, as equações e os modelos utilizados como informações de entrada e subsídio para a atividade de modelagem referente à propagação de ondas e correntes atuantes na Praia de Soledade. As informações obtidas com esse procedimento metodológico serão fundamentais para a elaboração de casos a serem propagados. A partir da elaboração dos casos, estes foram executados por meio das duas versões do SMC-Brasil, a mais atual (nov. 2014) e a anterior (out. 2013). Os resultados obtidos foram comparados com o intuito de verificar possíveis melhorias e aperfeiçoamentos advindos da nova versão, na aplicação à Praia de Soledade.

Clima de ondas

O SMC-Brasil possibilita a análise do clima de ondas em três zonas específicas de determinada região, delimitadas pela relação entre a profundidade e a interação do leito com a propagação de ondas, a saber: zonas de águas profundas (ou profundidades indefinidas), caracterizadas por apresentarem a razão entre profundidade da coluna de água (h) e o comprimento de onda (L) maior que 0,5; águas consideradas rasas, que apresentam h/L igual a 0,04; e as profundidades que se enquadram entre esses dois valores, consideradas zonas intermediárias.

As ondas características de zonas intermediárias e de profundidades indefinidas constituem a base de dados de ondas do SMC-Brasil, e representam uma informação de entrada fundamental quando da utilização dos modelos numéricos que integram o sistema.

A caracterização do clima de onda em profundidade intermediária, nesse trabalho, se deu através da seleção de um ponto DOW representativo para a região. Sua escolha levou em consideração os aspectos limitantes do modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*, modelo numérico utilizado nessa etapa), bem como comparações estatísticas, dos principais parâmetros de onda fornecidos com uma série de outros pontos analisados. Como resultado, foram obtidos diagramas e quadros, apresentados através de uma abordagem estatística de curto e longo prazo, dos respectivos parâmetros, a saber: altura significativa de onda (H_s), período de pico (T_p), direção média de onda (θ_m), sob as condições médias (índice “50%” ou apenas “50”), ou, ainda, estados de mar superados em apenas 12 horas ao ano (índice “12”), que refletem condições extremas. Esses resultados são utilizados como dados de entrada para posteriores etapas da atividade de modelagem.

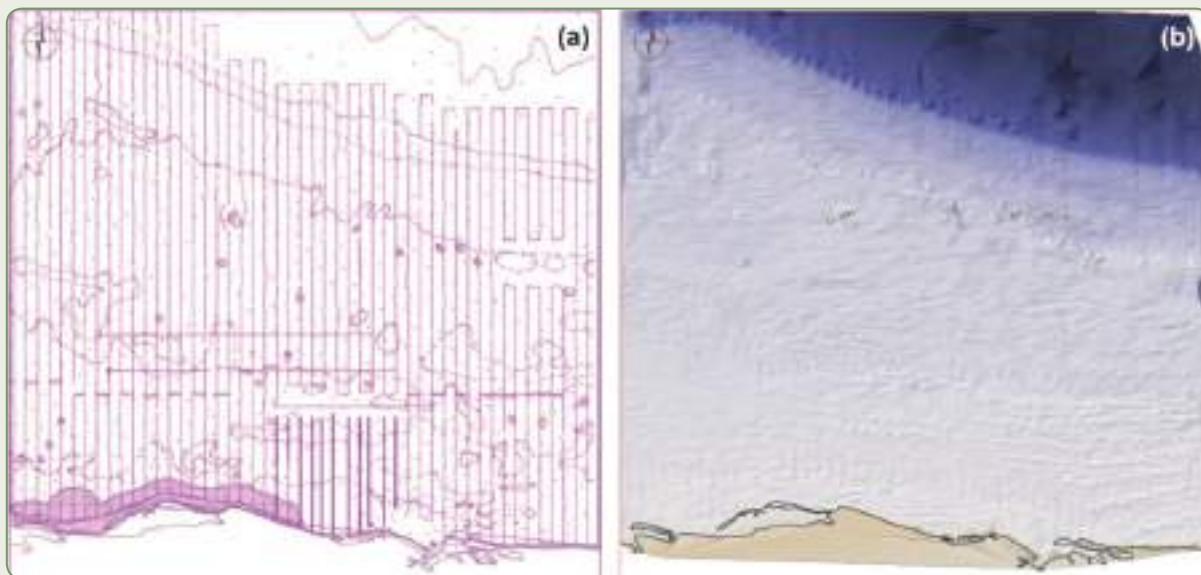
Dados batimétricos

A utilização de batimetrias com boa qualidade, satisfatória representação da característica morfológica da região de estudo, é fundamental para a obtenção de resultados confiáveis no processo de propagação de onda. Para o presente estudo, além das cartas náuticas (CN) brasileiras integradas ao banco de dados do SMC-Brasil IHDATA-BACO, três conjuntos de dados batimétricos foram empregados, a saber: (i) vetorização da versão mais recente da CN 720, fornecida pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (disponível no sítio eletrônico: http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html); (ii) levantamento batimétrico realizado em 2005 pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Geologia e Geofísica Marinha e Monitoramento

Ambiental (GGEMMA) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); e (iii) batimetria de detalhe levantada em 2014, nas adjacências da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Ponta do Tubarão (RDSPT), no âmbito do Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) da UFRN, segundo a metodologia de Ferreira, Amaro e Santos (2014). Para essa informação batimétrica, os dados foram fornecidos em grade já corrigidos para o Nível de Redução (NR) ou nível de baixamar média de sizígia, sendo efetuado apenas o acréscimo de 0,5 m em virtude do *offset* da sonda.

A Figura 3.2 ilustra a batimetria originada a partir da associação dos dados supracitados. Os dados da CN 720 apuraram a representação do terreno em relação ao banco IHDATA-BACO, em virtude do maior detalhamento de pontos. Os dados UFRN-2005 representam bem algumas das feições descritas por Vital et al. (2008). A batimetria da RDSPT, realizada em 2014, apresenta um rebatimento da superfície, não havendo ainda informações do substrato de fundo suficientes para atribuir essa observação a alguma variação vertical no leito da plataforma continental, ou a questões de resolução e/ou metodologia do levantamento. Alguns ajustes e suavizações foram realizados manualmente, através das ferramentas de edição do SMC-Brasil, para definir melhor as ilhas e a linha de costa mais recente possível – através de imagens Google Earth® para 2014.

Figura 3.2 – Mapa da associação dos dados batimétricos disponíveis para a modelagem da Praia de Soledade no SMC-Brasil



Legenda: a) batimetria de edição; b) batimetria regenerada

Fonte: Dos autores (2018).

Casos propagados

Os casos propagados nesse trabalho (Quadro 3.1) levaram em consideração as direções predominantes obtidas com a análise do ponto DOW P04 (N, NNE, NE, ENE, E e ESE), os níveis de maré de preamar e baixamar e os regimes marítimos sob condições médias normais e sob condições de tempestade. Na Quadro 3.1 é possível observar os casos propagados e todos os parâmetros utilizados. Para a região da Praia de Soledade, de acordo com a CN 720, o NR se encontra 140 cm abaixo do nível médio do mar na região; tendo sido utilizado o valor de 2,8 m para a modelagem de casos de dinâmica marinha sob o efeito das marés altas. As cotas do nível do mar com relação ao comportamento das

marés refletem a coerência entre as informações históricas disponíveis e a série temporal utilizada no SMC-Brasil.

Quadro 3.1 – Parâmetros de onda utilizados para os casos de propagação no SMC-Brasil

Casos	H _{s50%} (m)	T _{p50%} (s)	H _{s12} (m)	T _{p12} (s)	γ	σ_{θ} (graus)	Maré (m)
N	1,4886	12,8089	----	----	8	15	2,8
	1,4886	12,8089	----	----	8	15	0
	----	----	3,0680	18,1960	8	15	2,8
	----	----	3,0680	18,1960	8	15	0
NNE	1,4046	11,1779	----	----	8	15	2,8
	1,4046	11,1779	----	----	8	15	0
	----	----	2,8331	17,6364	8	15	2,8
	----	----	2,8331	17,6364	8	15	0
NE	1,2727	10,6516	----	----	8	15	2,8
	1,2727	10,6516	----	----	8	15	0
	----	----	2,0104	16,0687	8	15	2,8
	----	----	2,0104	16,0687	8	15	0
ENE	1,1648	9,3960	----	----	3,3	20	2,8
	1,1648	9,3960	----	----	3,3	20	0
	----	----	1,7205	13,6363	8	15	2,8
	----	----	1,7205	13,6363	8	15	0
E	1,1142	7,7798	----	----	3,3	20	2,8
	1,1142	7,7798	----	----	3,3	20	0
	----	----	1,5971	11,8939	8	15	2,8
	----	----	1,5971	11,8939	8	15	0
ESE	1,0845	6,1612	----	----	3,3	20	2,8
	1,0845	6,1612	----	----	3,3	20	0
	----	----	1,5184	10,0649	8	15	2,8
	----	----	1,5184	10,0649	8	15	0

Legenda: Índices com subscritos "50%" e "12" correspondem a condições médias de estado do mar e de tempestade e valores superados doze horas ao ano, respectivamente. O parâmetro corresponde ao fator de alargamento do pico e ao parâmetro de dispersão angular

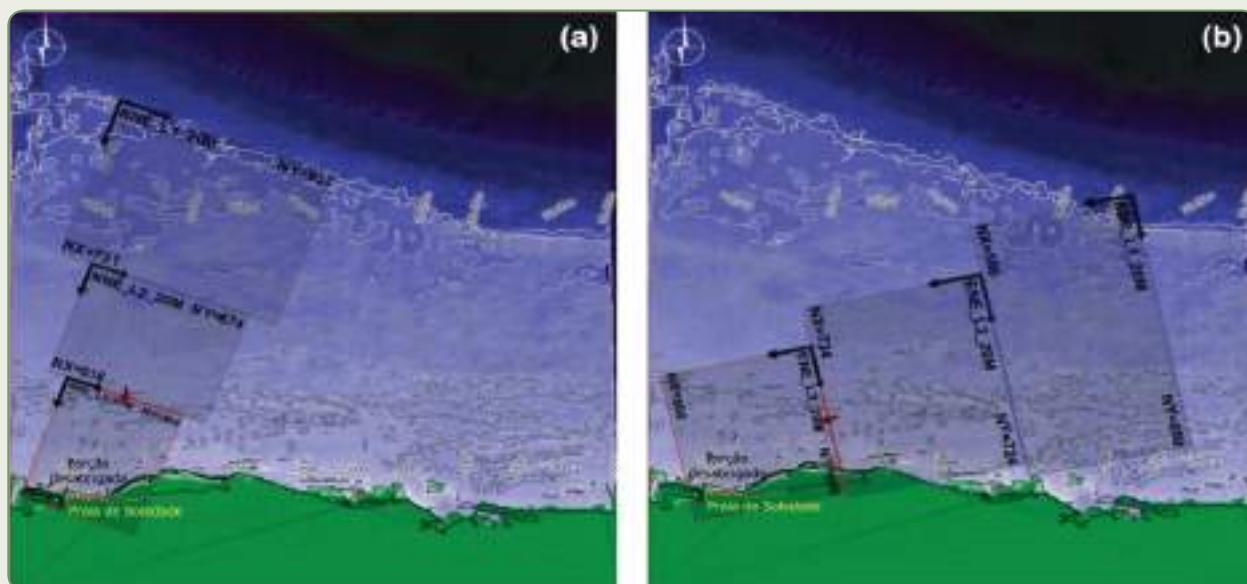
Fonte: Dos autores (2018).

Malhas utilizadas na propagação das ondas

Devido à extensão da plataforma costeira defronte à Praia de Soledade, com aproximadamente 40 km do talude até a faixa de praia, foi necessário implementar dois conjuntos de malhas, cada qual com três malhas concatenadas, com as bordas de entrada alocadas em cotas batimétricas de até 20 m (Figura 3.3). O primeiro conjunto apresenta um ângulo azimutal de 110° da aresta de entrada e foi utilizado para propagar os casos de onda provenientes das direções N, NNE e NE (Figura 3.3a),

com resolução (espaço entre os nós) de 20 m. Com essa configuração, foi possível distanciar a área desabrigada da Praia de Soledade em 15% de ambas as bordas laterais da malha acoplada que atinge a linha de costa – tendo em vista a instabilidade de resposta do modelo nessas faixas – otimizando a extensão em área das malhas mediante o custo computacional da propagação. O segundo conjunto de malhas, com azimute de 168°, com resolução de 24 m, foi utilizado para propagar as ondas de direção ENE, E e ESE (Figura 3.3b). Nessas condições, as ondas de ESE entram na malha com inclinação de aproximadamente 30° em relação à direção de propagação (258° azimutais), atendendo ao limite de 60° para o giro que o modelo é capaz de realizar na simulação. No entanto, para essas malhas não foi possível distanciar a Praia de Soledade em 15% da faixa de borda lateral, tendo em vista que malhas maiores excederam a capacidade computacional na versão mais antiga do SMC-Brasil. As malhas foram mantidas para a versão mais recente, a título de comparação dos resultados.

Figura 3.3 – Malhas de propagação de ondas no MOPLA



Legenda: a) casos com ondas de N, NNE e NE; b) casos com ondas de ENE, E e ESE

Fonte: Dos autores (2018).

Propagação de ondas até a linha de costa

Ao se aproximar de regiões de menor profundidade contíguas à costa, a interação das ondas com o fundo ocasiona uma série de transformações em suas características, condicionadas por diversos processos, dos quais se destacam a reflexão, a difração, a refração e o empinamento. O entendimento dessas características e dos processos envolvidos com a chegada das ondas à costa é de relevante importância, já que são elas um dos principais propulsores das mudanças morfológicas das praias.

Nessa etapa do procedimento, foi utilizado o Modelo de Propagação de Ondas Espectral (OLUCA-SP), o qual corresponde a um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase (MRF). Esse modelo discretiza uma função de densidade de probabilidade ou um espectro de energia fora da costa, em um número de seções de energia, às quais são associados componentes de onda como amplitude, frequência e direção. A propagação de cada componente de energia permite obter, em todos os pontos do domínio, as características estatísticas do espectro de onda, mediante superposição linear (BRASIL, no prelo). O modelo OLUCA-SP ainda é capaz de reproduzir a interação onda-corrente, através da

formulação proposta por Kirby (1986), e prevê perda de energia devido à quebra de ondas mediante três diferentes modelos estatísticos de dissipação.

Para o presente estudo de caso foi utilizado o modelo de Thornton e Guza (1983), que é baseado na similaridade da dissipação de energia devida à quebra das ondas e que considera a distribuição de alturas de onda em um ponto do tipo *Rayleigh*. No entanto, por ser baseado em uma Equação Parabólica de Declividade Suave, o modelo OLUCA-SP apresenta algumas limitações quanto à direção das ondas que se deseja propagar (restringindo-se a $\pm 55^\circ$ na direção x da malha retangular de propagação). Por isso, na propagação dos estados de mar obtidos com a série DOW, foram utilizadas malhas com diferentes orientações, de forma a serem compatíveis com as direções de ondas incidentes na área de estudo.

As ondas associadas a um estado de mar são definidas a partir de um espectro bidimensional, composto por um espectro frequencial e uma função de dispersão de direção. O modelo OLUCA-SP permite duas maneiras de definir o espectro frequencial (BOUWS et al., 1985), uma mediante a leitura de um arquivo externo e outra a partir de um espectro *Texel Marsen Arsloe* (TMA). Nesse estudo foi utilizado o TMA aplicado em áreas próximas à costa onde as profundidades são relativamente pequenas e as ondas são afetadas pelo fundo, definido a partir de um espectro JONSWAP. Na propagação é utilizada a Função de Dispersão Direcional Normalizada de Borgman (1984). Os parâmetros de entrada para cada espectro direcional propagado ficam definidos por quatro parâmetros de entrada para o espectro TMA e dois parâmetros para a Função de Dispersão Normal (BRASIL, no prelo), como ilustrado no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Parâmetros de entrada para o espectro TMA e para a Função de Dispersão Direcional

Espectro TMA	Função de Dispersão Direcional
h – profundidade (em metros)	θ_m – direção média das ondas (em graus)
H_s – altura de onda significativa (em metros)	
f_p – frequência de pico (em Hz)	
γ – fator de alargamento do pico	σ_θ – largura do espectro (em graus)

Fonte: Dos autores (2018).

Os parâmetros γ e σ_θ caracterizam a forma do espectro bidimensional e dependem somente do período de pico da onda, segundo os seguintes intervalos: se $4 \leq T_p < 10$, $\gamma = 3,3$ e $\sigma_\theta = 20$; se $T_p \geq 10$, $\gamma = 8$ e $\sigma_\theta = 15$.

Para o cálculo do termo não linear existente no Modelo de Propagação Parabólico Onda-Corrente, o SMC-Brasil permite definir três funções diferentes, a saber: uma para a Teoria Linear, outra baseada na Teoria de Stokes e a terceira, correspondente a um Modelo Composto. Para a modelagem de propagação de ondas da Praia de Soledade foi utilizado o Modelo Composto. Com relação ao termo correspondente à dissipação de energia das ondas, devido ao atrito com o fundo, foi utilizado um fator para camada-limite turbulenta no fundo.

Sistema de correntes geradas por ondas

Assim como as ondas, a atuação das correntes influencia sobremaneira as variações morfológicas das praias, principalmente pela sua capacidade de transporte de sedimento. Dentre os diversos tipos de correntes capazes de contribuir para o desenvolvimento da linha de costa, aquelas geradas em decorrência da arrebentação das ondas podem ser consideradas as mais importantes.

Na simulação do sistema de circulação hidrodinâmica na costa, o SMC-Brasil utiliza o modelo numérico de Correntes Induzidas pela Quebra de Onda Espectral (COPLA-SP), o qual se baseia na solução de equações médias do movimento e na equação da continuidade. As informações de entrada provêm da propagação realizada com o modelo OLUCA-SP, no mesmo domínio computacional.

O modelo incorporado ao SMC-Brasil considera a geração de correntes apenas pela ação das ondas. O responsável por essa condição é denominado *Tensor de Radiação*, conceito desenvolvido por Longuet-Higgins e Stewart (1962), termo que pode ser entendido como o excesso de quantidade de movimento, dentro da zona de arrebentação, promovido pela quebra das ondas.

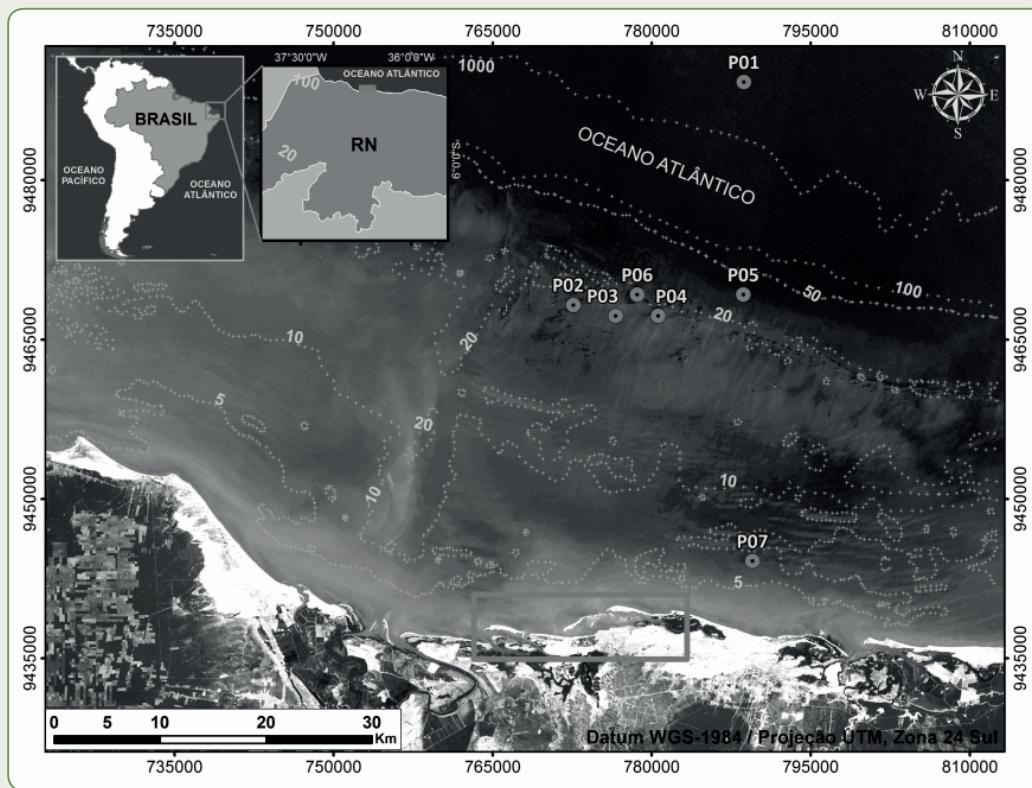
Além disso, outros dois parâmetros importantes que influenciam o movimento das correntes são a *Rugosidade de Fundo* (expressa pelo coeficiente de Chezy) e a *Viscosidade Turbulenta* (ε). Ambos são responsáveis por dissipar energia, consumindo quantidade de movimento. O coeficiente de Chezy está presente no termo correspondente à rugosidade, o qual também é formulado em função da profundidade e de velocidades médias. Ele é analisado em função de variabilidades espacotemporais associadas à profundidade total (H) e à rugosidade efetiva (K_{swc}). Para modelagem das correntes foi utilizado K_{swc} igual a 1, valor recomendado para áreas de praia com interação onda-corrente. A viscosidade turbulenta é utilizada para descrever a turbulência na zona de arrebentação. A intensidade da turbulência causada pela quebra das ondas é distribuída por toda a zona de arrebentação, e seus efeitos começam a ser mais relevantes que o atrito de fundo em zonas de maior profundidade, sendo utilizado o valor 10 para a modelagem do sistema circulatório desenvolvido nesse estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Clima de ondas ao largo

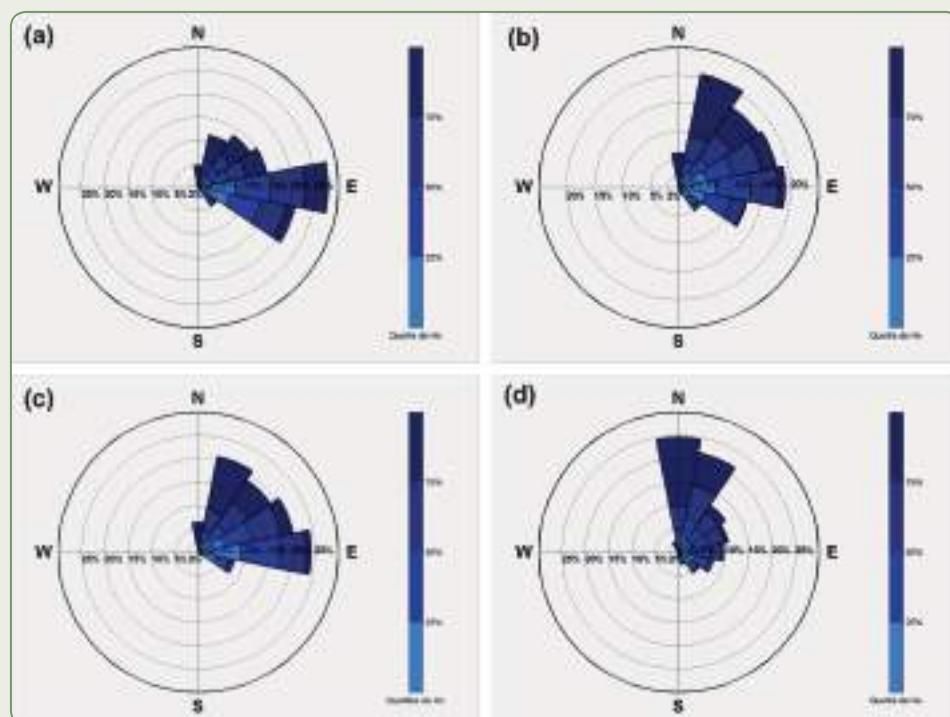
Sete pontos DOW foram coletados para a análise do clima de ondas da Praia de Soledade (Figura 3.4). Observou-se que as ondas já sofrem os efeitos de refração devido a interações de fundo a partir de 50 m de cota batimétrica. Conforme se aproxima da costa, a direção de propagação das ondas mais frequentes gira de E-W para N-S (Figura 3.5a, b, c, d). Esse fato poderia acarretar prejuízos às posteriores etapas da modelagem devido a incoerências dos dados de entrada, uma vez que o SWAN – um dos modelos embutidos na metodologia de transferência de onda do SMC-Brasil – não representa fielmente alguns efeitos sofridos pelas ondas em regiões de menor profundidade. Para representar regionalmente os parâmetros de onda da área de estudo foi escolhida a cota batimétrica mínima o mais próxima possível de 20 m, diante dos resultados de Matos et al. (2013) sobre o comportamento da propagação por SWAN na área de estudo apresentando pouca variação entre as características da onda a partir da cota de 50 m. Essa escolha teve o propósito de reduzir a dimensão das malhas computacionais tendo em vista as limitações computacionais envolvidas na propagação com uso de malhas muito extensas no SMC-Brasil.

Figura 3.4 – Localização dos pontos DOW analisados (P01 a P07), com as cotas batimétricas oriundas da Carta Náutica nº 720 da Marinha do Brasil



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 3.5 – Diagramas em rosa de altura significativa de ondas (H_s) para os pontos DOW analisados na região defronte à Praia de Soledade



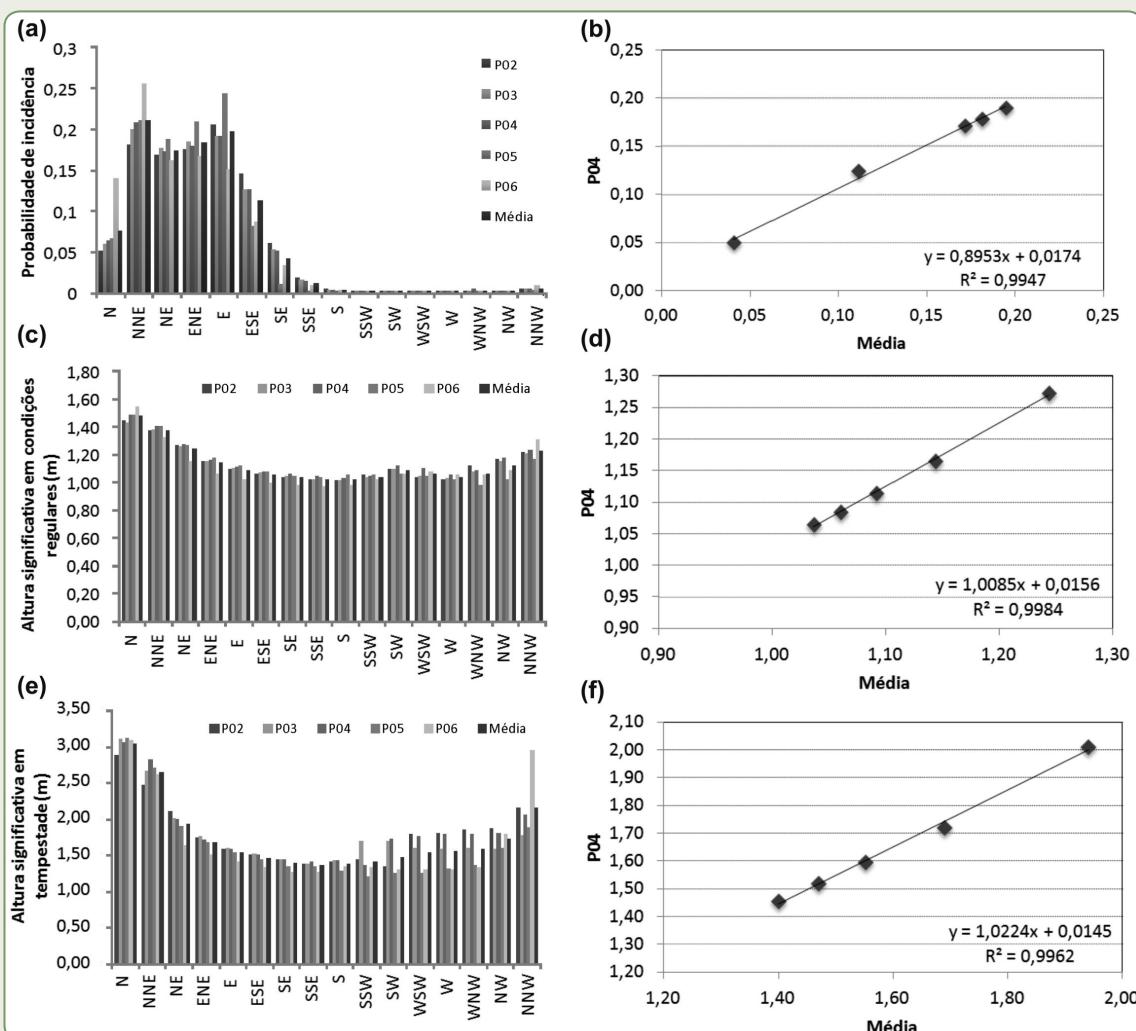
Legenda: a) ponto P01; b) ponto P04; c) ponto P05; d) ponto P07

Fonte: Dos autores (2018).

Em virtude do excelente ajustamento com relação aos parâmetros H_s e T_p (Figura 3.6), além da localização geográfica em cota batimétrica de 19,02 m e sua posição em relação à Praia de Soledade, foi escolhido o ponto P04 para representar o clima de ondas na zona de profundidades intermediárias da área de estudo.

A partir dos principais parâmetros de onda associados ao ponto DOW P04, verifica-se que ao largo da área de estudo ocorrem sete direções predominantes, as quais somam 97,97% dos estados do mar apresentados pela série temporal (Quadro 3.3), a saber: N, NNE, NE, ENE, E, ESE e SE, podendo ser visualizadas na rosa de direções (Figura 3.5b). As ondas de direção NNE, NE, ENE, E e ESE são de ocorrência mais frequentes, mas deve-se levar em consideração as outras direções, pois como pode ser observado, as ondas de direção N, com probabilidade de ocorrência de apenas 6,12%, apresentam as maiores alturas significativas. Constatata-se também, por exemplo, que em condições médias (ou valor de determinado parâmetro não superado em 50% do tempo de referência) o maior período de pico ($T_{p50\%}$) correspondeu a 12,8 segundos na direção N, e os menores valores de $H_{s50\%}$ e $T_{p50\%}$ foram de 1,0647 m e 4,7291 s, respectivamente, na direção SE.

Figura 3.6 – Histogramas das séries de dados para os pontos DOW analisados



Legenda: a) histograma da probabilidade de incidência de onda; b) regressão linear da probabilidade de incidência de H_s em função da média aritmética entre todos os pontos; c) histograma de H_s em condições médias de mar; d) regressão linear de H_s em condições regulares; e) histograma de H_s em condições de tempestade; e f) regressão linear de H_s em condições de tempestade para o ponto P04

Fonte: Dos autores (2018).

Na ocorrência de eventos capazes de fornecer mais energia às ondas, como em casos de tempestades, foi adotado o parâmetro H_s superado em apenas 12 horas ao ano (H_{s12}). Os maiores e menores valores de H_{s12} também corresponderam a ondas de direções N e SE, equivalentes a 3,068 e 1,4569 m, enquanto os períodos de pico (T_{p12}) apresentaram valores de 18,196 s e 8,9019 s, respectivamente.

Quadro 3.3 – Probabilidade de ocorrência de altura significativa de onda (H_s) e período de pico (T_p) para o ponto P04

Direções	Prob. Direções	$H_{s50\%}$ (m)	$T_{p50\%}$ (s)	H_{s12} (m)	T_{p12} (s)
N	0,0612	1,4886	12,8089	3,068	18,196
NNE	0,2054	1,4046	11,1779	2,8331	17,6364
NE	0,1711	1,2727	10,6516	2,0104	16,0687
ENE	0,1779	1,1648	9,396	1,7205	13,6363
E	0,1899	1,1142	7,7798	1,5971	11,8939
ESE	0,1242	1,0845	6,1612	1,5184	10,0649
SE	0,05	1,0647	4,7291	1,4569	8,9019

Fonte: Dos autores (2018).

Propagação de ondas até a linha de costa

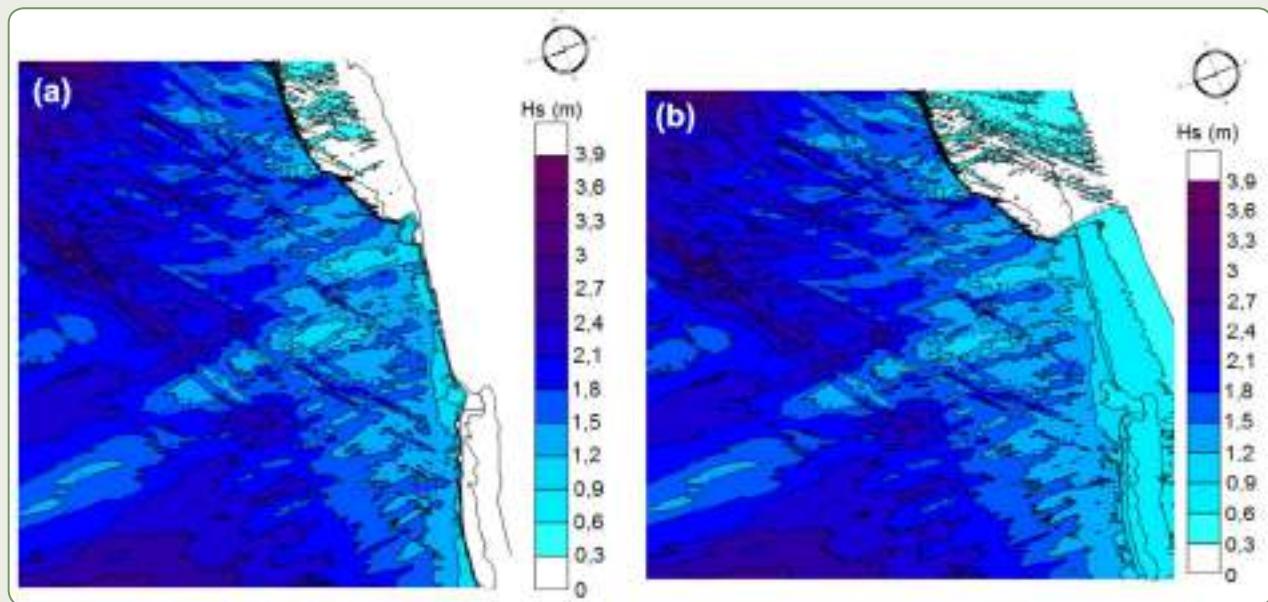
Ondas associadas a condições médias de clima marítimo

Os casos englobados nessa categoria de agitação marítima foram executados com êxito quando propagados com a versão mais atual do SMC-Brasil. Com a antiga versão, não foi possível obter resultados satisfatórios para as propagações de ondas incidentes das direções ENE e E, nem para a situação de baixamar com ondas incidentes de NE. No geral, analisando os diagramas obtidos quando ambas as versões obtiveram êxito, verificam-se comportamentos semelhantes. Em situações de baixamar, o alcance das ondas é recuado em algumas dezenas de metros em relação ao alcance máximo da linha d'água atual, no entanto, é possível observar os fenômenos associados de difração-refração em todas as direções predominantes. Ondulações artificiais são geradas nas bordas da batimetria de detalhe RDSPT, existindo também efeito provocado pela ilha Ponta do Tubarão. Durante as situações de preamar essas transformações se tornam menos perceptíveis devido à amortização da influência de fundo com a subida da coluna d'água.

As ondas incidentes da direção N, nas situações de baixamar, propagam-se até aproximadamente a cota de 5 m com direção perpendicular à região de estudo, antes de iniciar-se o efeito de refração decorrente da presença das dunas submersas longitudinais. Em situações de preamar é possível observar que a região a leste da Praia de Soledade bem como aquela defronte à ilha Ponta do Tubarão estão expostas às menores alturas de onda. Esse fato decorre do efeito de difração sofrido pelas ondas em virtude das feições fictícias geradas pela interpolação na borda de junção dos dados da batimetria de detalhe RDSPT e as demais, levantadas em épocas diferentes (Figuras 3.7 e 3.8). Sob essa perspectiva,

a interpolação de informações defasadas temporalmente pode resultar em elementos representados no atual relevo marinho. A presença dessas feições residuais exerce uma influência significativa na propagação das ondas, uma vez que criam um agente capaz de dissipar energia das ondas e agir como elemento fictício de proteção.

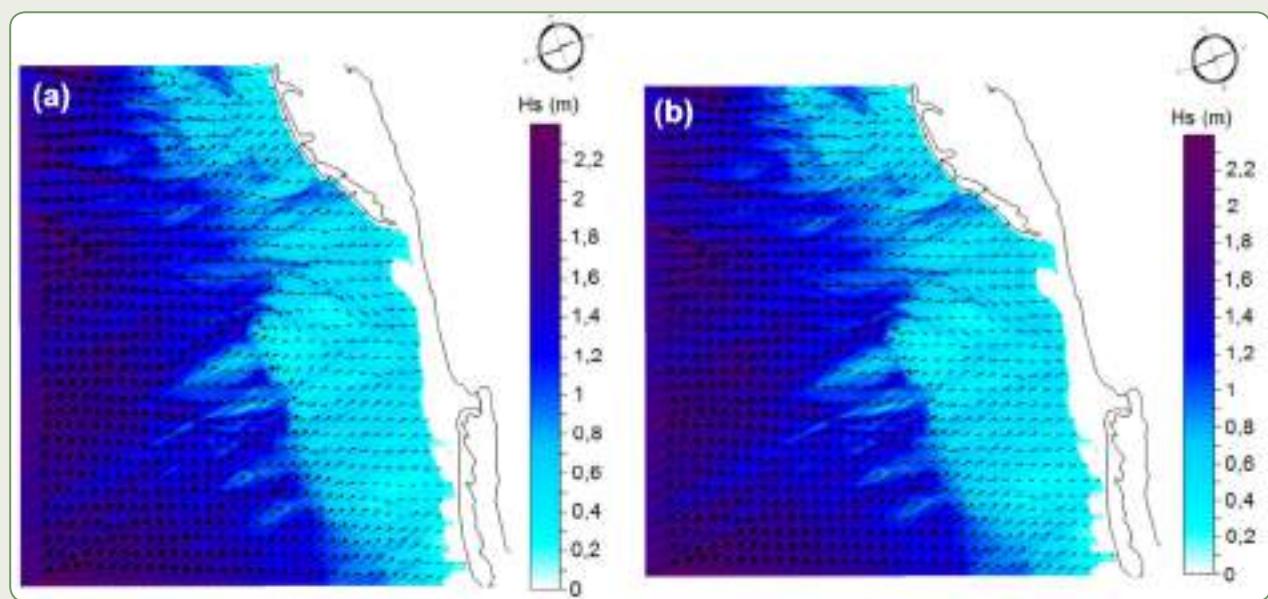
Figura 3.7 – Isolinhas de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas de N, sob as condições médias de agitação marítima e situações de preamar



Legenda: a) versão de nov. 2014; b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 3.8 – Vetores e magnitude de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas de N, sob as condições médias de agitação marítima e situações de baixamar



Legenda: a) versão de nov. 2014; b) versão de out. 2013

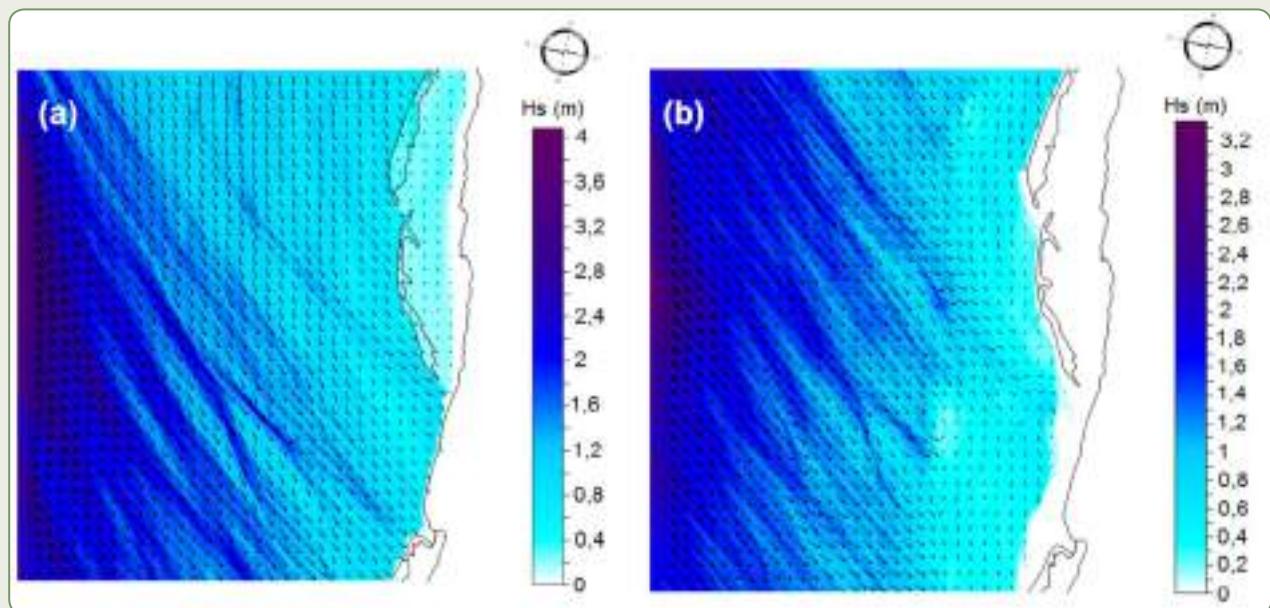
Fonte: Dos autores (2018).

As ondas de direção NE e NNE, tanto para as situações de preamar quanto de baixamar, chegam à costa com características bem semelhantes às ondas de direção N. As ondas sofrem refração ao se aproximarem das regiões mais rasas e o espectro tende a se igualar em termos de direção média, quando atingem a costa.

Nas situações de preamar apresentadas até o momento, as ondas alcançam a Praia de Soledade de forma heterogênea em termos de H_s , com direção quase normal em relação a sua orientação, apresentando variação de altura entre 0,3 e 1,2 m. Nessa situação de maré, as ilhas-barreiras são afetadas pela ação das ondas, sendo verificada a ocorrência de imersão parcial e/ou lavagem da ilha da Ponta do Tubarão (fenômeno de *washover*), em razão da incidência das ondas de maiores alturas, da ordem de 1,5 m.

Com relação à propagação de ondas incidentes de E e ENE obtida com a versão mais atual do modelo, para alguns casos não foram obtidos resultados satisfatórios. Contudo, é possível perceber uma maior obliquidade de chegada das ondas em relação à costa, com valores de H_s variando em torno de 0,3 m nas situações de baixamar e 0,6 m nas situações de preamar. Também são perceptíveis fenômenos de refração devido à presença de elementos na batimetria de fundo, e fenômeno de *washover* sobre as ilhas (Figura 3.9).

Figura 3.9 – Vetores e magnitude de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas



Legenda: a) ondas de E e situação de preamar; b) ondas de ENE em situações de baixamar (ambos sob condições médias de agitação marítima, obtidos com a versão novembro 2014)

Fonte: Dos autores (2018).

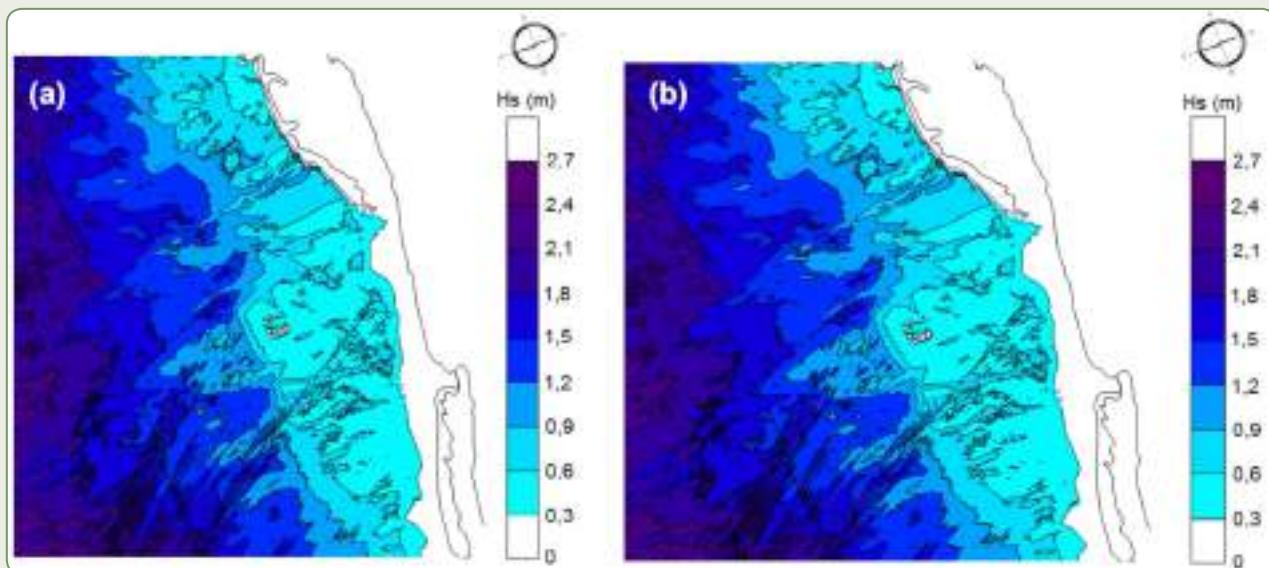
Ondas associadas às condições extremas de clima marítimo

Assim como nas propagações para condições médias de clima marítimo, os casos com ondas incidentes das direções E e ENE só foram possíveis de se obter com a versão mais recente do SMC-Brasil. Para os outros casos, ambas as versões executaram os casos propagados e geraram resultados praticamente idênticos.

Em condições de baixamar, as ondas incidentes de N não alcançam a praia, atingindo apenas a ilha da Ponta do Tubarão, com uma H_s máxima de 0,9 m (Figura 3.10). Em frente a essa ilha é possível

observar processos associados de refração-difração. Em condições de preamar, as ondas chegam à costa de forma heterogênea, com direção normal à Praia de Soledade e efeitos de refração junto a Ilha Ponta do Tubarão, com valores de H_s que variam de 0,3 a 1,5 m. Em regiões mais distantes da costa é possível observar diferentes efeitos de difração sobre os vetores de onda resultantes da interação da onda com elementos de fundo (Figura 3.11).

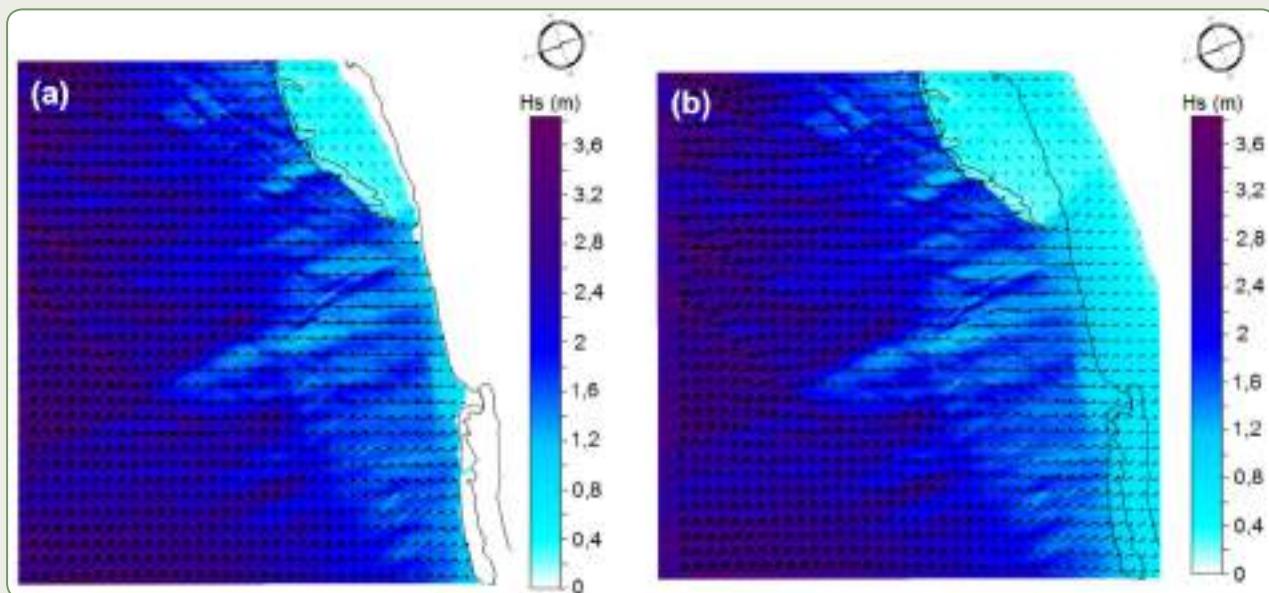
Figura 3.10 – Isolinhas de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas de N, sob as condições extremas de agitação marítima e situações de baixamar



Legenda: a) versão de nov. 2014, b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 3.11 – Vetores e magnitude de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas de N, sob condições extremas de agitação marítima e situações de preamar

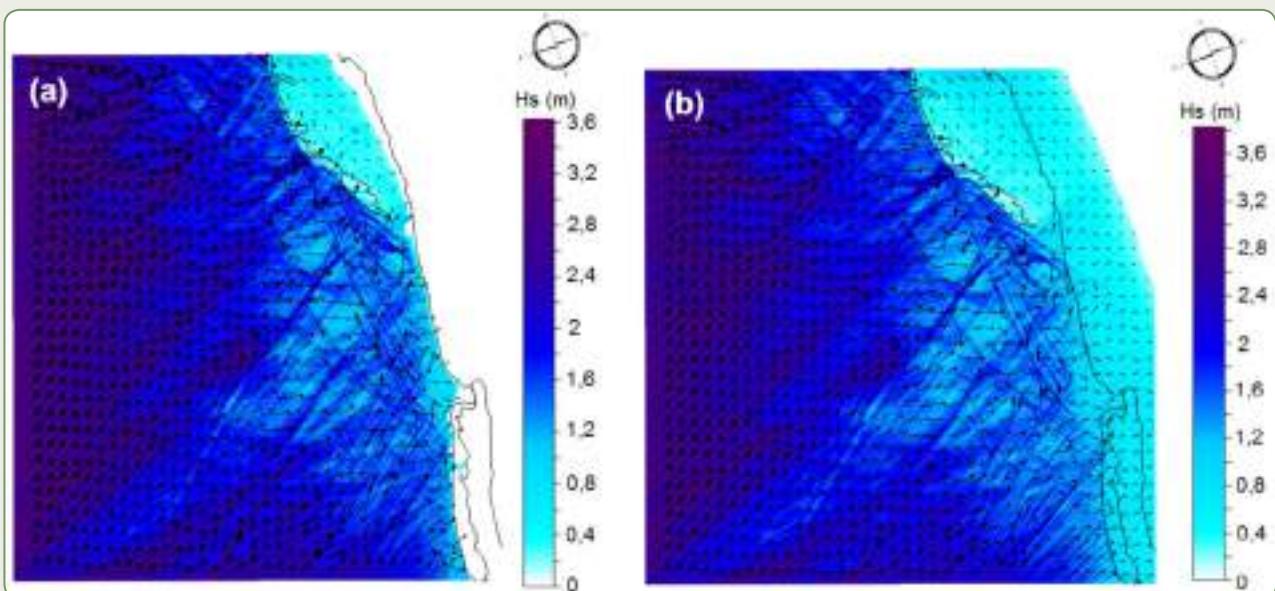


Legenda: a) versão de nov. 2014, b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

Com relação aos casos propagados com ondas incidentes de NE, tanto em condições de baixamar quanto de preamar, nem todos os diagramas apresentaram respostas apropriadas para análise. A partir da Figura 3.12 é possível perceber que na região contemplada pela batimetria de detalhe, principalmente em zonas mais rasas, os vetores de direção de onda exibem comportamento desordenado. Do ponto de vista da magnitude das ondas, são verificadas alturas máximas de 1,2 m na praia e 1,8 na ilha. Nesta última feição ainda é observada ocorrência de *washover* devido ao alcance da maré e às alturas significativas de ondas incidentes (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Vetores e magnitude de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas de NE, sob condições extremas de agitação marítima e situações de preamar



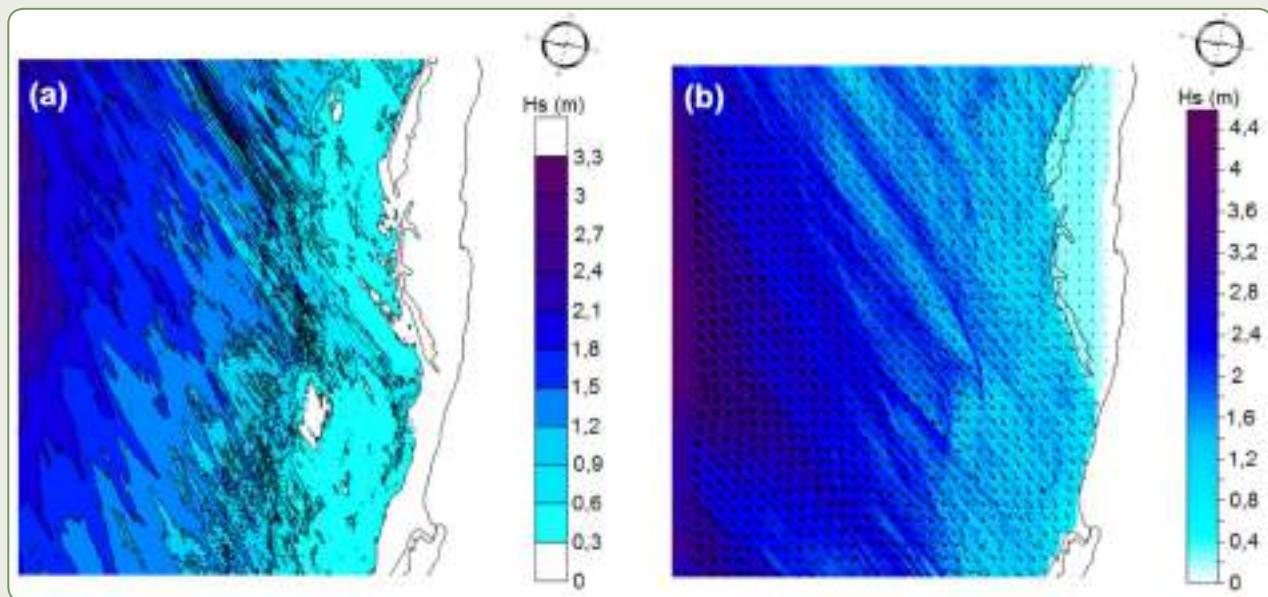
Legenda: a) versão de nov. 2014; b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

As ondas provenientes da direção NNE apresentaram características bem semelhantes aos casos apresentados anteriormente, tanto para as situações de baixamar quanto para as de preamar.

Para as ondas incidentes de ENE e E, também foram verificados padrões de chegada da onda à linha de costa semelhante aos outros casos propagados. No entanto, é possível perceber maior obliquidade destas em relação à praia, tornando mais visível o fenômeno de refração. Em situações de baixamar são constatadas alturas de onda em torno de 0,3 e 1,8 m em situações de preamar (Figura 3.13).

Figura 3.13 – a) Isolinhas de altura significativa de onda (H_s) em propagação de ondas de E e situação de baixamar; e b) vetores mais magnitude em situações de preamar para ondas de ENE



Legenda: Ambos sob as condições extremas de agitação marítima, obtidos com a versão de nov. 2014

Fonte: Dos autores (2018).

No geral, assim como nos casos associados a condições médias de onda, para os casos extremos observa-se que as ondas chegam à costa apresentando padrões bem semelhantes, porém, com valores de alturas de onda incidindo diretamente sobre as praias e ilhas variando entre 0,3 e 1,8 m. Somente uma pequena porção da praia, localizada a oeste da ilha da Ponta do Tubarão, se encontra exposta aos efeitos de difração sofridos pelas ondas. Nos casos de ondas incidentes de N, NNE e NE, principalmente devido aos maiores períodos de onda característicos dos regimes extremos e à grande extensão da plataforma com baixo gradiente de declividade, as ondas incidem sobre a praia e as ilhas com direção perpendicular às suas orientações, o que evidencia a ocorrência de processos de refração em regiões mais distantes da costa. Para ondas incidentes de ENE e E, os processos de transformação são mais evidentes em função da orientação das ondas em relação à linha de costa. Além disso, principalmente em condições de preamar, a ocorrência de menores alturas significativas de onda nos trechos de praia abrigados pelas ilhas-barreiras existentes na área ressalta a função de proteção natural desempenhada por esses elementos morfológicos.

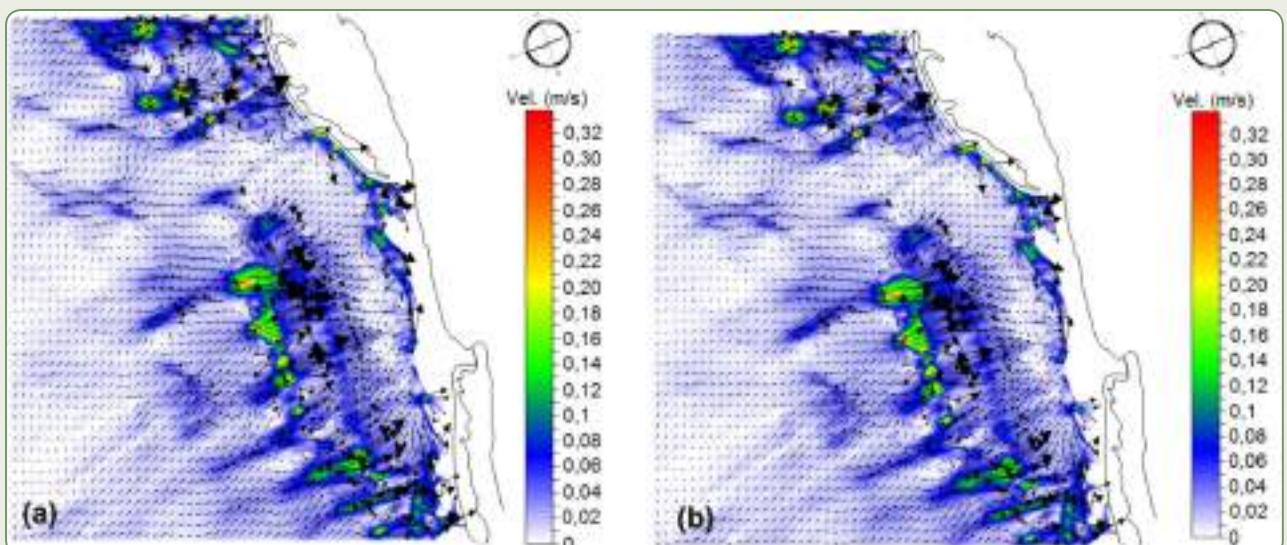
Correntes geradas pela quebra de ondas

Com relação à propagação de correntes, ambas as versões do SMC-Brasil apresentaram problemas para gerar resultados, principalmente para os casos executados sob as condições extremas em situação de preamar. No entanto, assim como na propagação de ondas, a obtenção de resultados para os casos de propagação de correntes associadas às ondas incidentes de ENE e E só foi possível quando utilizada a nova versão do modelo.

Correntes associadas a eventos de regime médio

Em condições médias de regime marítimo, tanto a versão mais atual do SMC-Brasil quanto a versão anterior apresentaram problema apenas na propagação do caso associado às ondas incidentes de N em condições de preamar. As duas versões geraram respostas idênticas como resultados de propagação. Dos diagramas possíveis de serem analisados, no geral, em condições de baixamar, assim como verificado nos casos de propagação de ondas, as correntes não incidem diretamente sobre a Praia de Soledade. Na Figura 3.14 é possível observar que as maiores velocidades de corrente incidem sobre as feições relacionadas aos limites da batimetria adjacente à RDSPT, localizados em frente à praia e à ilha da Ponta do Tubarão. Para essa condição de maré, os elementos morfológicos figurados resultantes desses defeitos apresentariam função de proteção às áreas localizadas mais próximas da costa, uma vez que dissipam parte da energia das correntes. Eles ainda são responsáveis pelo efeito de difração sobre as ondas, influenciando as direções predominantes de corrente ao atingirem a costa. Na região que se estende desde a Praia de Soledade até a Ponta do Tubarão é possível observar uma corrente no sentido leste-oeste, enquanto que em frente à ilha do Corta Cachorro parte da corrente incide diretamente sobre ela e outra parte na direção oeste-leste, acompanhando o sentido da deriva litorânea na região.

Figura 3.14 – Vetores e magnitude de correntes em situações de baixamar para ondas de N, sob as condições médias de agitação marítima

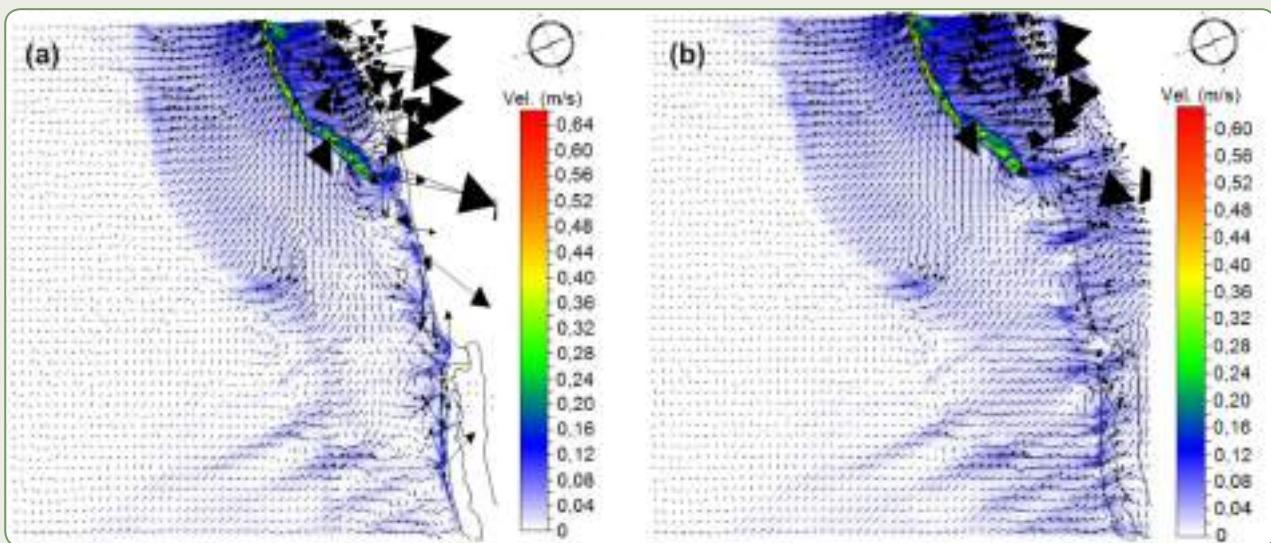


Legenda: a) versão de nov. 2014; b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

As correntes geradas a partir das ondas de direção NNE e NE, em condições de baixamar, apresentam padrões bem semelhantes às correntes geradas por ondas de N. Em condições de preamar, com a diminuição da influência das feições de fundo, são observadas maiores magnitudes de corrente sobre as ilhas e a praia, principalmente na Ponta do Tubarão. Na região próxima à antepraia, é observada uma corrente de pequena magnitude de direção oeste-leste, indo de encontro à Ponta do Tubarão e sendo rotacionada em direção à praia, intensificando a corrente de direção leste-oeste junto à costa. Nessa região, as correntes apresentam comportamento semelhante à situação de baixamar, porém, com padrões influenciados principalmente por processos de refração de onda e com valores de velocidade, paralelos à praia, em torno de 0,12 e 0,14 m/s (Figura 3.15).

Figura 3.15 – Vetores e magnitude de correntes em situações de preamar para ondas de NE, sob as condições médias de agitação marítima

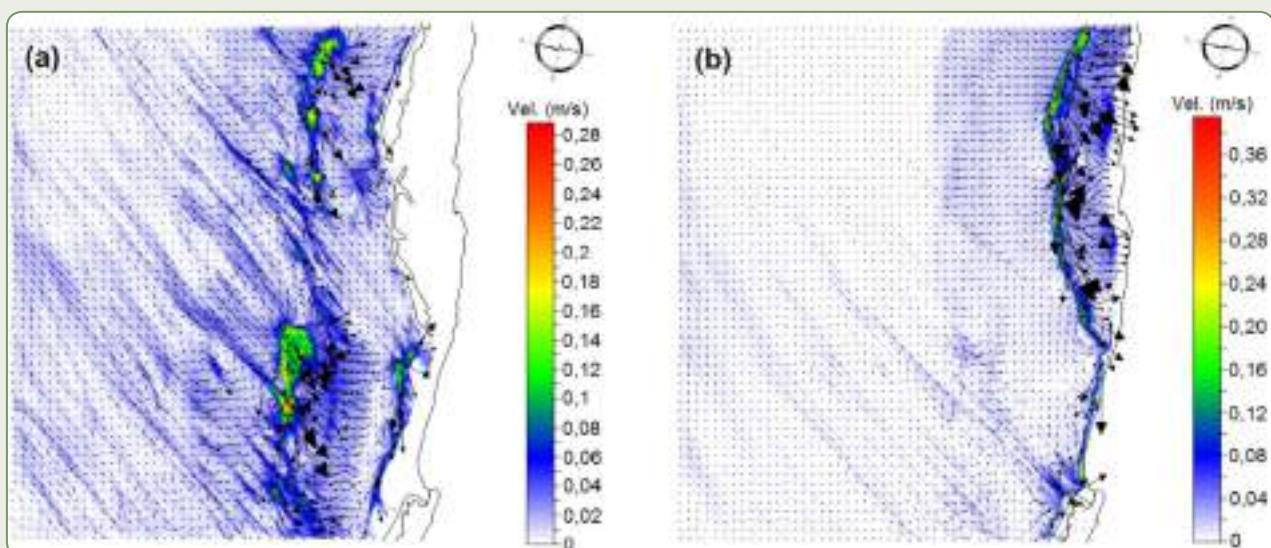


Legenda: a) versão de nov. 2014; b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

Para as correntes geradas a partir de ondas incidentes de ENE e E, em baixamar, os elementos morfológicos provenientes da interpolação batimétrica junto à RDSPT exercem os mesmos efeitos já identificados nos casos anteriores (Figura 3.16a). Durante a preamar, esse efeito é reduzido e verifica-se maior magnitude de corrente junto às ilhas-barreiras, com sentido preferencial de leste a oeste e velocidades variando de 0,02 a 0,16 m/s, junto à praia.

Figura 3.16 – Vetores e magnitude de correntes



Legenda: a) ondas de ENE, em situação de baixamar; b) ondas de E, em situação de preamar, ambas sob as condições médias de agitação marítima, obtidas com a versão de nov. 2014

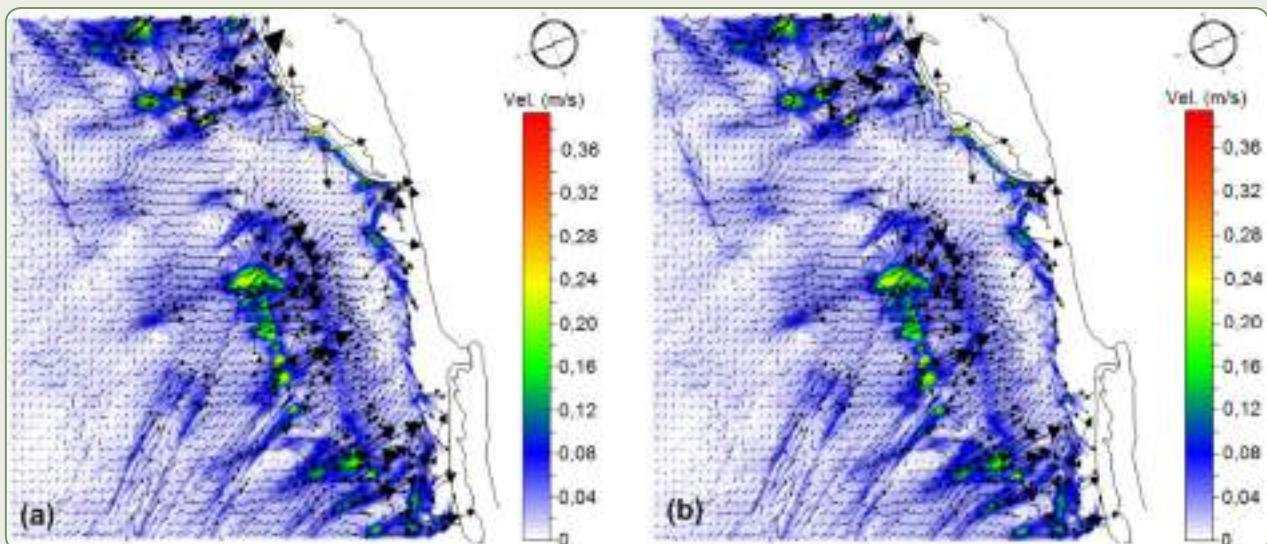
Fonte: Dos autores (2018).

Correntes associadas aos eventos extremos

Para as correntes associadas aos eventos extremos, dentre os casos propagados, não se obtiveram resultados associados às ondas incidentes das seguintes direções: N em situação de preamar; NE em situação de preamar e baixamar; e NNE em situação de preamar. Além disso, a obtenção de resultados para os casos associados às ondas de ENE e E só foi possível com a utilização da nova versão do SMC-Brasil. Nos casos em que foram obtidos diagramas pelas duas versões do *software*, as respostas foram idênticas.

Para as correntes geradas a partir das ondas de direção N, na parte oriental da área de estudo verificam-se direções e sentidos relacionados aos efeitos de difração e refração sofridos pelas ondas devido às feições de fundo e à presença da ilha Ponta do Tubarão. Próximo à zona de espraiamento essas correntes se intensificam com sentido leste-oeste próximo à ilha Ponta de Tubarão e à Praia de Soledade, e oeste-leste próximo à ilha do Corta Cachorro. Nas proximidades da RDSPT, ainda em áreas marinhas rasas nos limites de abrangência da batimetria de detalhe realizada em 2014, surgem na modelagem indicações de correntes de alta magnitude, que podem representar apenas artefatos gerados pelo rebatimento vertical nesse levantamento. Elas se tornam menos significativas à medida que se aproximam da linha de costa (Figura 3.17).

Figura 3.17 – Vetores e magnitude de correntes em situações de baixamar para ondas de N, sob as condições extremas de agitação marítima

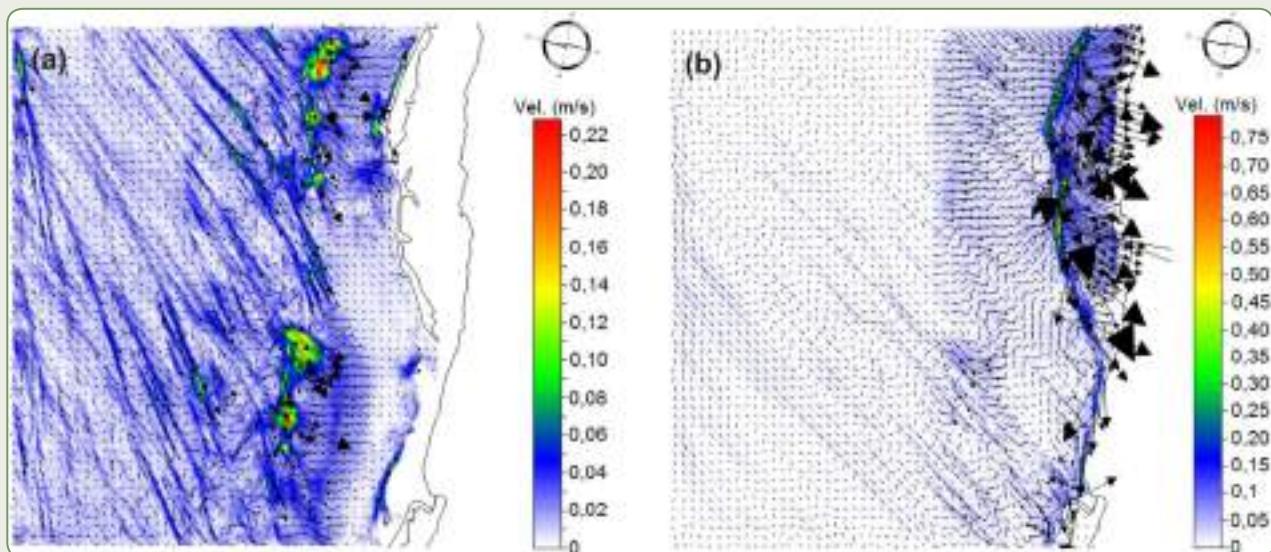


Legenda: a) versão de nov. 2014; b) versão de out. 2013

Fonte: Dos autores (2018).

Para os casos associados às ondas incidentes de NE e NNE foram observadas respostas semelhantes quanto ao sentido e direção das correntes. Quanto à magnitude, apesar das ondas de direção N apresentarem as maiores alturas significativas, não foram observadas diferenças consideráveis entre cada caso, com valores de velocidade máximos da ordem de 0,34 m/s (Figura 3.17). Nos casos associados às ondas incidentes de ENE e E, a magnitude de corrente junto à praia se assemelha aos outros casos propagados, variando de 0,01 a 0,09 m/s em situações de baixamar, e 0,1 a 0,20 m/s em situações de preamar, com sentido leste-oeste predominante neste último caso (Figura 3.18).

Figura 3.18 – Vetores e magnitude de correntes* para (a) ondas de ENE, em situação de baixamar, e (b) ondas de SE, em situação de preamar, ambos sob as condições extremas de agitação marítima



*Versão de nov. 2014

Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÕES

A versão mais atual do SMC-Brasil (nov. 2014) se mostrou mais eficiente que a versão anterior (out. 2013) uma vez que possibilitou a geração de produtos gráficos para casos não propagados pela primeira versão. No entanto, em ambas as versões, a modelagem da Praia de Soledade foi perpassada por algumas dificuldades, em virtude de especificidades da região e das características intrínsecas do modelo.

O fato de a plataforma continental adjacente ao litoral setentrional do RN ser rasa e extensa (40 km da Praia de Soledade até o talude), com gradiente de declividade em torno de 1:1.500, demandou a elaboração de malhas concatenadas de grandes proporções, a fim de ser mantida uma resolução adequada aos parâmetros de onda identificados a partir da análise dos pontos DOW, aumentando sobremaneira o custo computacional da modelagem. Tendo em vista a limitação do domínio computacional trabalhado, as interferências das condições de contorno não puderam ser satisfatoriamente afastadas da Praia de Soledade, trecho da zona costeira escolhido como principal alvo dessa modelagem.

As ondulações presentes no terreno submerso resultaram em ruídos no campo de ondas e correntes produzidos na propagação. Nos casos de maré alta, as ilhas-barreiras sofrem o processo de *washover*, provocando mais um elemento de deturpação para a propagação de ondas, apesar de haver relatos desse fenômeno nas ilhas-barreiras em situações específicas de agitação marinha.

Outro ponto destacável é a impossibilidade de se utilizar outros métodos interpoladores para os dados batimétricos no SMC-Brasil, de modo que se permita a geração do melhor modelo digital de terreno do substrato marinho frente a especificidades do local de estudo e/ou dos levantamentos disponíveis para o trabalho, como sugerido em Moura et al. (2011).

REFERÊNCIAS

- BORGMAN, L. E. **Directional spectrum estimation for the Sxy gauges**. USAE Waterways Experiment Station. Vicksburg: Coastal Eng. Res. Center, 1984. 104 p. Relatório técnico.
- BOUWS, E. et al. Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, p. 975-986, 1985. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC090iC01p00975/pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2015.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Gerenciamento costeiro e suas interfaces**. Brasília, DF, 2002. 32 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Manual de referência – Modelo de propagação de ondas espectrais em praias (OLUCA-SP). Brasília: MMA, no prelo.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente; Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Projeto Orla**: fundamentos para gestão integrada. Brasília: MMA, 2006. 74 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/orla/_arquivos/11_04122008111238.pdf>. Acesso em: nov. 2014.
- CAIRES, S. et al. Intercomparison of differentwind-wave reanalyses. **Journal of Climate**, v. 17, n. 10, p. 1893-1913, maio 2004. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C1893%3AIODWR%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(2004)017%3C1893%3AIODWR%3E2.0.CO%3B2)>. Acesso em: 3 nov. 2015.
- CAIRES, S.; STERL, A. Validation of ocean wind and wave data using triple collocation. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C3, p. 1-16, 2003. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JC001491/epdf>>. Acesso em: 3 nov. 2015.
- CHARLIER, R. H.; MEYER, C. P. **Coastal erosion**: response and management. [S.l.]: Springer Science & Business Media, v. 70, 1998. 343 p.
- DAVIS, J. L. A morphogenetic approach to world shorelines. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 8, p. 127-142, 1964.
- FERREIRA, A. T. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 167-184, fev. 2014. ISSN: 1808-0936. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php?journal=rbc&page=article&op=view&path%5B%5D=591>>. Acesso em: 20 set. 2015.
- JEFFREYS, H. On the formation of water waves by wind. **Proceedings of the Royal Society of London, Series A**. [S.l.]: [s.n.], 1925. p. 189-206.
- KIRBY, J. T. Higher-order approximations in the parabolic equation method for water waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. C1, p. 933-952, 1986. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC091iC01p00933/pdf>>. Acesso em: 5 ago. 2015.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'Surf Beat'. **Journal of Fluids Mechanics**, v. 13, p. 481-504, 1962. Disponível em: <<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=368859>>. Acesso em: 15 fev. 2016.
- MATOS, M. F. A. de et al. Análise comparativa da agitação obtida com o modelo numérico (swan) na modelagem de ondas do litoral setentrional do Rio Grande do Norte, Brasil, e dados de campo. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 3, p. 289-299, 2013. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-378_Matos.pdf>. Acesso em: 4 maio 2015.
- MATOS, M. F. A. de et al. Modelação numérica e caracterização da agitação marítima do estuário de Diogo Lopes, Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA, 7., 2011, Lisboa. **Anais...** Lisboa: PIANCH/APRH, 2011. p. 43-63.
- MELO, A. B. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A., et al. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 2, p. 25-41.

- MOURA, J. E. et al. Evaluation of the influence of digital elevation models for a hydrodynamic circulation model. **Journal of Coastal Research**, v. 64, p. 1140-1144, 2011. Disponível em: <http://www.ics2011.pl/artic/SP64_1140-1144_J.E.deMoura.pdf>. Acesso em: dez. 2014.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: Secretaria de Planejamento e Coordenação da Presidência da República e IBGE, 1989. 421 p.
- PESSOA NETO, O. C. et al. Bacia Potiguar. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 357-369, nov. 2007. Disponível em: <http://vdpf.petrobras.com.br/vdpf/consultarArquivosEdicao?do?acao=preparaTela&CODIGO_EDICAO_CONSULTA_ARQUIVO=41>. Acesso em: jan. 2016.
- REGUERO, B. G. et al. A Global Ocean Wave (GOW) calibrated reanalysis from 1948 onwards. **Coastal Engineering**, v. 65, p. 38-55, mar. 2012. DOI 10.1016/j.coastaleng.2012.03.003. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383912000452>>. Acesso em: jan. 2015.
- RIOS, V. P. L.; AMARO, V. E. Caracterização dos depósitos sedimentares holocénicos no sistema de ilhas barreiras do estuário Diogo Lopes, litoral setentrional do Rio Grande do Norte. **Revista de Geologia**, Fortaleza, v. 25, n. Edição Especial HIDROSEMA-UFRN, p. 55-69, jan. 2012. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufc.br/index.php/geologia/article/view/1360>>. Acesso em: mar. 2013.
- SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Geodésia de precisão aplicada à análise da evolução morfodinâmica de curto prazo na ilha barreira do Corta Cachorro, Litoral do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3, p. 425-442, jun. 2014a. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php?journal=rbg&page=issue&op=view&path%5B%5D=34>>. Acesso em: jul. 2015.
- SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Terrestrial laser scanner applied to monitoring beach morphological changes in a high energy coastal zone in Northeast Brazil. In: INTERNATIONAL TERRESTRIAL LASER SCANNING USER MEETING, 7., 2014b, Roma. **Anais...** Roma: OpTech, 2014b. 13 p.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Dinâmica sazonal de processos costeiros e estuarinos em sistema de praias arenosas e ilhas barreira no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, p. 151-162, jun. 2013. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php?journal=rbg&page=issue&op=view&path%5B%5D=29>>. Acesso em: jun. 2015.
- SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; SOUTO, M. V. S. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 5, p. 469-483, 2011. (Edição Especial Geodésia). Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php?journal=rbc&page=issue&op=view&path%5B%5D=46>>. Acesso em: abr. 2012.
- SOUTO, M. V. S. **Análise da evolução costeira do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte, região sob influência da indústria petrolífera**. 2009. 177 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.
- STEWART, R. H. **Introduction to Physical Oceanography**. College Station: Texas A&M University, 2006. 344 p.
- THORNTON, E. B.; GUZA, R. T. Transformations of wave height distribution. **Journal of Geophysics Research**, v. 88, n. C10, p. 5925-5938, 1983. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/JC088iC10p05925/abstract>>. Acesso em: fev. 2016.
- VALENTIM DA SILVA, D. R. et al. Geomorfologia de uma área com alta sensibilidade ambiental na Bacia Potiguar (NE do Brasil). **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 4, p. 545-566, 2010. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-218_Silva.pdf>. Acesso em: jul. 2013.
- VALENTIM DA SILVA, D. R.; AMARO, V. E. Integração entre dados óticos e de RADAR (SRTM) para caracterização geoambiental do litoral setentrional do Rio Grande do Norte. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, agosto 2008. Disponível em: <<http://132.248.9.34/hevila/Revistageograficaacademica/2008/vol2/no2/10.pdf>>. Acesso em: maio 2012.

VITAL, H. et al. A modern high-energy siliciclastic-carbonate platform: continental shelf adjacent to Northern Rio Grande do Norte State, Northeastern Brazil. **Recent Advances in Models of Siliciclastic Shallow-Marine Stratigraphy**, v. 90, p. 175-188, 2008. (Publicação Especial SEMP).

VITAL, H.; SILVEIRA, I. M.; AMARO, V. E. Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira – área de Guamaré a Macau (NE Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 23, n. 3, p. 233-241, set. 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2005000300003>. Acesso em: mar. 2012.

MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO COSTEIRA POR SOBRELEVAÇÃO DO NÍVEL DO MAR A EVENTOS EXTREMOS, EM ESCALA LOCAL

Anderson Targino da Silva Ferreira
Venerando Eustáquio Amaro
Marcelo Soares Teles Santos
Ana Maria Teixeira Marcelino
Laura Ribas de Almeida
Maria Carolina Hernandez Ribeiro

RESUMO

As mudanças climáticas podem agravar ou desencadear os fenômenos de erosão e inundação costeiras pela ação de forçantes ambientais como ondas, ventos, correntes e marés, afetando a segurança da população e as atividades econômicas envolvidas. Nesse sentido, a identificação de áreas suscetíveis a esses fenômenos torna-se importante para a gestão territorial da zona costeira. O objetivo do trabalho foi apresentar um método para a identificação de áreas de inundação costeira por sobrelevação do nível do mar (NM) em eventos extremos e em escala local, com estudo de caso na orla de Ponta Negra, Natal (RN), Brasil. O método foi baseado na integração de: superfície topobatimétrica gerada pela modelagem digital de elevação com dados de posicionamento e altimetria por *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) com a base de dados oceanográficos do Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil). A comparação entre as altitudes de inundação e as altitudes da orla marítima (no mesmo

referencial altimétrico), em perfis específicos ao longo da costa, permitiu identificar e analisar as áreas mais suscetíveis à energia do espraiamento das ondas; informação importante na identificação precisa de áreas vulneráveis à sobrelevação do NM e que pode subsidiar projetos de mitigação/adaptação da orla costeira aos impactos das mudanças ambientais globais.

Palavras-chave: Altitude de inundação. Levantamentos topobatimétricos. SMC-Brasil. GNSS. MDE.

INTRODUÇÃO

Segundo Muehe (2006), parte da costa brasileira vem sofrendo processos de erosão acentuada, tanto em setores urbanos quanto em regiões ainda pouco ou não ocupadas. O intenso processo de ocupação do espaço costeiro e sua utilização econômica com impactos, quando somados às mudanças ambientais globais como o aumento no Nível Médio do Mar (NMM), tendem a agravar ainda mais esses efeitos, devido à amplificação de eventos extremos (IPCC, 2013). Tendo em vista que a zona costeira é bastante suscetível à erosão principalmente em virtude dos processos de espraiamento da onda (OSBORNE; ROOKER, 1999), espera-se uma generalização ainda maior dos fenômenos de erosão e inundação (MÖLLER et al., de 2001), com a consequente alteração e/ou degradação da paisagem e dos ecossistemas (ESTEVES, 2014) bem como a própria inviabilização das atividades econômicas (MUEHE, 2001).

Nesse sentido, a fim de evitar ou mitigar impactos socioeconômicos e ambientais decorrentes dos fenômenos de erosão e inundação, **são necessárias** a identificação e a quantificação dos processos envolvidos de maneira a subsidiar uma gestão estratégica de conservação dos ecossistemas, ou até mesmo uma adaptação por realinhamento costeiro (ESTEVES, 2013, 2014).

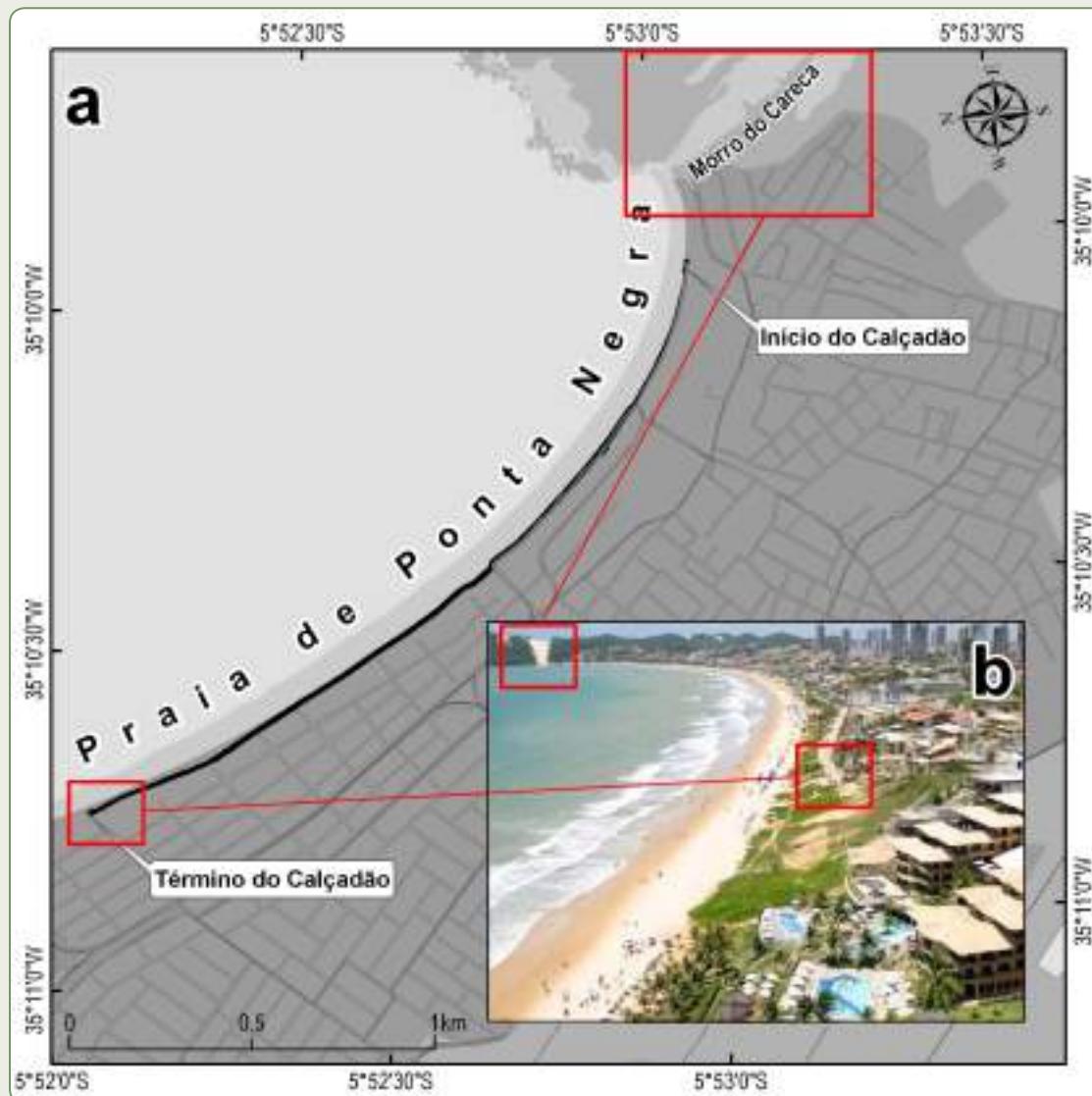
Sendo assim, este trabalho tem como objetivo apresentar um método para a identificação de áreas de inundação costeira por sobrelevação do Nível do Mar (NM) em eventos extremos e em escala local. Para isso, foram utilizados dados de: superfície topobatimétrica, gerada pela modelagem digital de elevação de precisão (FERREIRA; AMARO; SANTOS, 2014), e altitudes de inundação, que, nesse trabalho, é o termo referente à altitude ortométrica correspondente ao espraiamento da onda devido à sobrelevação do NM a eventos extremos.

Como estudo de caso, o método foi aplicado na Praia de Ponta Negra (Figura 4.1), que passa por um intenso processo de erosão com severos impactos sobre a orla costeira (AMARO et al., 2015).

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Praia de Ponta Negra está localizada em Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte, Brasil (lat. 5,52° S e long. 35,10° W). Trata-se de uma praia arenosa com cerca de 10 km de extensão, encaixada numa morfologia de enseada e semiabrigada (*zeta*), tendo ao sul a feição dunar conhecida como Morro do Careca, e estendendo-se para norte bordejando a zona urbana do bairro de Ponta Negra. Na sua porção emersa (pós-praia), foi construído e reconstruído, no decorrer de algumas décadas desde o fim dos anos 1980, um calçadão com cerca de 3,0 km de extensão (área foco da pesquisa) repleto de estabelecimentos comerciais e habitacionais (Figura 4.1a, 4.1b).

Figura 4.1 – a) Localização da área de estudo na Praia de Ponta Negra, Natal (RN). b) Panorama ilustrando a posição em planta das principais feições encontradas na orla marítima (Sistema de projeção UTM, Datum horizontal SIRGAS2000, Fuso 25 Sul)



Legenda: a) a linha preta representa o calçadão que bordeja a orla urbana do bairro de Ponta Negra. b) Campo de dunas do Morro do Careca ao fundo, o calçadão que bordeja a orla urbana do bairro de Ponta Negra e as residências e empreendimentos hoteleiros

Fonte: www.skyscrapercity.com.

Essa região do litoral oriental do RN faz parte da faixa sedimentar costeira denominada de Bacia Pernambuco-Paraíba, que é composta por rochas sedimentares do Cretáceo, recobertas por rochas do Grupo Barreiras e sedimentos quaternários, como campos de dunas móveis e vegetadas, terraços marinhos e aluvionares e coberturas arenosas diversas. As principais características físicas desse setor costeiro são: a sequência de baías em forma de zeta (DINIZ, 1998; AMARAL, 1999) e a predominância de praias intermediárias, cujas faces são estreitas e expostas às ações do clima de ondas (VITAL, 2006).

O clima é o *Litorâneo do Nordeste Oriental* (3b) que é fortemente influenciado pelas massas de ar úmidas provenientes do Oceano Atlântico, com três a cinco meses secos no verão e chuvosos no outono

e inverno (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A precipitação média anual é de 1.465,4 mm, variando de 14,7 a 264,7 mm, respectivamente, entre os meses seco e chuvoso (INMET, 2015).

A temperatura diária média do ar na região de Natal é de 24,4 °C, variando entre 21,8 °C e 30,2 °C, com ventos contínuos de baixa intensidade (média de 4,4 m/s) que sopram de sudeste em 86% dos casos, denominados de ventos alísios de sudeste (BARROS et al., 2013).

O regime de marés dominante nessa porção do litoral do RN é o de mesomarés semidiurnas, com amplitudes médias de marés de sizígia em torno de 2,2 m, enquanto que nas marés de quadratura a amplitude média é de 1,1 m (Carta Náutica DHN/MB, nº 810 – Proximidades do Porto de Natal; DHN, 2009). As ondas apresentam de 0,2 a 1,5 m de altura na zona de arrebentação e correntes costeiras em torno de 0,1 a 0,8 m/s quase sempre no sentido de sul para norte (DINIZ; DOMINGUEZ, 1999; CHAVES, 2000; SOUZA, 2004).

Estimativas das variações do nível médio do mar em 60 anos (1948-2008), provenientes da base de dados do Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), indicam que na região em frente à Praia de Ponta Negra a maré astronômica apresenta muito mais importância na variação do nível médio do mar (amplitude máxima de 2,6 m) do que a maré meteorológica (amplitude máxima de 0,2 m) (ALMEIDA et al., 2015).

METODOLOGIA

A combinação entre a superfície topobatimétrica (MDE – Modelo Digital de Elevação – praial) e a altitude de inundação por sobrelevação do NM, com altitudes ortométricas relacionadas ao mesmo referencial (NMM do SGB – Sistema Geodésico Brasileiro) permite a identificação de áreas de inundação em eventos extremos. Dessa forma, o método de identificação de áreas potenciais de inundação proposto neste trabalho apresenta as seguintes etapas: (i) geração da superfície topobatimétrica pela modelagem digital de elevação; (ii) cálculo das altitudes de inundação; e (iii) identificação e análise das áreas de inundação da orla costeira.

Geração da superfície topobatimétrica pela modelagem digital de elevação

A superfície topobatimétrica foi gerada pela modelagem digital de elevação da zona de praia, na qual o MDE foi gerado desde a porção emersa da praia até a profundidade de fechamento (-4,0 m), pela integração de levantamento topográfico na face de praia emersa e batimétrico no setor submerso (Figura 4.2). Tais levantamentos foram realizados com intuito de coletar pontos planialtimétricos em perfis representativos das feições morfológicas encontradas no contexto integral da zona de praia, revelando as morfologias na face praial e no substrato marinho da área de estudo. No setor emerso foram modeladas as feições morfológicas típicas desse domínio, com destaque para o estabelecimento do perfil de praia emerso, cúspides e dunas frontais; no setor submerso foram modelados os bancos arenosos longitudinais e transversais e as calhas submarinas. Os perfis topográficos foram coletados longitudinalmente e transversalmente às feições morfológicas, enquanto os perfis batimétricos foram realizados perpendicularmente e oblíquos à linha de costa, com espaçamento entre linhas batimétricas de aproximadamente 50 m.

O levantamento topográfico (setor emerso) foi realizado pelo posicionamento GNSS de precisão no método relativo cinemático em relação a estações da Rede Geodésica do Litoral Oriental (RGLO) do

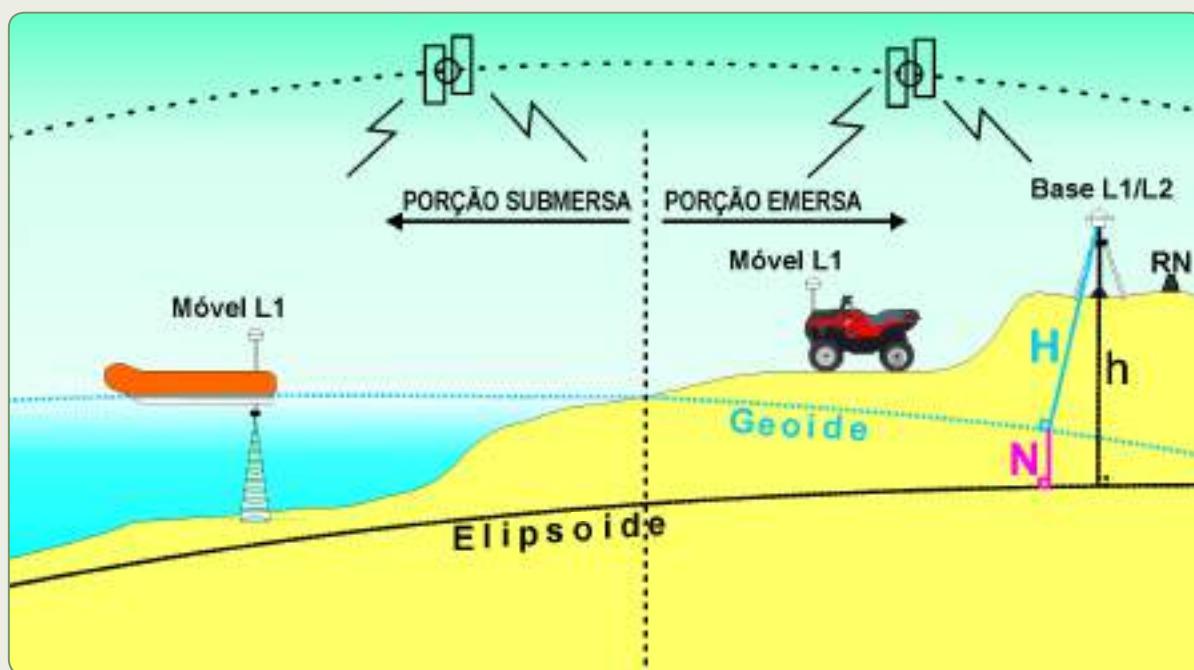
Rio Grande do Norte. Esta foi implantada na área de estudo para fornecer estações com coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas de precisão relacionadas ao SGB, com o objetivo de possibilitar o uso de linhas de base curtas aos posicionamentos GNSS (FERREIRA; AMARO; SANTOS, 2014; SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011; SANTOS; AMARO, 2011). Os receptores foram programados para coletar dados em função do tempo e com intervalo de gravação de dados de 1 s. Nesse levantamento, o receptor GNSS móvel foi acoplado a um quadriciclo motorizado para aumentar a produtividade na aquisição de dados e viabilizar o levantamento de extensas áreas em reduzidos intervalos de tempo.

No levantamento batimétrico (setor submerso) o receptor GNSS móvel foi acoplado à embarcação do tipo inflável com motor de popa, operado pelo mesmo método de posicionamento do setor emerso. A embarcação foi dotada de uma ecossaonda portátil da GARMIN, modelo *GPSMAP421s*, configurada para operar na frequência de 200 kHz e resolução do feixe vertical de 0,01 m, capaz de medir profundidades de até 457 m e intervalo de gravação de 5 s. Nesse levantamento, cada ponto amostral do receptor GNSS forneceu coordenadas geodésicas da antena do receptor (latitude (φ), longitude (λ) e altitude geométrica (H), que posteriormente é convertida na altitude ortométrica (P)) e o horário de rastreio associado (T_{GNSS}). Por outro lado, cada ponto amostral do ecobatímetro forneceu o horário da coleta (T_{BAT}) e a profundidade do nível da água (P). Assim, a altitude ortométrica do nível do terreno (H_{TER}) ou assoalho foi calculada por:

$$H_{TER} = H_{GNSS} - h_{ANT} - h_{OFF} - P \quad (\text{Eq. 4.1})$$

onde H_{GNSS} é a altitude ortométrica da antena, h_{ANT} é a altura da antena (distância vertical entre antena e o fundo do bote), e h_{OFF} é o *offset* do sensor (distância vertical entre o fundo do bote e o ponto de medição do sensor do ecobatímetro). O procedimento para coleta de dados consistiu em fixar o bastão com a antena do receptor GNSS sobre o suporte da embarcação, localizado na traseira da embarcação; nivelar a antena com o nível de bolha do bastão; medir a altura da antena e o *offset* do sensor do ecobatímetro; e programar o receptor GNSS e o ecobatímetro.

Figura 4.2 – Ilustração da metodologia de integração de levantamentos topográficos e batimétricos



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2014).

As altitudes ortométricas dos pontos amostrais topográficos e batimétricos foram calculadas a partir das altitudes geométricas obtidas pelo posicionamento GNSS. Para tal, foi utilizada a altimetria GNSS no modo relativo, na qual a altitude ortométrica de um ponto de interesse (i) é determinada em relação a pelo menos uma estação de referência (A), de coordenadas geodésicas (α_A , λ_A , h_A) e altitude ortométrica (H_A) conhecidas. O cálculo é realizado através das diferenças de altitudes geométricas $\Delta h_i = h_i - h_A$, determinadas pelo GNSS, e das diferenças de alturas geoidais $\Delta N_i = N_i - N_A$, determinadas a partir de um modelo geoidal, por (OLLIKAINEN, 1998; FEATHERSTONE; DENTITH; KIRBY 1998; SANTOS; SÁ, 2006; SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011; SANTOS; AMARO, 2011; AMARO; SANTOS; SOUTO, 2012):

$$H_i = H_A + \Delta H_i = H_A + (\Delta h_i - \Delta N_i) \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Como referências à altimetria GNSS foram utilizadas as estações da RGLO (FERREIRA; AMARO; SANTOS, 2014), que possuem coordenadas geodésicas e altitudes ortométricas conhecidas em relação ao SGB, e o modelo geoidal do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), modelo MAPGEO2010 (IBGE, 2014; SANTOS et al., 2011).

Os MDEs da topografia e da batimetria foram gerados pela interpolação por triangulação com uso da técnica TIN (*Triangulated Irregular Network*) e os pontos foram conectados de acordo com a triangulação de Delaunay, que usa o critério da maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo (SANTOS; AMARO; SOUTO, 2011). O controle de qualidade dos MDEs foi realizado a partir de um conjunto de pontos de controle selecionados aleatoriamente na área de estudo e que não foram usados na geração dos modelos, e a medida de acurácia pelo Erro Quadrático Médio (EQM) por (MONICO et al., 2009):

$$EQM = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta H_i^2}{n}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

onde $i = 1, 2, 3 \dots n$, n é o número de pontos de controle utilizados na avaliação, e ΔH_i é o conjunto de discrepâncias das altitudes ortométricas obtidas no modelo analisado H_i^m e as de referência H_i^r , dadas pela expressão:

$$\Delta H_i = H_i^m - H_i^r \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Maiores detalhes a respeito das características de amostragem dos dados e controle de qualidade dos modelos podem ser encontrados em Ferreira et al. (2014).

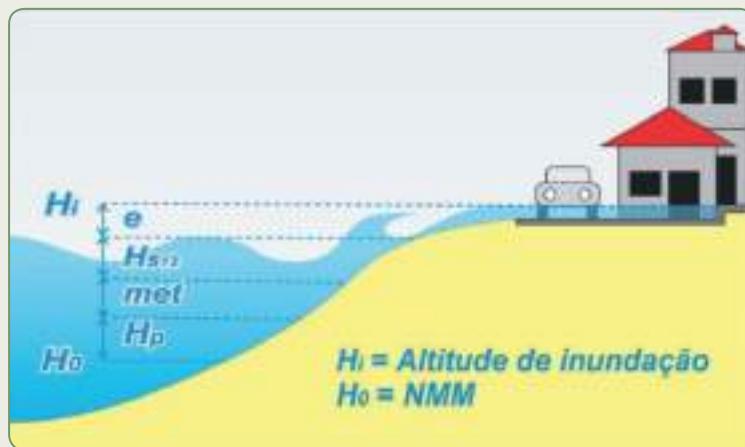
Cálculo das altitudes de inundação

A altitude ortométrica de inundação foi calculada considerando-se a elevação máxima do espraiamento da onda acima do NMM (H_0), da seguinte forma (Figura 4.3):

$$Hi = Hp + met + Hs_{12} + e \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde H_i é a altitude ortométrica de inundação (referente ao espraiamento da onda), H_p é a elevação da maré astronômica (m), met é a altura da sobrelevação meteorológica (com 1 hPa = 1 cm no NMM), H_{s12} é a altura (m) significativa de onda superada 12 horas por ano e e é a altura do espraiamento da onda.

Figura 4.3 – Esquema do cálculo da altitude de inundação (H_i) no espraiamento das ondas a partir da integração dos parâmetros: elevação da maré astronômica (H_p), altura da sobrelevação meteorológica (met), altura de onda (H_{s12}) e altura do espraiamento da onda (e)



Fonte: Dos autores (2018).

O parâmetro altura do espraiamento da onda (e) foi calculado através de aproximação semiempírica dada por Masselink e Hughes (2003):

$$e = 0,36 g^{\frac{1}{2}} \tan(\beta) H_{s12}^{\frac{1}{2}} T_{12} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde e é a altura do espraiamento da onda (m), g é a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), β é o declive da face da praia (obtido no MDE), H_{s12} é a altura (m) significativa de onda superada 12 horas por ano, e T_{12} é seu período associado (s). É importante citar que, comparando diferentes modelos de cálculo de espraiamento, como os de Nielsen e Hanslow (1991) e de Masselinke e Hughes (2003), sabe-se que os segundos apresentaram os maiores valores de altitude de inundação. Sendo assim, com base no *Princípio da Prevenção e Precaução* (art. 225, IV, e art. 9º, I, III, V da Lei nº 6.938/81, BRASIL, 1981), o modelo de Masselinke e Hughes (2003) tornou-se mais apropriado para as estimativas desse parâmetro.

Os parâmetros de elevação de maré astronômica (H_p), altura da sobrelevação meteorológica (met), altura (H_{s12}) e período (T_{12}) de onda foram obtidos no SMC, desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade da Cantabria – Espanha e adaptado para o Brasil (SMC-BRASIL, 2014). Os modelos aplicados e calibrados em diversos estudos são dotados de uma base de dados de 60 anos (1948-2008) que permite, além da propagação de ondas até águas rasas (ALMEIDA et al., 2015), a construção de cenários para regimes extremos (LIU; LOSADA, 2002; GONZÁLEZ et al., 2007; MEDELLÍN et al., 2008; RESTREPO; OTERO; LÓPEZ, 2009; TINTORÉ et al., 2009; RAABE et al., 2010; CEPAL, 2011; MARTÍNEZ; QUEZADA; RUBIO, 2011; CAMUS et al., 2013; GUANCHE et al., 2013). Vale destacar que o parâmetro H_0 está vinculado ao NMM do SGB, assim como o parâmetro H_i calculado pela Equação (4.6) (Figura 4.2). Dessa forma, a altitude ortométrica de inundação pode ser associada à altitude ortométrica adotada no MDE praial.

Na caracterização dos períodos de retorno desses parâmetros, foi utilizado o método de máximos anuais (GARCIA, 2008), no qual os valores máximos são definidos por período de tempo (ano). Esses valores podem ser ajustados a três distribuições, *Gumbel*, *Fréchet* e *Weibull*, segundo o teorema das três caudas (FISHER; TIPPETT, 1928). Esses três tipos podem ser combinados em uma única expressão, denominada Distribuição de Valores Extremos Generalizados (*Generalized Extreme Value*, GEV) dada na Equação 4.7.

$$F(x) = \exp\left[-\left(1 - \frac{\xi(x-\mu)}{\psi}\right)^{\frac{1}{\xi}}\right] \quad (\text{Eq. 4.7})$$

onde μ é o parâmetro de localização, ψ é o parâmetro de escala e ξ é o parâmetro de forma. Quando $-0,05 < \xi < 0,05$, a distribuição é de Gumbel, quando $\xi > 0,05$, a distribuição é de Fréchet, e quando $\xi < -0,05$, a distribuição é de Weibull.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Modelo Digital de Elevação (MDE) da zona de praia – superfície topobatimétrica

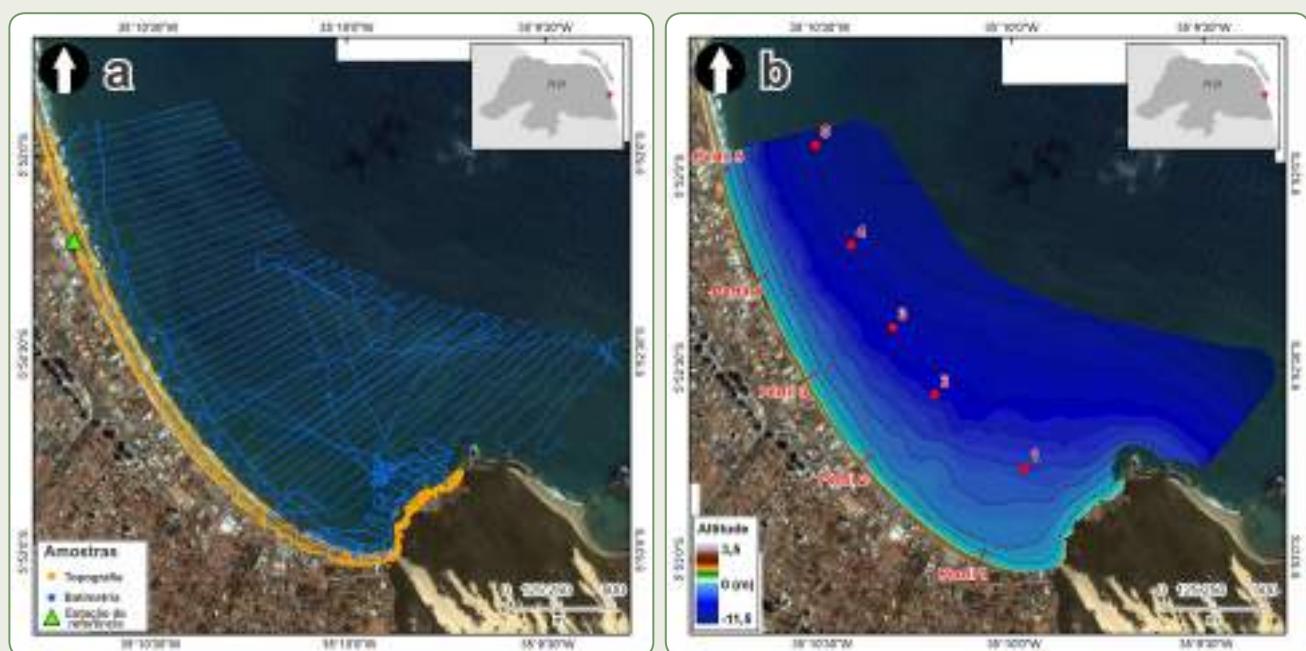
A Figura 4.4 apresenta o MDE da Praia de Ponta Negra para o mês de novembro de 2012 (Figura 4.4b), gerado pela interpolação dos pontos amostrais topográficos (alaranjados) e batimétricos (azuis) (Figura 4.4a) coletados em campo. Na Figura 4.4b: as linhas tracejadas em preto indicam as curvas de nível (porção emersa) e as isóbatas (porção submersa), com equidistâncias de 1 metro; os pontos vermelhos, os locais de aquisição dos parâmetros de ondas simulados do SMC-Brasil, localizados a 500 m da Linha de Costa (LC) a partir da isolinha de zero metros; e as linhas em vermelho representam os perfis perpendiculares à LC utilizados para obtenção do parâmetro de declividade da face praial. O MDE da Figura 4.4b foi representado no sistema de projeção plana UTM (Fuso 25) e *datum* horizontal SIRGAS2000.

Os pontos amostrais do GNSS foram obtidos com precisão média relativa de 1,7 cm em N, 3,4 cm em E e 3,5 cm em h. Destaca-se a alta produtividade na aquisição de dados: os 4.209 pontos amostrais topográficos foram obtidos numa área emersa de 206.365 m², ou seja, taxa de aquisição de aproximadamente 204 pontos a cada 10.000 m²; os 8.161 pontos amostrais batimétricos foram coletados em uma área de cerca de 2.571.766 m², a uma taxa amostral de aproximadamente 315 pontos a cada 10.000 m². No controle de qualidade do MDE topográfico, que avalia a acurácia da modelagem digital de elevação, as discrepâncias entre as altitudes do modelo e as de referência, em 10 pontos de controle externos ao modelo, tiveram média de -0,010 m, desvio padrão de 0,029 m e erro quadrático médio de 0,047 m. Isso mostra a sensibilidade do MDE em representar feições morfológicas praiais com dimensões decimétricas. No controle de qualidade do MDE batimétrico, que avalia a separação entre o MDE topográfico e o MDE batimétrico, as discrepâncias entre as altitudes ortométricas da batimetria e da topografia, em 50 pontos de controle localizados em zonas de sobreposição dos levantamentos, tiveram média de -0,073 m e desvio padrão de 0,087 m. Portanto, as altitudes ortométricas dos pontos amostrais batimétricos tiveram discrepância decimétrica em relação aos pontos amostrais topográficos, o que indica que a integração dos levantamentos foi

realizada com acurácia adequada à composição dos perfis altimétricos da zona de praia para diversas aplicações.

Vale destacar que, tradicionalmente, os perfis de praia emersos e submersos são levantados e tratados como peças separadas cujas correções, em ambos os dados, são feitas de acordo com diferentes referenciais altimétricos (SCHMITT; MITCHELL; RAMSAY, 2008; IHO STANDARDS S-44_5E, 2008; BEHREND et al., 2000; MEINDL et al., 2013). Em relação ao método tradicional, portanto, a integração de dados emersos e submersos no mesmo referencial geodésico do SBG apresentou as seguintes vantagens: i) seleção de perfis praiais em qualquer local da área de estudo; ii) geração de superfícies de praia completas até a profundidade de fechamento a partir da integração de dados topográficos e batimétricos, evitando a necessidade de novas correções para integrar adequadamente esses dois conjuntos de dados; iii) posicionamento e altimetria com precisão decimétrica, compatíveis aos estudos de dinâmica de perfis praiais em curto prazo; iv) identificação de características típicas de ambos os setores como cúspides de praia, bermas, dunas costeiras e bancos de areia; v) altitudes ortométricas relacionadas ao NMM do SGB, permitindo a geração da superfície praial no mesmo referencial da altitude ortométrica de inundação; vi) viabilização da comparação entre as altitudes de inundação e as altitudes da orla; e vii) prescindência da instalação de um medidor de maré nas proximidades da área de pesquisa, que é comumente feito em levantamentos hidrográficos de Classe Especial (IHO STANDARDS S-44_5E, 2008; SCHMITT; MITCHELL; RAMSAY, 2008).

Figura 4.4 – a) Distribuição espacial dos pontos amostrais topográficos (laranja) e batimétricos (azuis) coletados em campo na Praia de Ponta Negra. b) Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pela interpolação dos pontos amostrais (Sistema de projeção UTM, Datum horizontal SIRGAS2000, Fuso 25 Sul)



Legenda: Os pontos vermelhos em (b) indicam os locais de aquisição dos parâmetros de ondas simulados do SMC-Brasil, enquanto as linhas em vermelho representam os perfis perpendiculares à LC utilizados para a obtenção do parâmetro de declividade da face praial

Fonte: Dos autores (2018).

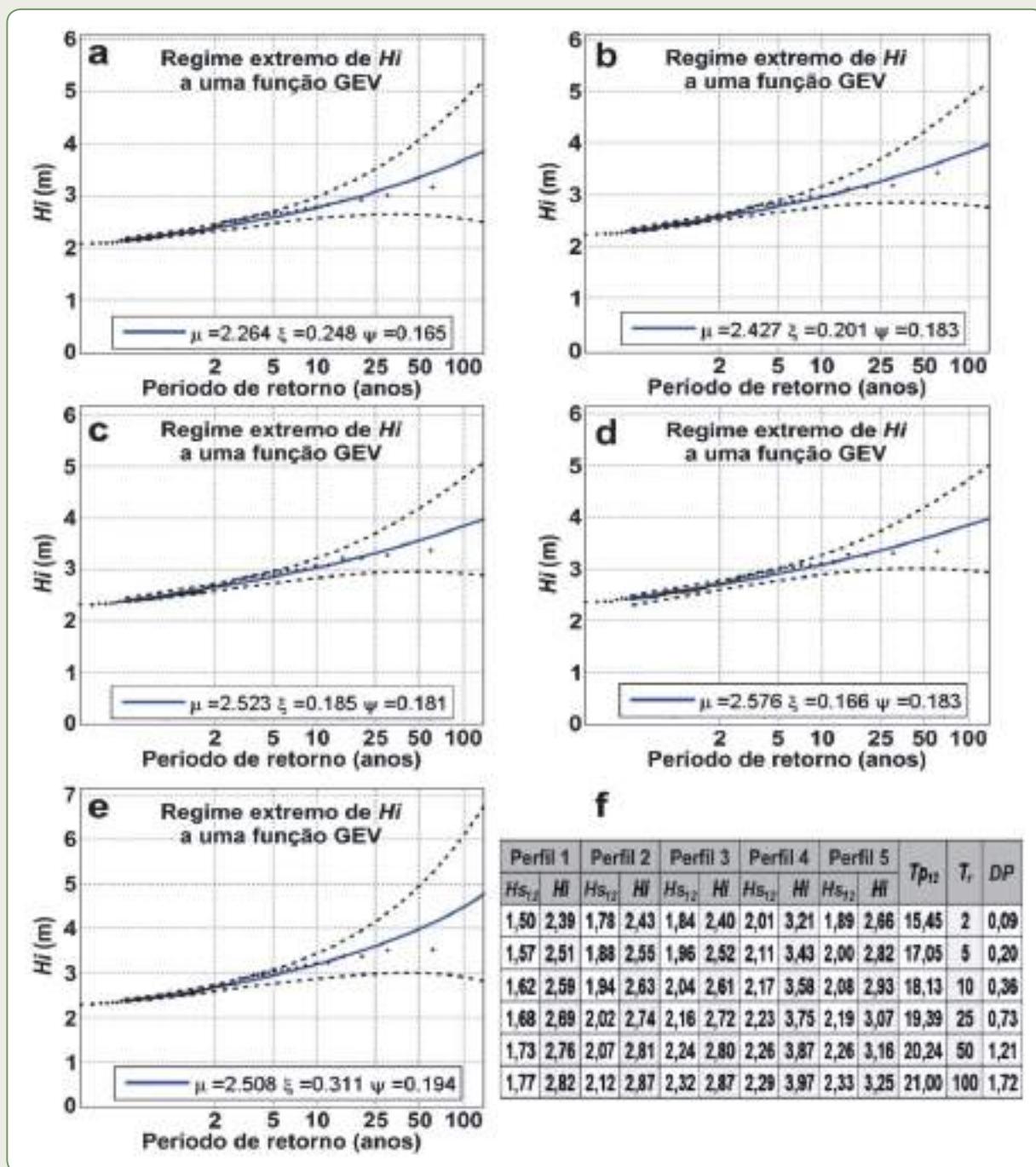
Altitudes de inundação calculadas

Através do SMC-Brasil, Almeida et al. (2015) identificaram quatro direções preferenciais de incidência de ondulação para uma área adjacente à Praia de Ponta Negra, próximo a isóbata de 20 m. Aquelas provenientes de leste (E) e de leste-sudeste (ESE) representaram mais de 95% da ondulação incidente, sendo que as provindas de leste-nordeste (ENE) e sudeste (SE), somadas com as duas primeiras direções, representaram 99,9%. Os autores observaram que as ondulações provenientes de ENE obtiveram os maiores valores de tempestade, com alturas de 2,4 m (H_{S12}) e períodos de pico de 18,1 s (T_{P12}) para um período de retorno de 10 anos. Esse mesmo padrão de ondulação também foi registrado nos trabalhos de Hidroconsult (1979) e Tavares Júnior (1980) a norte da Praia de Ponta Negra na isóbata de 10 m.

Dessa forma, objetivando o cálculo das maiores altitudes de inundação por período de retorno, foram contempladas as maiores ondas de tempestade (H_{S12}), que foram aquelas vindas de nordeste (Figura 4.5). Assim, as altitudes de inundação (H_i) para os períodos de retorno probabilísticos (T_r) de 2 a 100 anos, calculados através das Equações 4.5 e 4.7 nos perfis de 1 a 5 apresentados na Figura 4.4b, obtiveram seus valores em torno de 2,39 a 3,97 m, para alturas de onda (H_{S12}) entre 1,50 e 2,33 m e períodos de pico (T_{P12}) de 15,45 a 21 s, respectivamente. Para tanto, levaram-se em consideração: uma sobrelevação astronômica e meteorológica, respectivamente, de 2,60 e 0,20 m, registrada na base de dados do SMC-Brasil; e declividades da face praial de 2,40, 2,28, 2,18, 3,95 e 2,77° para, respectivamente os perfis de 1 a 5.

É importante ressaltar que a distribuição de Valores Extremos Generalizados (GEV) (FISHER; TIPPETT, 1928), apresentada na Figura 4.5, indicou que quanto maior a estimativa do período de retorno, maior é o incremento no desvio padrão (linha tracejada em preto e desvio padrão, na Figura 4.5) relativo aos valores de H_{S12} .

Figura 4.5 – Regimes extremos da altitude de inundação a uma função GEV para os perfis de 1 a 5, (a, b, c, d, e, respectivamente). Valores dos parâmetros (f) altura de onda (H_{s12}) e períodos (T_{p12}) extremos de tempestade, altitude de inundação (Hi), período de retorno (T_r) de 2 a 100 anos e seus respectivos desvios padrão (DP), para os perfis de 1 a 5 na Praia de Ponta Negra, apresentados na Figura 4.4

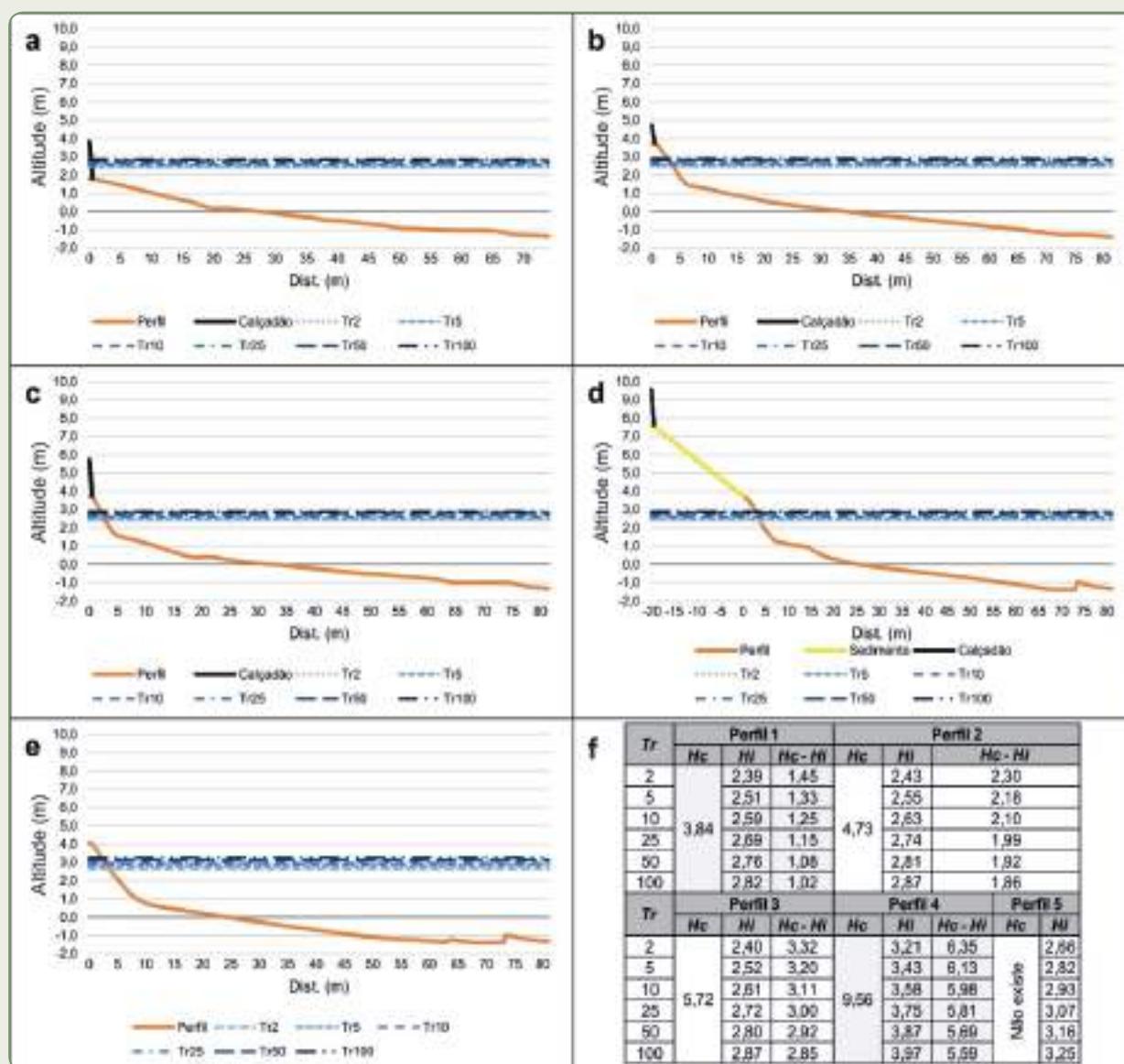


Fonte: Dos autores (2018).

Identificação e análise das áreas de inundação da orla costeira

A Figura 4.6 apresenta os perfis com as altitudes de inundação (H_i) em relação ao calçadão da Praia de Ponta Negra. Observa-se que a distância vertical entre o calçadão (topo do muro) e a altitude de inundação aumenta do primeiro ao quarto perfil da praia, ou seja, de sul para norte (Figura 4.6a, b, c, d). Para essas distâncias, os menores valores foram aqueles referentes ao perfil 1, que variaram entre 1,45 e 1,02 m, respectivamente, para os períodos de retorno de 2 e 100 anos (Figura 4.6f). As maiores distâncias foram verificadas no perfil 4, de 6,35 a 5,59 m, respectivamente, para os períodos de retorno de 2 e 100 anos (Figura 4.6f).

Figura 4.6 – Distribuição espacial das altitudes de inundação (H_i) e seus respectivos períodos de retorno (T_r) para os perfis de 1 a 5, (a, b, c, d, e, respectivamente), indicados na Figura 4.4b, comparados à altitude do calçadão da orla da Praia de Ponta Negra. Valores de (f): períodos de retorno (T_r) de 2 a 100 anos; altitude do calçadão (H_c); altitudes de inundação (H_i) e diferença entre altitude do calçadão e altitude de inundação ($H_c - H_i$) para os perfis de 1 a 5



Fonte: Dos autores (2018).

Assim, tendo em vista o intenso processo de erosão apontado por Amaro et al. (2012b, 2015) e Busman et al. (2014), é possível indicar que as áreas mais suscetíveis à energia do espraiamento das ondas são aquelas onde: i) há o impacto direto dessas no calçadão (perfil 1, na Figura 4.6a); ii) são verificadas as menores distâncias verticais entre o calçadão e a altitude de inundação (perfil 1, na Figura 4.6a); e iii) aquelas cujas ondas atingem e solapam o fino pacote de sedimentos encontrados na base do calçadão (perfis 2 e 3, na Figura 4.6b e 4.6c).

Para os trechos adjacentes aos perfis 1, 2 e 3 ficaram evidentes os danos decorrentes da ação das ondas, seis meses após o levantamento (Figura 4.7). Foi possível visualizar *in loco* (Figuras 4.7a e 4.7b) que as ondas, ao atingirem o paramento vertical do muro de arrimo do calçadão, eram refletidas e tinham sua altura aproximadamente dobrada (seta azul na Figura 4.7a). Dando início a um processo hidrodinâmico complexo em que a onda refletida interagia com a onda incidente amplificando a energia de remoção dos sedimentos em direção ao mar aberto. Com essa remoção de sedimentos da base do calçadão, que em alguns setores ultrapassou a fundação (seta vermelha na Figura 4.7b), o muro perdeu sustentação e desabou (Figura 4.7c, 4.7d).

Figura 4.7 – a) Processo de reflexão de onda decorrente do paramento vertical do calçadão da orla da Praia de Ponta Negra. b) Região da base do calçadão da orla da Praia de Ponta Negra cujo pacote de sedimentos foi removido pela interação das ondas com o paramento vertical. c) e d) Imagens mostram os danos causados devido à sobrelevação do NM na Praia de Ponta Negra em maio de 2012



Fonte: Dos autores (2018).

A partir do perfil 4 (Figura 4.6d) o pós-praia permanece, ainda que temporariamente, protegido por um pacote sedimentar (duna frontal) que alcança 10 m de altura e até 20 m de largura. Para o perfil 5 (Figura 4.6e), como este não possui calçadão, as ondas atingem suas maiores altitudes de espraiamento, sem, entretanto, ocasionar risco de danos em estruturas próximas.

Cabe mencionar que os cenários de inundação e destruição da orla da Praia de Ponta Negra até então analisados nas Figuras 4.6 e 4.7 tendem a se tornar ainda mais graves, devido principalmente às previsões de mudanças ambientais globais de elevação do NMM (IPCC, 2013) e à intensificação dos processos de erosão e inundação pelo aumento da frequência de valores extremos de altura das ondas (SANTOS, 2014). Exigindo ações importantes sobre manejo, medidas de proteção e conservação em praias sujeitas aos processos acima descritos (SOUZA et al., 2005).

CONCLUSÕES

O método apresentado no presente trabalho permitiu a identificação de locais suscetíveis a inundação devido à sobrelevação do NM por eventos extremos, num contexto atual. No entanto, a comparação entre as altitudes de inundação e as altitudes da orla só foi possível devido ao fato dessas variáveis serem determinadas no mesmo referencial geodésico altimétrico do SBG, o qual é fixo, unívoco e relativamente estável no tempo.

As informações sobre as áreas de inundação mostraram-se de fundamental importância à gestão costeira, especialmente na orla da Praia de Ponta Negra, onde a urbanização (calçadão e muro de arrimo) associada ao avanço do mar em direção ao continente eliminaram feições morfológicas de proteção costeira (como bermas e dunas frontais), feições essas importantes na redução dos impactos relacionados à erosão e à inundação, o que tornou o ambiente mais vulnerável a esses eventos extremos de sobrelevação do NM.

Por fim, a combinação entre dados altimétricos de alta resolução espacial derivados do MDE da superfície topobatimétrica com as informações consistentes do modelo hidrodinâmico do SMC-Brasil em profundidades inferiores a 10 m demonstrou que o método apresentado tem grande potencial no subsídio de projetos de mitigação e/ou adaptação de impactos ambientais e socioeconômicos de origem antrópica e natural.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, L. R.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 15, n. 2, p. 135-151, 2015. DOI 10.5894/rgci532.
- AMARAL, R. F. *Contribuição ao estudo da evolução morfodinâmica do litoral oriental sul do Rio Grande do Norte, entre Ponta de Búzios e Baía Formosa*. 1999. 252 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T; SOUTO, M. V. S. *Geotecnologias aplicadas ao monitoramento costeiro: sensoriamento remoto e geodésia de precisão*. Natal: Editora Natal, 2012. 120 p.
- AMARO, V. E.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; TABOSA, W. F.; LIMA, Z. M.; SANTOS JÚNIOR, O. F.; FERREIRA, A. T. S.; SANTOS, A. L. S.; BUSMAN, D. V. *Indicação das obras emergenciais de contenção e*

reparação dos equipamentos públicos e de segurança dos frequentadores da Praia de Ponta Negra, Natal, RN. Natal, RN, 2012. 254 p. Laudo pericial, item b.

AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F.; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images, Ponta Negra beach, Natal City, Northeastern Brazil. **Marine Geodesy**, v. 38, p. 1-25, 2015.

BARROS, J. D.; FURTADO, M. L. S.; COSTA, A. M. B.; MARINHO, G. S.; SILVA, F. M. Sazonalidade do vento na cidade de Natal/RN. **Sociedade e Território**, v. 25, n. 2, p. 78-92, 2013. Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, Brasil. Disponível em: <<http://www.periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/3580>>. Acesso em: ago. 2015.

BEHREND, D.; CUCURULL, L.; VILÀ, J.; HAAS, R. An Inter-Comparison Study to Estimate Zenith Wet Delays Using VLBI, GPS, and NWP Models. **Earth, Planets and Space**, v. 52, n. 10, p. 691-694, 2000.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 1981.

BUSMAN, D. V.; AMARO, V. E.; PRUDENCIO, M. C. Comparison of prognostic models in different scenarios of shoreline position on Ponta Negra beach in Northeastern Brazil. **World Academy of Science, Engineering and Technology (On-line)**, v. 8, p. 165-169, 2014.

CAMUS, P.; MENDEZ, F. J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 72, p. 56-68, 2013. DOI 10.1016/j.coastaleng.2012.09.002.

CEPAL. **Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe**: dinámicas, tendencias y variabilidad climática. 2011. 263 p. Santiago, Chile: Organización de las Naciones Unidas (ONU), Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Disponível em: <<http://www.cepal.org/publicaciones/xml/2/45542/W.447.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

CHAVES, M. S. **Vulnerabilidade costeira entre as praias da Redinha e Genipabú Natal/RN**. 2000. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2000.

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Carta Náutica nº 810**: Proximidades do Porto de Natal. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2009. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html>. Acesso em: ago. 2015.

DINIZ, R. F. Erosão costeira e o desenvolvimento de costa com baías em forma de zeta no litoral oriental do estado do Rio Grande do Norte. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC. 50., Natal-RN. **Anais...** 1998, p.1041.

DINIZ, R. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. Erosão costeira no litoral oriental do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO DA ABEQUA, 7., 1999, Porto Seguro-BA, **Anais...** 1999. Disponível em: <http://www.abequa.org.br/trabalhos/viiabequa_zcp067.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2013.

ESTEVES, L. S. Is managed realignment a sustainable long-term coastal management approach? **Journal of Coastal Research**, Special Issue n. 65, p. 933-938, 2013.

ESTEVES, L. S. **Managed realignment**: a viable long-term coastal management strategy? Springer Briefs. Environmental Science. New York: Springer, 2014. Disponível em: <<http://www.springer.com/earth+sciences+and+geography/earth+system+sciences/book/978-94-017-9028-4/>>.

FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C.; KIRBY, J. F. Strategies for the accurate determination of orthometric heights from GPS. **Survey Review**, v. 34, p. 278-295, 1998.

FERREIRA, A. T. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Geodésia aplicada à integração de dados topográficos e batimétricos na caracterização de superfícies de praia. **Revista Brasileira de Cartografia (On-line)**, v. 1, p. 153-170, 2014.

FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. **Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, v. 24, p. 180-190, 1928.

GARCIA, M. M. **Metodología para el análisis estadístico no estacionario de valores extremos de variables geofísicas.** 2008. 408 f. Tese (Doutorado em Ingenieria de Costas y Puertos) – Departamento de Ciencia y Técnicas del Agua y Medio Ambiente. Universidad de Cantabria, Santander, 2008.

GONZALES, M.; MEDINA, R.; GONZALES-ONDINAS, J.; OSÓRIO, A.; MÉNDEZ, F.; GRÁCIA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers & Geosciences*, v. 33, n. 7, p. 916-931, 2007.

GUANCHE, Y.; GUANCHE, R.; CAMUS, P.; MENDEZ, F. J.; MEDINA, R. A multivariate approach to estimate design loads for offshore wind turbines. *Wind Energy*, v. 16, n. 7, p. 1091-1106, 2013. DOI 10.1002/we.1542.

HIDROCONSULT – Consultoria, Estudos e Projetos. **Estudo do Comportamento hidráulico do estuário e litoral adjacente à foz do Rio Potengi, Natal:** Estado do Rio Grande do Norte. Natal: HIDROCONSULT. Relatórios Finais, v. 1-2. 1979. Relatório técnico.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Modelo de ondulação geoidal:** MAPGEO2010. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 1 dez. 2014.

IHO STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS. 5., 2008, Monaco. **International Hydrographic Bureau.** Disponível em: <<http://www.ihoh.int/srv1/index.php?lang=en>>. Acesso em: 11 jan. 2015.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Precipitação acumulada.** Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso: 1 jan. 2015.

INTERGOVERNMENT PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,** 2013.

LIU, P. L. F.; LOSADA, I. J. Wave propagation modeling in coastal engineering. *Journal of Hydraulic Research*, v. 40, n. 3, p. 229-240, 2002. DOI 10.1080/00221680209499939.

MARTÍNEZ, C.; QUEZADA, M.; RUBIO, P. Historical changes in the shoreline and littoral processes on a headland bay beach in central Chile. *Geomorphology*, v. 135, n. 1-2, p. 80-96, 2011. DOI 10.1016/j.geomorph.2011.07.027.

MASSELINK, G. E.; HUGHES, M. G. **Introduction to coastal processes and geomorphology.** London: Arnold, 2003. 354 p.

MEDELLÍN, G.; MEDINA, R.; FALQUÉS, A.; GONZÁLEZ, M. Coastline sand waves on a low-energy beach at “El Puntal” spit, Spain. *Marine Geology*, v. 250, n. 3-4, p. 143-156, 2008. DOI 10.1016/j.margeo.2007.11.011.

MEINDL, M.; BEUTLER, G.; THALLER, D.; DACH, R.; JÄGGI, A. Geocenter coordinates estimated from GNSS data as viewed by perturbation theory. *Advances in Space Research*, v. 51, n. 7, p. 1047-106, 2013. DOI 10.1016/j.asr.2012.10.026.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia:** noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de texto, 2007. 206 p.

MÖLLER, I.; SPENCER, T.; FRENCH, J. R.; LEGGETT, D. J.; DIXON, M. The sea-defence value of salt marshes: field evidence from North Norfolk. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, v. 15, p. 109-116, 2001.

MONICO, J. F. G; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C. D; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009.

MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). **Geomorfologia:** uma atualização de bases e conceitos. 4. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil S.A., 2001. p. 253-308.

MUEHE, D. (Org.). **Erosão e progradação no litoral brasileiro.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006. 476 p.

NIELSEN, P.; HANSLOW, D. J. Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, v. 7, n. 4, p. 1139-1152, 1991.

OLLIKAINEN, M. Accuracy of GPS levelling. In: GENERAL MEETING OF THE NORDIC GEODETIC COMMISSION, 13., 1998, Sweden. *Anais...* 1998, v. 1, p. 25-29.

OSBORNE, P. D.; ROOKER, G. A. Sand re-suspension events in a high energy infragravity swash zone. *Journal of Coastal Research*, v. 15, p. 74-86, 1999.

RAABE, A. L. A.; KLEIN, A.; GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R. MEPBAY & SMC: software tools to support different operational levels of headland bay beach coastal engineering projects. *Coastal Engineering*, v. 57, n. 2, p. 213-226, 2010. DOI 10.1016/j.coastaleng.2009.10.008

RESTREPO, L. J. C.; OTERO, D. L.; LÓPEZ, I. S. A. Clima de oleaje en el Pacífico Sur de Colombia, delta del río Mira: comparaciones estadísticas y aplicación a procesos costeros. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, v. 33, n. 128, p. 357-375, 2009. Disponível em: <http://www.accefyn.org.co/revista/Vol_33/128/357-375.pdf>. Acesso em: ago. 2015.

SANTOS, F. D. Vulnérabilité, impacts et adaptation des zones côtières au changement global. In: MONACO, André; PROUZET, Patrick (Coord.). *Risques côtiers et adaptations des sociétés*. Londres: ISTE Editions, 2014. (Collection Mer et Ocean).

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. Rede geodésica para o monitoramento costeiro do Litoral Setentrional do Estado do Rio Grande do Norte. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 17, n. 4, p. 571-585, 2011.

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; SOUTO, M. V. S. Metodologia geodésica para levantamento de linha de costa e modelagem digital de elevação de praias arenosas em estudos de precisão de geomorfologia e dinâmica costeira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 63, edição especial Geodésia e Topografia, p. 663-681, 2011.

SANTOS, M. S. T.; SÁ, N. C de. O uso do GPS em levantamentos geofísicos terrestres. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 24, n. 1, p. 63-80, 2006.

SMC-BRASIL. *Sistema de Modelagem Costeira do Brasil*. Web-page, Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, Santander, Espanha, 2014. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com>>. Acesso em: 1 abr. 2014.

SCHMITT, T.; MITCHELL, N. C.; RAMSAY, A. T. S. Characterizing uncertainties for quantifying bathymetry change between time-separated multibeam echo-sounder surveys. *Continental Shelf Research*, v. 28, n. 9, p. 1166-1176, 2008. DOI 10.1016/j.csr.2008.03.001.

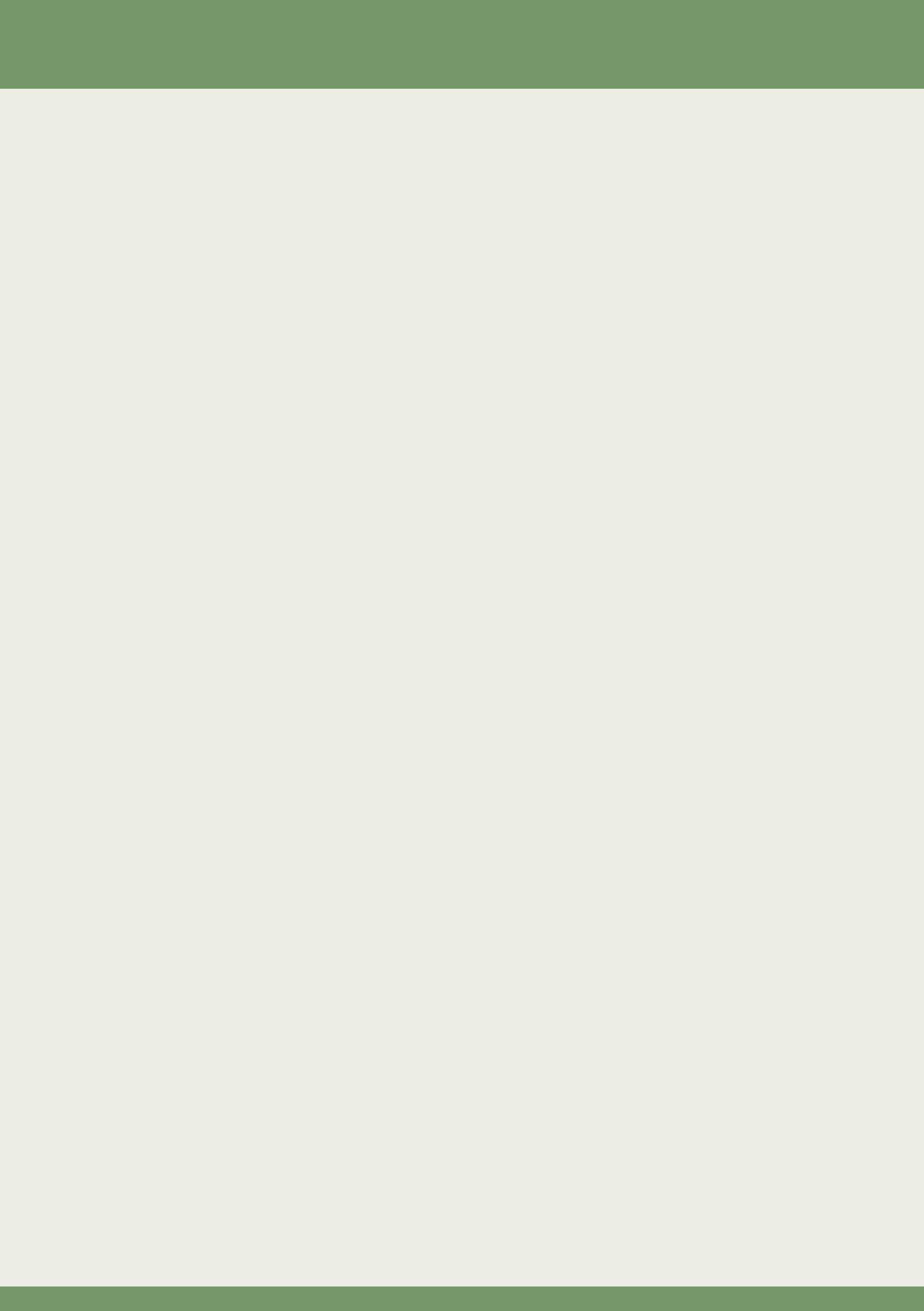
SOUZA, F. E. S. *Evolução morfodinâmica da região de influência estuarina do rio Curimataú/RN, com ênfase nas alterações do ambiente deposicional de manguezal e a integração de geodados em SIG*. 150 f. 2004. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

SOUZA, C. R. G.; SOUZA FILHO, P. W. M.; ESTEVES, L. S.; VITAL, H.; DILLENBURG, S. R.; PATCHINEELAM, S. M.; ADDAD, J. E. Praias arenosas e erosão costeira. In: SOUZA, C. R. G.; SUGUIO, K.; OLIVEIRA, A. M. S.; OLIVEIRA, P. E. (Org.). *Quaternário do Brasil*. Ribeirão Preto: Holos, 2005. p. 130-152.

TAVARES JÚNIOR, W. *Pesquisa de modelo matemático, para simulação do espectro de energia unidimensional, de ondas de superfície geradas pelo vento (Natal, RN, 05° 45' 02" E 035° 11' 01"W)*. 137 f. 1980. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Programa de Pós-Graduação em Oceanografia do Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

TINTORÉ, J.; MEDINA, R.; GÓMEZ, L.; ORFILA, A.; VIZOSO, G. Integrated and interdisciplinary scientific approach to coastal management. *Ocean & Coastal Management*, v. 52, n. 10, p. 493-505, 2009. DOI 10.1016/j.ocecoaman.2009.08.002.

VITAL, H. Rio Grande do Norte. In: MUEHE, D. (Org.). *Erosão e progradação no litoral brasileiro*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006. p. 155-172.



AVALIAÇÃO DO CLIMA DE ONDAS E TRANSPORTE SEDIMENTAR DO LITORAL NORTE DO MUNICÍPIO DE GOIANA (PE) UTILIZANDO O SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC-BRASIL)

Patricia Fernanda Passos de Oliveira
Lucia Maria Mafra Valença
Eduardo Paes Barreto
Valdir do Amaral Vaz Manso

RESUMO

O objetivo principal deste estudo foi realizar análises da dinâmica costeira através de simulações numéricas no Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), com o intuito de facilitar a compreensão do clima de ondas, do sistema de correntes e do transporte sedimentar no litoral de Goiana (PE). A avaliação do clima de ondas demonstrou que as direções de ondas de maior ocorrência para a área de estudo são ondas provenientes da direção leste-sudeste (ESE), com 80% de ocorrência. Em uma análise comparativa de três pontos DOW em águas intermediárias não se verificou discrepância entre os valores dos parâmetros de ondas. A caracterização do clima de ondas demonstra que as alturas de onda e os períodos de pico médios com maior frequência são de aproximadamente 1,18 m e 8,0 s. As relações entre a altura de onda significativa com o período de pico e direção indicam que as ondas mais frequentes possuem alturas entre 0,9 e 1,4 m, com período de pico em torno de 7 e

10 s, e direção proveniente de 115°. As ondas quebram na borda externa dos *beachrocks* e chegam com menor energia na praia. Esses obstáculos naturais fazem com que, ao invés dos vetores chegarem perpendiculares à praia, haja mudança de inclinação no ângulo de incidência das ondas. A propagação das ondas procedentes de ESE gerou um sistema de correntes com sentido predominante de sul para norte. Essa tendência de transporte pode ser verificada através da presença dos espiões, que atuam como indicadores geomorfológicos, indicando a direção predominante da deriva litorânea.

Palavras-chave: Dinâmica costeira. Ondas. *Beachrocks*. Deriva litorânea.

INTRODUÇÃO

As regiões costeiras correspondem ao espaço físico da interface oceano-continente-atmosfera, onde os processos costeiros sob ação dos agentes naturais atuam de forma dinâmica e provocam erosão, transportes e deposição de sedimentos. Processos naturais, como correntes oceânicas, ondas e marés, agentes climáticos e nível relativo do mar, variam no tempo e no espaço e modificam constantemente a configuração da costa. Além dos fatores naturais que agem sobre os sistemas costeiros, a ocupação humana da zona costeira tem aumentado nas últimas décadas, o que intensifica os processos que provocam erosão ou deposição na linha de costa (KAY; ALDER, 1999).

Nos últimos anos, o agravamento do processo erosivo no litoral de Pernambuco vem modificando consideravelmente o transporte de sedimentos, com destaque para a região costeira da região metropolitana do Recife onde tais processos vêm de longa data. Alguns trechos são naturalmente vulneráveis à erosão pelas características ambientais inerentes, como o baixo aporte sedimentar proveniente dos rios costeiros para as praias adjacentes e o estreitamento da plataforma continental interna, que dificulta o armazenamento de sedimentos para remobilização (MALLMANN; PEREIRA, 2014).

Somam-se ainda ocupações desordenadas e irregulares ao longo do litoral pernambucano e a impermeabilização do ambiente praial e de manguezais, o que acaba alterando o balanço sedimentar (COSTA; PONTES; ARAÚJO, 2008; GOMES; SILVA, 2014).

O litoral de Goiana também vem sofrendo com problemas semelhantes, uma vez que o município atualmente compõe uma região de desenvolvimento do estado com muitos empreendimentos estruturadores, como, por exemplo, os polos farmacoquímico e automotivo (CONDEPE-FIDEM, 2010).

Os estudos para esse litoral são insuficientes, havendo uma necessidade crescente de análises, monitoramentos e novas aplicações metodológicas que visem uma maior compreensão do ambiente costeiro, tendo em vista a atual fase de desenvolvimento em que o município se encontra.

Os modelos numéricos para previsão da variação da linha de praia têm-se mostrado uma ferramenta poderosa no planejamento de projetos localizados na região litorânea, devido a sua praticidade e baixo custo, podendo ser rodados em computadores comuns, além de considerarem uma quantidade maior de variáveis (D'AQUINO, 2003).

Modelos permitem integrar informações espacialmente dispersas, interpolar informações para regiões nas quais não há medições, ajudar a interpretação de medições feitas em estações pontuais, propiciar entendimento da dinâmica de processos, prever situações simulando cenários futuros etc. São empregados com maior frequência para simulações de cenários em águas costeiras, baías, estuários, rios, reservatórios, lagos e lagoas (ROSMAN, 2006).

O SMC-Brasil possui significativa importância por ser uma ferramenta auxiliar para a gestão costeira, visando suprir a escassez de estudos no litoral brasileiro e onde há escassez de informação como no litoral norte de Pernambuco.

Dessa forma este trabalho teve o intuito de compreender a característica das ondas através da base de dados de ondas do SMC-Brasil e de informações locais. Buscou avaliar também a variação interanual média do transporte longitudinal em perfis traçados no trecho entre as praias de Carne de Vaca e Tabatinga. Foi realizado também um estudo de correntes baseado na modelagem da propagação das ondas, que tem como consequência a estimativa das correntes geradas pelas ondas e o transporte de sedimentos resultante dessas correntes.

Primeiramente foi realizada uma caracterização dos aspectos oceanográficos da região de estudo. Em seguida, foram abordados os módulos computacionais que fazem parte do SMC e os dados estatísticos de ondas utilizados para a computação dos processos costeiros. Por fim, foram apresentados os resultados e discussões juntamente com as implicações nos processos costeiros envolvidos da área e a avaliação da ferramenta SMC nesse contexto.

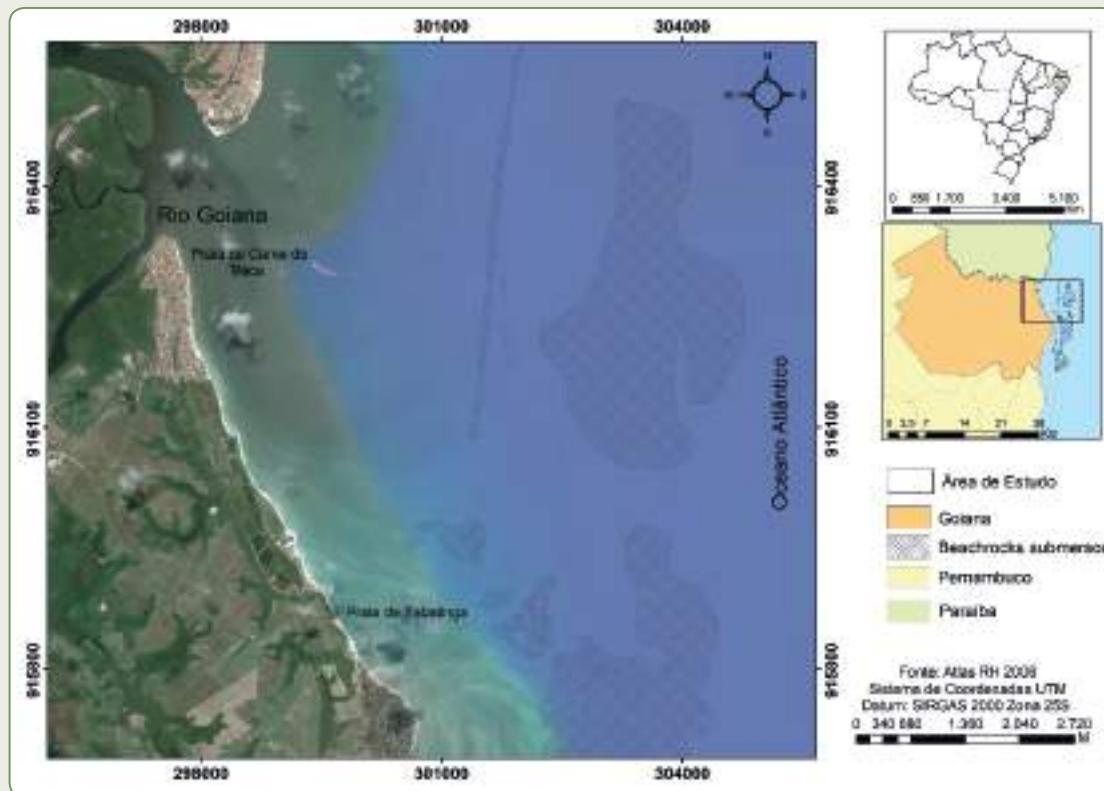
CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

Localização

O trecho de praia analisado possui aproximadamente 6 km de extensão, compreende as praias de Carne de Vaca e Tabatinga na porção norte do município de Goiana (Figura 5.1). Limita-se ao norte pelo complexo estuarino do Rio Goiana e pelo estado da Paraíba, e ao sul pela Praia de Ponta de Pedras.

A plataforma adjacente possui baixo gradiente de declividade formando uma planície de maré abrigada por *beachrocks* (MACÊDO, 2015).

Figura 5.1 – Localização da área de estudo



A migração de bancos arenosos na plataforma, devido às variações das marés, é bastante importante para a configuração morfológica das praias, havendo frequentemente um incremento na largura do perfil praial na porção submersa em razão dos bancos que se soldam às praias (Figura 5.2a) (OLIVEIRA, 2017).

A utilização de obras de contenção à erosão é menos frequente em relação às praias da região metropolitana do Recife (RMR), sendo os espiões feitos de troncos de coqueiros os mais utilizados, principalmente mais ao norte da Praia de Carne de Vaca (Figura 5.2b).

Aspectos oceanográficos

A região está submetida a um regime de mesomaré, sendo a costa pernambucana classificada por Hayes (1979) como forte mesomaré, variando de 0,2 a 2,6 m (BRASIL, 2006).

Figura 5.2 – Estrutura de contenção à erosão feita de tronco de coqueiro na Praia de Carne de Vaca



Fonte: Dos autores (2018).

O sistema de ondas oceânicas que aportam nas áreas costeiras do estado de Pernambuco, em função da significativa constância na velocidade e direção do sistema de ventos, tem grande influência no transporte de sedimentos à praia. As ondas de direção ESE, associadas a ventos de mesma direção, têm altura média de 1 a 1,5 m e períodos de 5 a 7 s, dominantes durante todo o ano. Com relação à sazonalidade das alturas das ondas, observa-se que no outono e primavera há uma predominância de valores em torno de 1,0 m; no verão oscilam entre 0,85 e 1,0 m e no inverno alcançam os maiores valores anuais, em torno de 1,25 m. Os períodos das ondas mencionadas ficam em torno de 6,5 s, para as condições de outono, inverno e primavera, e 5,0 s no verão (BRASIL, 2006).

Com dados coletados em uma profundidade de 12 m pelo ondógrafo direcional flutuante modelo Waverider MKIII (Boia UFPE01), durante a execução do Projeto MC-ONDAS/NE (2011-2014), foi possível caracterizar que as ondas predominantes na região de PE são os sistemas de vagas, geradas pelos alísios que sopram continuamente sobre o Oceano Atlântico tropical, porém também são registrados vários sistemas de *swell*, predominantemente vindos do quadrante sul, e que se caracterizam por ter períodos de pico acima dos 10 s (GOMES, 2015).

Em levantamento nas praias de Goiana medido visualmente através de mira posicionada verticalmente na zona de espraiamento médio, nos meses de novembro de 2014 a janeiro e julho de 2015, observou-se que a altura média de onda foi de 0,82 m, e o período médio foi de 10,3 s. Já as velocidades de correntes para o mesmo período tiveram uma média de 0,16 m/s (MADRUGA, 2016).

O sistema de correntes costeiras é caracterizado por uma deriva litorânea que predomina de sul-norte (S-N) na costa nordestina do Brasil (BITTENCOURT et al., 2005). Os dados sobre correntes são poucos e pontuais para a costa de Pernambuco e derivam de alguns trabalhos isolados. Há poucos estudos específicos sobre correntes que as quantifiquem a não ser em trabalhos em que se pode inferir a presença destas na zona de surfe a partir da caracterização dos estados morfodinâmicos característicos (BORBA, 1999; MACÊDO, 2011; OLIVEIRA et al., 2013; MADRUGA FILHO, 2004 apud MACÊDO, 2015).

MATERIAIS E MÉTODOS

Sistema de Modelagem Costeira – SMC-BRASIL

O Sistema de Modelagem Costeira (SMC) é uma ferramenta numérica desenvolvida pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria (IH Cantábría), da Universidade de Cantábría, Espanha, no âmbito da Direção Geral de Costas do Ministério do Meio Ambiente daquele país. O sistema foi adaptado e transferido para a administração pública brasileira em 2011 através do projeto intitulado Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira, constituindo-se em uma ferramenta computacional que combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas, ondas e nível do mar, além de modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira.

Um dos objetivos do projeto de colaboração internacional, citado anteriormente, é o de fortalecer os órgãos de gestão que lidam com planejamento e controle ambiental do litoral brasileiro.

O sistema foi estruturado para trabalhar com dinâmicas que influem na morfologia da costa, de modo a facilitar a elaboração de estudos de casos, usando as metodologias descritas nos documentos temáticos incluídos no pacote. Dessa forma, utilizando critérios técnicos padronizados e organizados

de forma sistemática, pode-se utilizar os modelos numéricos mais rápida e eficientemente, aumentando a produtividade e a confiabilidade das decisões (GOMES, 2015).

O SMC-Brasil integra uma série de modelos numéricos, os quais se encontram estruturados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a serem modelados. Existem duas ferramentas numéricas, uma delas é o SMC-Tools, que reúne uma série de bancos de dados da costa brasileira como batimetria, ondas e nível (IH-DATA) e análises matemáticas e estatísticas para avaliação da dinâmica costeira (IH-AMEVA). Já a ferramenta SMC reúne uma série de modelos numéricos de propagação de ondas, geração de correntes e de transporte de sedimentos, permitindo também analisar a estabilidade de uma praia (SMC-BRASIL, 2014a).

Base de dados de ondas

O SMC-Brasil conta com uma base de dados de reanálise de ondas distribuída ao longo da costa do Brasil. Essa base de dados conta com duas séries horárias de estados de mar de 60 anos, além de metodologias e ferramentas necessárias para propagar as ondas, de águas profundas até junto à praia, o que permite realizar estudos litorâneos em alta resolução espacial e temporal. Para a geração da base de dados e propagação das ondas até a praia, a metodologia é composta de três etapas. Na primeira delas foi gerada uma reanálise global que permitiu determinar as características gerais das ondas em águas profundas próximas à costa do Brasil (*Global Ocean Waves – GOW*). Na segunda etapa, foi realizado o *downscaling*, que visa proporcionar características regionais a esse banco de dados, transferindo as ondas até uma posição próxima à costa (*Downscaled Ocean Waves – DOW*). Finalmente existe uma terceira etapa, que consiste na propagação das ondas até a costa ou junto à praia executada pelo próprio usuário do sistema (SMC-BRASIL, 2014b).

As metodologias para a geração, calibração e validação das ondas, bem como sua transferência até a costa, estão descritas nos documentos temáticos e metodológicos do SMC-Brasil.

A base de dados de ondas DOW é usada como dado de entrada no modelo de propagação de ondas OLUCA, que é um modelo combinado de refração-difração que resolve a aproximação parabólica fracamente não linear da equação do declive suave, simulando o comportamento de ondas. Esse modelo inclui também processos de empinamento (*shoaling*), refração, difração e dissipação de energia por quebra para um espectro de energia discretizado em frequências e direções (SMC-BRASIL, 2014c).

Os modelos numéricos OLUCA e COPLA trabalham sequencialmente de forma que o campo de ondas calculado no OLUCA dá entrada no COPLA para cálculo das correntes. O modelo COPLA é um modelo numérico que resolve as equações de fluxo dentro da zona de arrebentação. É baseado fundamentalmente na resolução das equações médias (promediadas) do movimento e da equação da continuidade. No entanto, essas equações podem ser resolvidas com diferentes graus de complexidade (SMC-BRASIL, 2014d).

Batimetria

Nesse estudo foram utilizados dados batimétricos obtidos através de cartas náuticas do litoral brasileiro da Marinha do Brasil e do Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH), disponíveis na base de dados BACO do SMC-Brasil. O módulo BACO é composto por informações relacionadas às

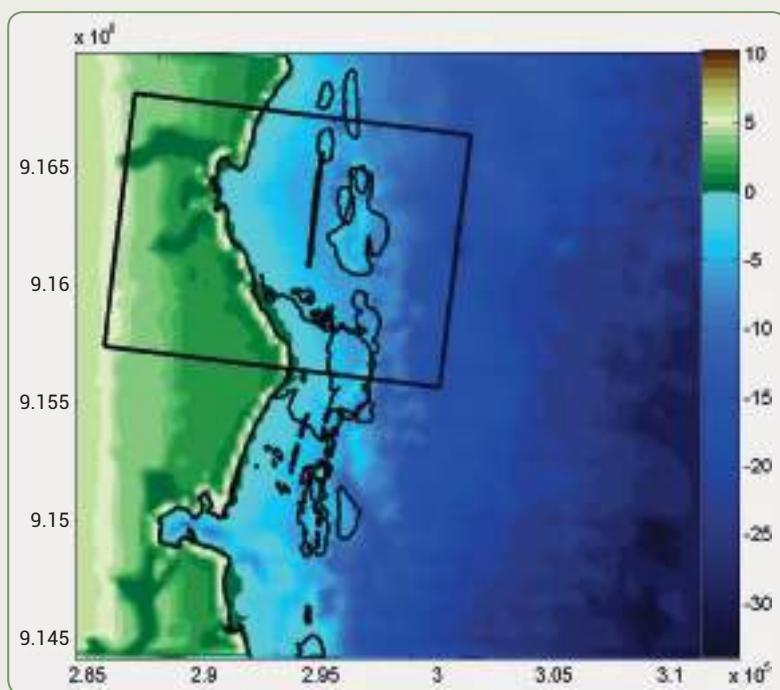
batimetrias, linhas costeiras e imagens de satélite. É um programa de pré-processamento integrado ao SMC-Tools, que permite obter as batimetrias das cartas náuticas de qualquer área da costa brasileira.

Para maior refinamento da batimetria do SMC, foi incluída uma malha batimétrica da plataforma interna adjacente à costa de Goiana obtida do Projeto Granmar (CPRM, 2008). Essa malha consiste em perfis perpendiculares à costa até a isóbata de 30 m. Devido à ausência de dados na área entre os *beachrocks* e a linha de costa, foi feita uma inferência da profundidade desse setor através da elevação dada pelo Google Earth® Pro. Foram utilizados também dados altimétricos do satélite Topex/Poseidon.

Definição das malhas de propagação e seleção dos casos

A partir das características da ondulação da área de estudo, foi determinada a direção das malhas de cálculo, sendo levada em consideração a direção principal das ondas incidentes. As malhas foram desenhadas com células espaçadas 30 x 30 m entre si, possuindo 484 linhas e 361 colunas (Figura 5.3).

Figura 5.3 – Exemplo de uma das malhas utilizadas no modelo de propagação das ondas no SMC-Brasil



Fonte: Dos autores (2018).

Foram utilizadas malhas com orientação de 165° para propagação de ondas SE e ESE, que são as que predominam na área. Foram selecionados 150 casos obtidos através do algoritmo de máxima dissimilaridade (MaxDiss) (KENNARD; STONE, 1969). Destaca-se que cada caso foi propagado em situação de maré baixa (0 m), maré média (1,25 m) e maré alta (2,5 m). Cada caso é propagado usando o modelo OLUCA e, depois, é feita uma interpolação dos dados para poder reconstruir a base de dados de 60 anos.

Assim, a partir desse clima de ondas transferido para a praia é que se pode fazer a reconstrução do transporte de sedimento longitudinal anual nos perfis.

Transporte de sedimentos SMC-Brasil

Neste estudo foi aplicado o submódulo de Pós-processo – Transporte/Fluxos médios, do módulo IH-DYNAMICS, inserido no SMC-Tools que é uma das ferramentas principais do SMC, onde foi possível obter o transporte litorâneo de sedimentos e as condições de onda de um perfil obtido a partir da propagação de casos sobre uma malha de discretização da área de estudo. Para a extração de dados de transporte de sedimentos, foram traçados seis perfis praiais perpendiculares à linha de costa numerados de sul para norte (Figura 5.9). Essa análise de transporte é feita de forma qualitativa e quantitativa, utilizando como dados de entrada o tamanho médio do sedimento, D₅₀ (mm), o peso específico do sedimento, Rho-s (kg/m³), a porosidade do sedimento (n.) e a declividade do perfil. O tamanho do sedimento utilizado para cada perfil foi a fração areia fina (0,125 mm) e a declividade média é de 9° de acordo com dados encontrados por Oliveira (2013) e Xavier (2007).

Para cada um dos perfis estabelecidos, foi necessário determinar as características das ondas na zona de arrebentação, assim como as correntes para os casos representativos selecionados através da metodologia MaxDiss. Assim, a base de dados em águas intermediárias é transferida pelo modelo OLUCA para cada perfil no ponto de arrebentação da onda, e a base de dados de 60 anos é reconstruída em águas rasas utilizando a técnica de interpolação *Radial Basis Functions* (RBF) (FRANKE, 1982). Uma vez determinadas as características no ponto de arrebentação, para o período entre 1948 e 2008, foram então calculadas as taxas de transporte potencial longitudinal hora a hora com a formulação de Bayram, Larson e Hanson (2007). O transporte de sedimento nos perfis é representado por setas desenhadas sobre a imagem de satélite que indicam o valor do transporte anual para sul ou para norte.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Clima de ondas

Para descrição do clima de ondas da região, foram selecionados três pontos DOW através do módulo IH-AMEVA. O clima marítimo da região foi caracterizado através da análise desses pontos em águas intermediárias (profundidades entre 13 e 20 m).

Essa descrição teve o intuito de avaliar as possíveis influências dos *beachrocks* sobre os espectros de ondas (Figura 5.4).

O ponto 1 possui localização mais próxima à foz do Rio Goiana, não sendo identificado um padrão diferencial em virtude da influência fluvial causada pela diferença na batimetria que o rio pode gerar.

Figura 5.4 – Localização dos pontos DOW avaliados em águas intermediárias



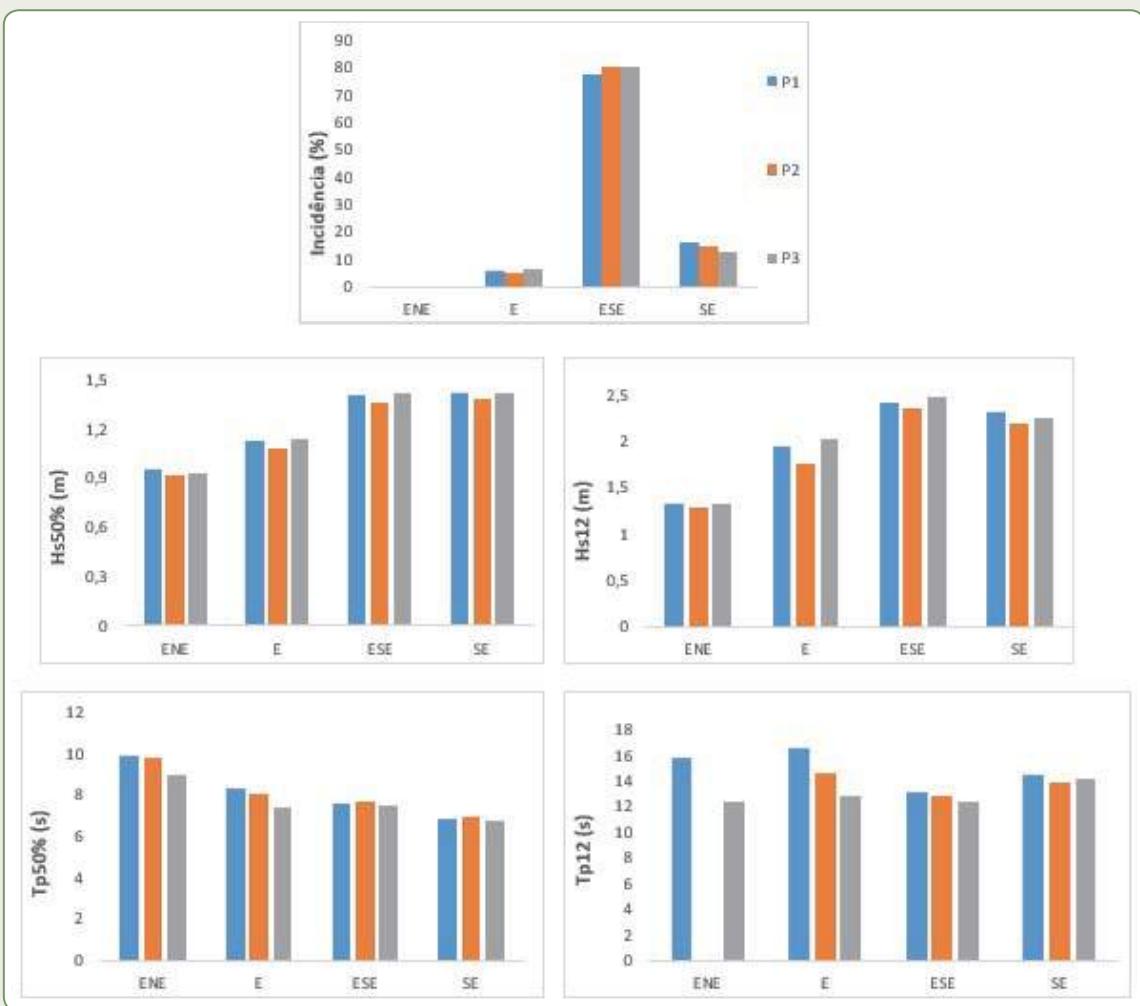
Fonte: Dos autores (2018).

Utilizando dados da estatística descritiva do IH-AMEVA, foi realizada uma análise comparativa dos valores dos parâmetros de ondas espectral dos três pontos DOW (P1 a P3) avaliados para caracterizar o clima de ondas do litoral estudado. Pode-se observar no gráfico de incidência que predominam ondulações provenientes das direções leste-sudeste (ESE), com 81% de ocorrência nos três pontos, e ondas de sudeste (SE) com aproximadamente 18%. As ondas provenientes da direção leste (E) e leste/nordeste (ENE) são menos frequentes, com menos de 10% do total de ondas incidentes. Nos gráficos de condições medianas, a altura significativa de onda ($H_{S50\%}$) e o período de pico ($T_{P50\%}$) variam entre 0,9 e 1,4 m e entre 7 e 10 s respectivamente (Figura 5.5).

Para as condições de tempestade (H_{S12} e T_{P12}), que se referem a estados de mar de maior energia com valores em média superados somente 12 horas ao ano, os valores variam entre 1,4 e 2,5 m para altura de onda e entre 12 e 16 s para período de pico.

A análise comparativa dos gráficos dos dados estatísticos demonstra que os três pontos DOW apresentam valores de certa forma semelhantes. Assim, para a escolha dos pontos mais representativos, levou-se em consideração a posição geográfica mais central ao trecho analisado.

Figura 5.5 – Comparação dos parâmetros de onda espectral dos três pontos DOW, para condições medianas ($H_{S50\%}$ e $T_{P50\%}$) e condições de tempestade (H_{S12} e T_{P12})



Fonte: Dos autores (2018).

Foi selecionado dessa forma o ponto DOW P2 para caracterização do clima de ondas na região. No quadro 5.1 estão representados os parâmetros de altura de onda e período de pico e suas respectivas probabilidades de ocorrência por direções. Para as condições medianas ($H_{S50\%}$ e $T_{P50\%}$), a altura de onda varia entre 0,91 e 1,38 m, e no período de pico ocorre variação entre 6,9 e 9,7 s. Para condições de tempestade (H_{S12} e H_{S12}), as ondas alcançam entre 1,31 e 2,57 m, e os períodos de pico variam entre 9,9 e 14,5 s.

Quadro 5.1 – Probabilidade de ocorrência de cada direção de ondas, com respectivas alturas de ondas e período de pico, para o ponto DOW P2 calculado no módulo IH-AMEVA

Direção	Probabilidade (%)	$H_{S50\%}$ (m)	$T_{P50\%}$ (s)	H_{S12} (m)	H_{S12} (s)
ENE	0,05	0,91	9,76	1,31	9,9
E	5,23	1,08	8,02	2,01	12,8
ESE	80,1	1,36	7,66	2,57	12,4
SE	14,5	1,38	6,90	2,23	14,5

Fonte: Dos autores (2018).

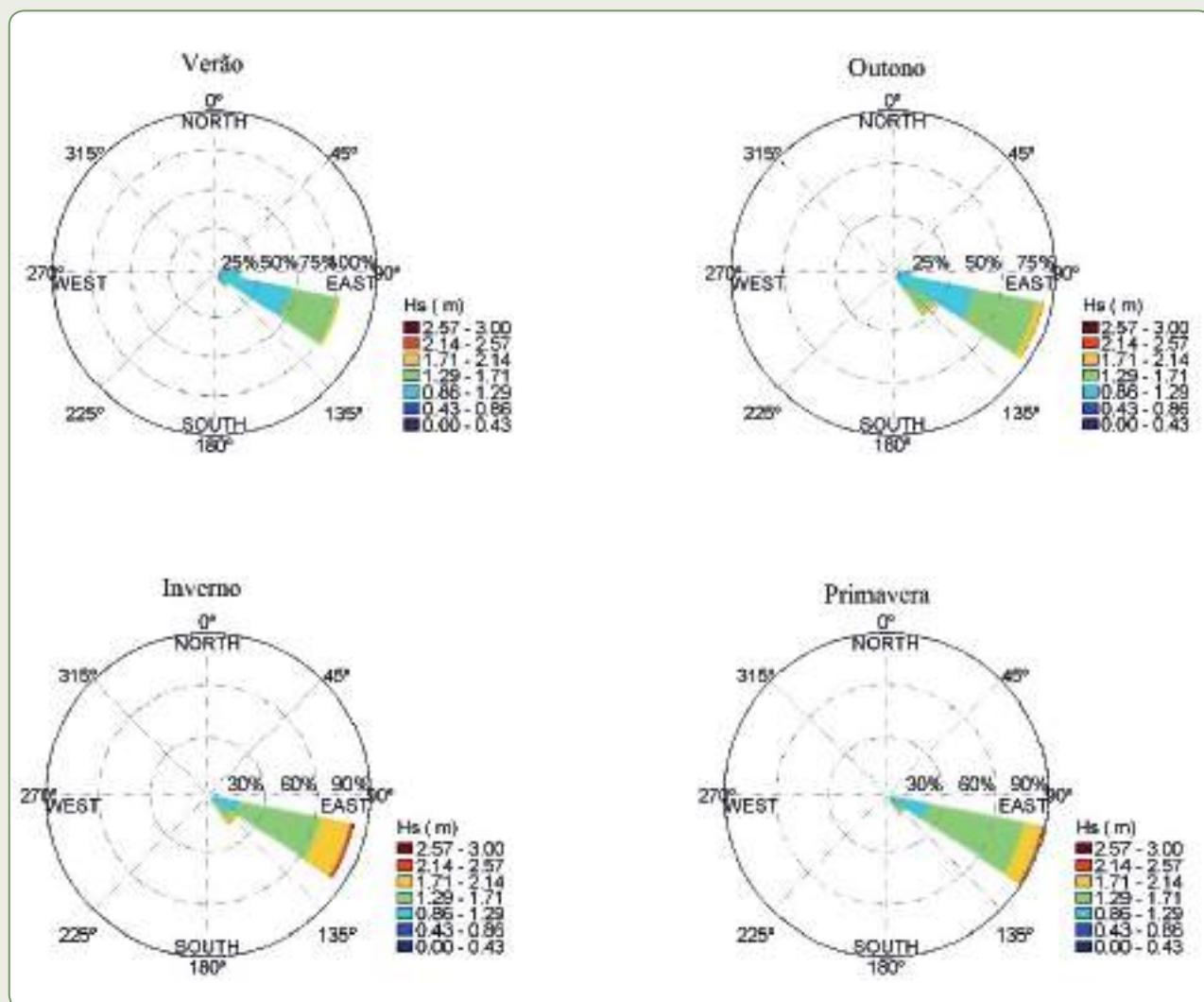
As direções de ondas de maior ocorrência para a área de estudo correspondem a ondas provenientes da direção leste-sudeste (ESE) e sudeste (SE), com 80,1 e 14,5% da probabilidade de ocorrência, respectivamente, que juntas totalizam 94,6% de representatividade das ondas incidentes.

As rosetas direcionais de ondas demonstram graficamente a dominância de ondas ESE ao longo das estações do ano: verão (dezembro, janeiro e fevereiro); outono (março, abril e maio); inverno (junho, julho e agosto); e primavera (setembro, outubro e novembro) (Figura 5.6).

Pode-se verificar que há uma maior incidência de ondas de sudeste no outono, com a ocorrência de ondas maiores que 1,71 m principalmente no inverno. Com o propósito de estabelecer a relação entre a altura significativa de onda (H_s), o período de pico (T_p) e a direção das ondas, estabelece-se a distribuição conjunta H_s - T_p e H_s -Dir.

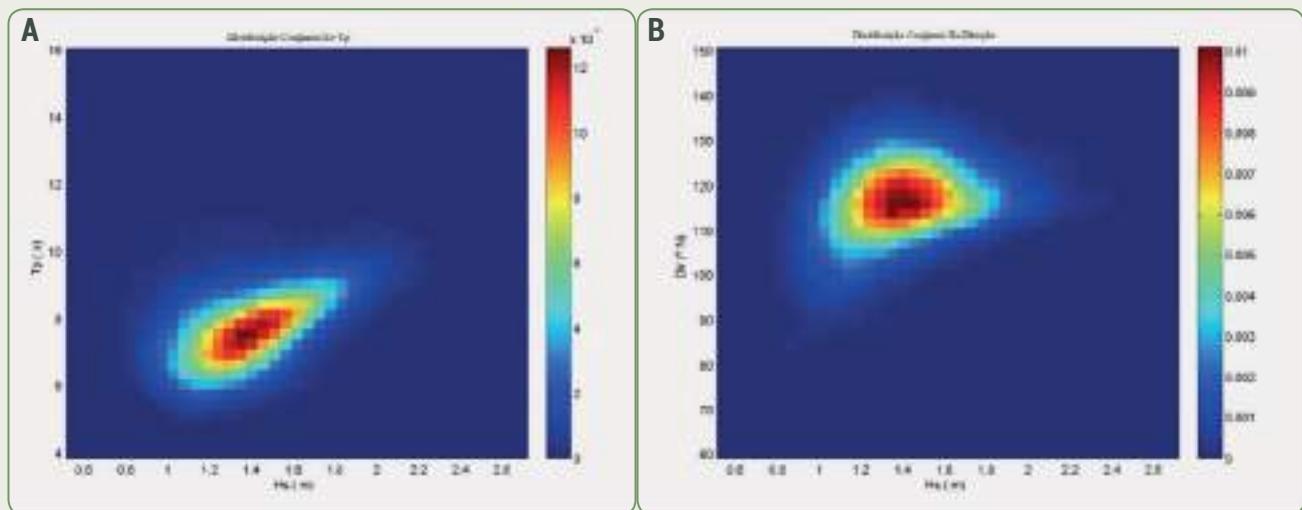
Essas distribuições indicam que as ondas mais frequentes possuem alturas entre 1,4 e 1,6 m, com período de pico em torno de 6 e 8 s, e direção de ondas provenientes de 115° (Figura 5.7).

Figura 5.6 – Rosetas de direções de ondas para cada estação do ano



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 5.7 – Distribuições conjuntas entre H_s - T_p (A) e H_s -Dir (B) no ponto DOW avaliado



Fonte: Dos autores (2018).

Em uma comparação de dados obtidos do SMC e de dados citados na descrição da área de estudo obtidas do MMA (BRASIL, 2006), pôde-se verificar que para a altura significativa de onda, apesar da variação sazonal dos valores, os dados do MMA de certa forma demonstram-se semelhantes aos dados do SMC. A média dos períodos de pico do SMC foi um pouco maior que a média dos dados do MMA (BRASIL, 2006) (Quadro 5.2).

Quadro 5.2 – Comparação de dados de altura, período e direção de onda

Dados	Direção	H_s (m)	T_p (s)
Brasil (2006)	ESE	1,0 a 1,5	5 a 7
SMC-Brasil	ESE/SE	1,4	7,5

Fonte: Dos autores (2018).

Ondas, correntes e transporte de sedimentos

Os resultados obtidos na propagação e simulação de ondas são demonstrados em mapas de vetores e magnitude. As ondulações de ESE são as mais frequentes para a região, representando 80% dos casos de estado de mar. As ondas quebram na borda externa dos *beachrocks* e chegam com menor energia na praia, principalmente nas marés baixa e média. Essas estruturas limitam a passagem das maiores ondulações, exceto nas descontinuidades dessas estruturas.

Na maré baixa as alturas de onda que chegam até as praias variam entre 0,1 e 0,8 m. Ocorre a entrada de trens de ondas de maior intensidade na abertura dos *beachrocks* mais ao sul e, devido ao processo de difração e refração, pode-se observar que as ondas apresentam certa obliquidade em direção ao norte nessa zona. É possível visualizar que nesse nível de maré as ondas chegam praticamente perpendiculares à linha de costa nesse setor (Figura 5.8a).

Na maré média ocorre um comportamento semelhante identificado na baixamar, mas os trens de ondas que ultrapassam a linha dos *beachrocks* possuem maior energia, com altura de onda variando entre 0,3 e 1,65 m (Figura 5.8b). A entrada de ondulações mais intensas na porção mais ao sul pode ter ocasionado a erosão da linha de costa. Esse processo erosivo acarretou a implantação de espigões feitos de troncos de coqueiro, com o intuito de barrar a corrente de deriva litorânea. Essas praias, atualmente, em uma análise visual por imagem de satélite e observações em campo, parecem ter encontrado o estado de equilíbrio frente às características dinâmicas da região, sem indícios de processo erosivo significativo. Na preamar, aumenta a obliquidade dos vetores com altura de onda variando entre 1,2 e 1,8 m próximo à linha de costa (Figura 5.8c).

A variação da profundidade na região, causada pela variação da maré, gera diferentes padrões na propagação das ondas sobre os *beachrocks*. Na maré baixa as ondas rompem sobre estes e causam grande perda de energia e/ou refração, fazendo com que os trens de onda cheguem mais paralelos à linha de costa das praias estudadas. No caso da preamar a influência dos *beachrocks* é menor, não causando tanta mudança na direção das ondas, que chegam com uma obliquidade em relação à linha de costa.

A propagação de ondulações procedentes de ESE gera um sistema de correntes mais intenso na baixamar, devido à maior arrebentação. As ondas, ao quebrarem sobre os *beachrocks*, geram sobre eles correntes com magnitudes fortes, perdendo velocidade e intensidade à medida que se aproximam da praia.

Na maré baixa, são geradas correntes com velocidades que variam entre 0,06 e 0,18 m.s⁻¹ próximas à praia. Na porção mais ao sul, em função da abertura dos *beachrocks* e da presença deles próximo à linha de costa, ocorreu a intensificação dessa corrente. Os vetores de direção das correntes indicam sentido predominante perpendicular à linha dos *beachrocks* na plataforma continental adjacente, e já próximo às praias observa-se também uma leve inclinação da corrente para norte devido à obliquidade com que as ondas atingem a costa (Figura 5.8d).

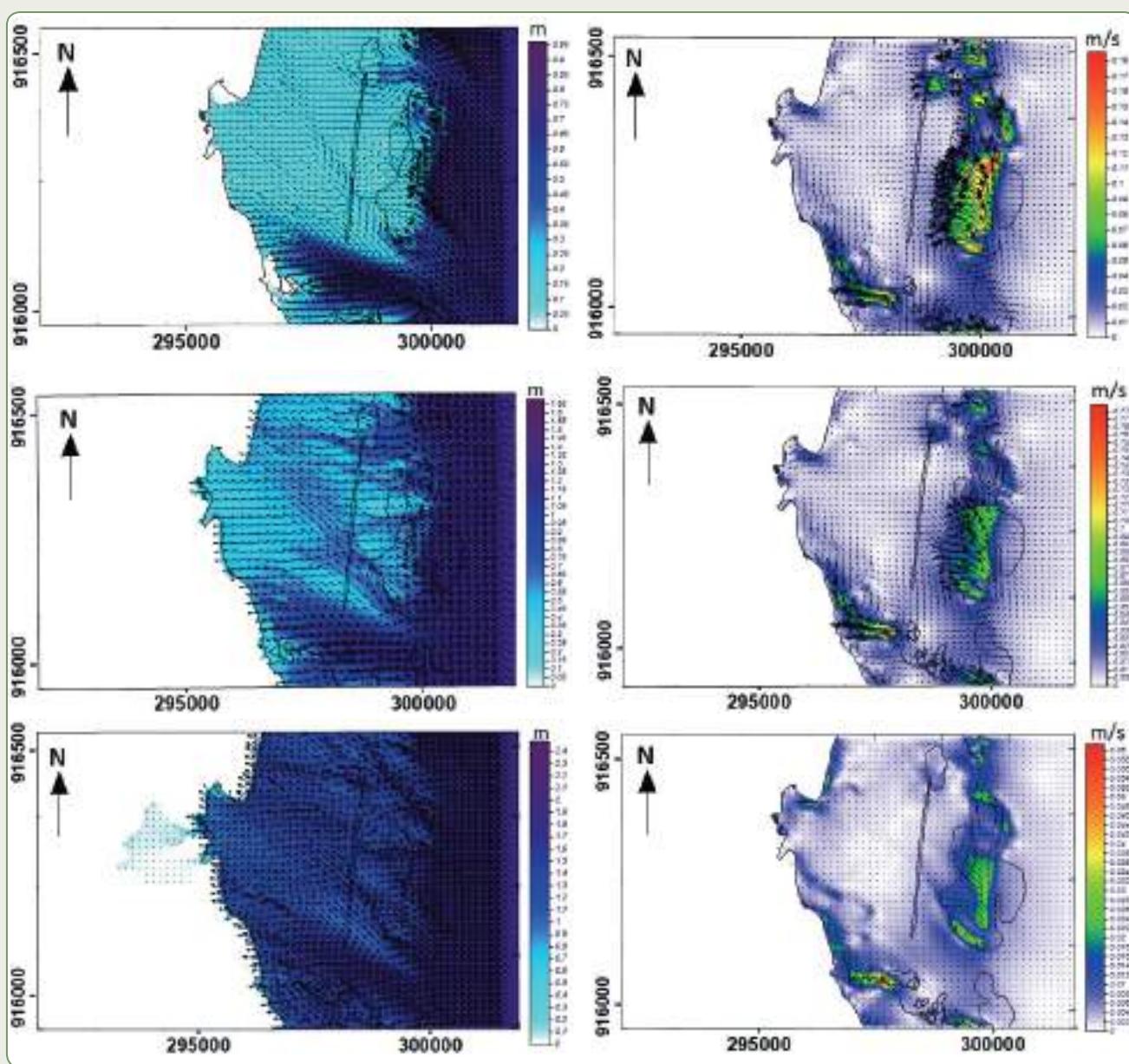
Na maré média, as ondas sentem menos a interferência do fundo devido à maior profundidade, passam pelos *beachrocks* e geram correntes mais intensas sobre eles com velocidades entre 0,07 e 0,09 m.s⁻¹ (Figura 5.8e). Ao encontrar essa estrutura natural mais próxima à linha de costa na porção sul desse setor, as ondas geram correntes mais intensas próximo à praia com direção da corrente para norte, ocorrendo um giro em sentido horário dos vetores também para norte. Essa reversão de sentido está relacionada às variações no ângulo de incidência das ondas, que podem determinar o sentido da corrente de deriva litorânea e consequentemente o transporte sedimentar longitudinal. Essas variações são controladas pelas direções ou alinhamentos que as áreas costeiras assumem, em função das suas características geológicas e geomorfológicas (MANSO, 2003).

Na preamar todo esse processo é menos intenso, com a diminuição da velocidade de correntes entre 0,014 e 0,032 m.s⁻¹ (Figura 5.8f).

Os resultados também apontam que em alguns casos há a presença de potenciais correntes de retorno (representadas por círculos vermelhos nas Figuras 5.8d e 5.8e), o que também pode estar relacionado à presença dos recifes na plataforma interna e próximo às praias.

Em Pernambuco, os estudos sobre o transporte de sedimentos longitudinal e/ou transversal são escassos e pontuais. Destacam-se alguns trabalhos, como estudos realizados em Suape (CONSULPLAN, 1992), que mostraram existir uma tendência sazonal, com sentido N-S durante o verão e S-N no inverno. De acordo com Bragard (apud BORBA, 1999), os dados obtidos na Praia da Boa Viagem mostraram uma capacidade de transporte sedimentar em torno de 70.000 m³/ano, no sentido S-N, e 15.000 m³/ano de N-S.

Figura 5.8 – Simulações para as ondas de ESE exemplificando o resultado das modelagens usando os modelos OLUCA e COPLA para o regime de ondas típico na região



Legenda: Baixamar (a, d), nível médio (b, e), preamar (c, f). $H_s: 1,39\text{ m}$ e $T_p: 7,8\text{ s}$. Os círculos vermelhos demonstram o giro em sentido anti-horário dos vetores

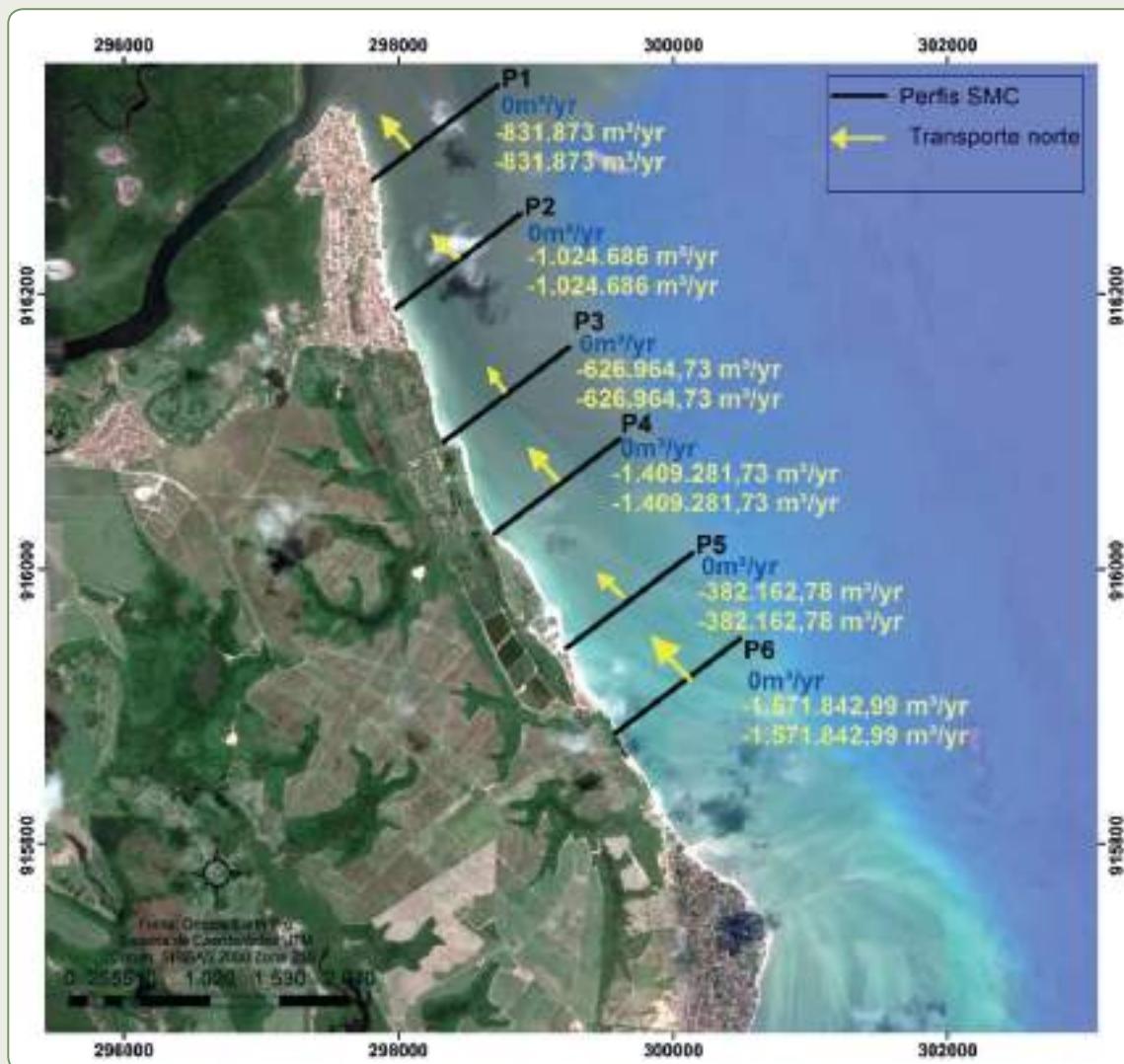
Fonte: Dos autores (2018).

Rollnic (2008), analisando o padrão de circulação e transporte de material nas praias de Boa Viagem e Candeias, concluiu que o transporte líquido é maior próximo à costa e na camada superficial, condicionado pelas flutuações sazonais das descargas do Rio Jaboatão. Macêdo et al. (2012) buscaram caracterizar o transporte de sedimentos através da análise sedimentar, morfológica e da variação da linha de costa em curto prazo da Praia de Maracaipe. As larguras da faixa de praia indicaram que há uma predominância de transporte e deposição de sul para norte ao longo do ano.

O transporte litorâneo modelado no presente estudo demonstra que há um padrão de transporte exclusivamente com sentido sul-norte em todos os perfis (Figura 5.9). O transporte longitudinal anual

médio é calculado de acordo com o clima das ondas ao longo dos 60 anos de dados reconstruídos da base de dados de águas intermediárias até a linha de costa. Nessa base o modelo gera o transporte potencial de sedimentos, causado pela arrebentação das ondas oblíqua em relação à praia. Essa simulação leva em conta uma série de estados de mar significativos, para os três níveis de maré.

Figura 5.9 – Transporte anual médio líquido de sedimentos entre os perfis utilizando a fórmula de Bayram Larson e Hanson (2007)



Legenda: Transporte para sul em azul. Transporte para norte em amarelo. Valor do transporte líquido em amarelo. As setas indicam a direção e a intensidade do transporte anual médio para cada perfil de praia traçado (linhas pretas perpendiculares à linha de costa)

Fonte: Dos autores (2018).

A tendência de transporte de sul para norte pode ser verificada através da presença dos espiões na Praia de Carne de Vaca, que atuam como indicadores geomorfológicos, indicando a direção predominante da deriva litorânea. Os espiões são estruturas artificiais que atuam como barreiras físicas e interrompem o transporte de areia provocando erosão e acumulação nas praias adjacentes (Figura 5.10). De acordo com Taggart e Schwartz (1988), elementos de variação geomorfológica e sedimentológica são indicadores para interpretar e determinar a direção prevalecente na deriva litorânea de uma região costeira.

Figura 5.10 – Indicador geomórfico do sentido preferencial do transporte de sedimentos na Praia de Carne de Vaca



Fonte: Google Earth® Pro (fev. 2014).

Em estudo realizado por Oliveira (2017), foi verificado que a largura e o volume sedimentar das praias acompanharam essa tendência, com um aumento progressivo do aporte de sedimentos das praias mais ao norte do município de Goiana. Dessa forma, o transporte longitudinal seguiu um padrão parecido ao da dinâmica das correntes apresentando deriva líquida para norte.

CONCLUSÃO

Neste trabalho aplicou-se o SMC-Brasil para compreender o comportamento do clima de ondas, do sistema de correntes e do transporte sedimentar no litoral de Goiana. Os resultados foram satisfatórios, pois o *software* é uma ferramenta simples e de baixo custo, não apresentando grandes dificuldades de utilização, podendo facilmente se tornar um aliado na gestão costeira.

Devido à escassez desse tipo de estudo no litoral norte de Pernambuco, com medições dos parâmetros de ondas/correntes e conhecimentos a respeito do balanço sedimentar, este trabalho

pretendeu contribuir para uma maior compreensão dos processos atuantes na região, especialmente no litoral de Goiana.

Os processos de refração/difração sofridos pelas ondas são causados pela presença de bancos arenosos e *beachrocks* próximos às praias e na plataforma continental interna. Esses fatores influenciam consideravelmente a configuração da linha de costa da área de estudo. Os *beachrocks* formam uma zona de sombra atenuando a energia das ondas e possivelmente favorecendo uma tendência de deposição e erosão em alguns trechos da costa.

As modelagens apresentam um padrão de transporte preferencial para norte, que pode ser corroborado pelas condições descritas na caracterização da área de estudo, pelo sistema de correntes e pela presença de indicadores geomorfológicos presentes no litoral.

Porém, tornam-se necessários ainda estudos mais aprofundados e medições em campo que validem a tendência identificada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

BAYRAM, A.; LARSON, M.; HANSON, H. A new formula for the total longshore sediment transport rate. *Coastal Engineering*, v. 54, p. 700-710, 2007.

BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M. L.; MARTIN, L.; SILVA, I. R. Longshore transport on the northeastern Brazilian coast and implications to the location of large-scale accumulative and erosive zones: an overview. *Marine Geology*, v. 219, p. 219-234, 2005.

BORBA, A. L. S. **Estudos sedimentológicos, morfodinâmicos e da vulnerabilidade das praias da Piedade, Candeias e Barra das Jangadas**: Município do Jaboatão dos Guararapes-PE. 1999.130 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1999.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. 476 p. Brasília. ISBN 85-7738-028-9. 2006. Disponível em: <http://mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_publicacao/78_publicacao12122008084856.pdf> Acesso em: 24 jun. 2015.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Projeto Grammar Brasil. **Avaliação do potencial mineral dos granulados marinhos do litoral do Brasil – PE/CE**, 2008. Relatório técnico. 15 p. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/geo/pgb/inicio/Geol%20Geof%20Marinha.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2015.

CONDEPE-FIDEM. **Bacia hidrográfica do Rio Goiana e sexto grupo de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos – gl6**. Governo do Estado de Pernambuco. Secretaria de Planejamento – SEPLAN, 2010. (Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco, n. 2). 66 p.

CONSULPLAN. **Complexo industrial portuário de Suape**: análise das ondas de Suape medidas pelo INPH no período de 1980 a 1983. 1992. Relatório Técnico.

COSTA, M. B. S. F.; PONTES, P. M.; ARAÚJO, T. C. M. Monitoramento da linha de preamar das praias de Olinda – PE (Brasil) como ferramenta à gestão costeira. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, v. 5, n. 3, p. 101-112, 2008. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/pdf/RGCI-145_Borba.pdf>. Acesso em: ago. 2015.

D'AQUINO, C. A. **Calibração e aplicação do modelo Genesis nas praias de Tramandaí e Imbé-RS**. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

FRANKE, R. Scattered data interpolation: test of some methods. *Math. Comp.*, v. 38, p. 181-200, 1982.

GOMES, G.; SILVA, A. C. Coastal erosion case at Candeias Beach (NE-Brazil). *Journal of Coastal Research*, Special Issue, v. 71, p. 30-40, 2014.

GOMES, A. G. J. **Aprimoramento do clima de ondas do SMC como subsídio ao estudo da erosão costeira no litoral de Pernambuco.** 2015. 149 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

HAYES, M. O. Barriers island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S. P. (Ed.). **Barrier Islands: from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico.** New York: Academia Press, 1979.

KAY, R.; ALDER, J. **Coastal planning and management.** London: Ed. E. & Fn Spon (Routledge), 1999. 375 p.

KENNARD, R. W.; STONE, L. A. Computer aided design experiments. **Technometrics**, v. 11, p. 137-148, 1969.

MACÊDO, R. J. A. **Caracterização morfodinâmica e geoambiental da Praia de Maracaípe, Ipojuca – PE.** 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MACÊDO, R. J. A. **Saliências, tâmbolos e enseadas das praias arenosas de Pernambuco:** limites de formação e estabilidade. 2015. 163 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

MACÊDO, R. J. A.; MANSO, V. A. V.; PEREIRA, N. S.; FRANÇA, L. G. Transporte de sedimentos e variação da linha de costa em curto prazo na Praia de Maracaípe (PE), Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 12, n. 3, p. 343-355, 2012.

MADRUGA FILHO, J. D. **Aspectos geoambientais entre as praias do Paiva e Gaibú, Município do Cabo de Santo Agostinho (Litoral sul de Pernambuco).** 272 f. 2004. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

MADRUGA, M. M. D. **Definição dos pontos de contorno da linha de preamar máxima atual do litoral do município de Goiana-PE e suas implicações ambientais.** 2016. 109 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

MALLMANN, D. L. B.; PEREIRA, P. S. Coastal erosion at Maria Farinha Beach, Pernambuco, Brazil: possible causes and alternatives for shoreline protection. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, v. 71, p. 24-29, 2014.

MANSO, V. A. V. **Definição dos pontos de contorno da linha de preamar máxima atual do litoral do município de Ipojuca – PE.** 2003. 36 f. Relatório final, MMA/PNMA II – SECTMA Nº 249.

OLIVEIRA, P. F. P. **Caracterização sedimentológica e aspectos geoambientais das praias do litoral norte de Pernambuco.** 123 f. 2013. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Não publicado.

OLIVEIRA, P. F. P. **Simulação de dados hidrodinâmicos no litoral de Goiana-PE:** aplicação do Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) para definição da dinâmica costeira. 2017. 171 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

ROLLNIC, M. **Dinâmica das ondas e circulação no litoral da região metropolitana do Recife:** implicações para o transporte de sedimentos e estabilidade da costa. 2008. 124 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ROSMAN, P. C. C. **Modelagem computacional da hidrodinâmica e da intrusão salina no Canal de São Francisco, Baía de Sepetiba-RJ, para avaliação de disponibilidade hídrica.** Relatório Final Projeto COPPETEC: PEnO-6963, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006. 65 p.

SMC-BRASIL. **Sistema de modelagem costeira do Brasil.** Santander, Espanha: Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, 2014a. 160 p. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

SMC-BRASIL. **Documento temático:** ondas. Santander, Espanha: Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, 2014b. 239 p. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

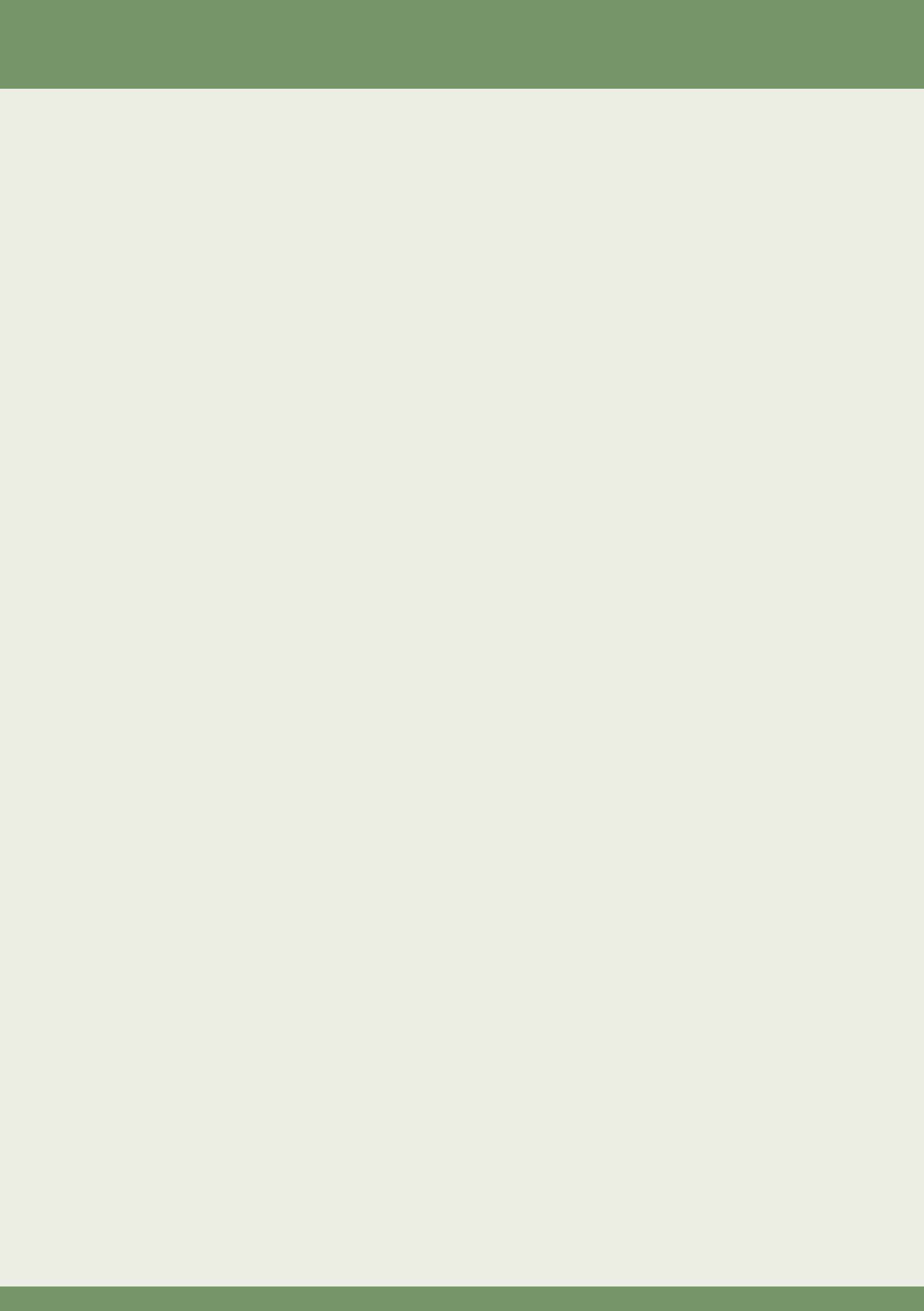
SMC-BRASIL. Manual de referência modelo de propagação de onda monocromática (OLUCA MC).

Santander, Espanha: Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, 2014c. 239 p. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

SMC-BRASIL. Manual de referência modelo de correntes de quebra em praias (COPLA MC/SP). Santander, Espanha: Instituto de Hidráulica Ambiental, Universidad de Cantabria, 2014d. 79 p. Disponível em: <<http://smcbrasil.ihcantabria.com/descargas/>>. Acesso em: 4 mar. 2015.

TAGGART, B. E.; SCHWARTZ, M. L. Net shore-drift direction determination: a systematic approach. **Journal of Shoreline Management**, Washington, v. 3, p. 285-309, 1988.

XAVIER, M. W. **Caracterização geomorfológica sedimentológica e aspectos ambientais do litoral de Goiana, Pernambuco.** Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. 87 p.



MODELAGEM NUMÉRICA DA DINÂMICA COSTEIRA NO LITORAL DE PAULISTA (PE)

Alex Costa da Silva

Gabriel Gomes

Davis Pereira de Paula

RESUMO

O presente estudo foi realizado no litoral da cidade de Paulista, em Pernambuco, visando obter um diagnóstico sobre a dinâmica de ondas, correntes e sedimentos numa área bastante impactada pela ação da erosão costeira. Neste estudo, foi utilizado um sistema de modelagem costeira (denominado Sistema de Modelagem Costeira (SMC)). Um estudo do clima de ondas foi utilizado para obter os dados de entrada dos modelos, a fim de efetuar a simulação da dinâmica costeira da região. Na simulação numérica foram selecionados os casos de ondas mais representativos a serem propagados. Foram selecionados/simulados 146 casos, propagados nas condições de maré alta (2,60 m), meia-maré (1,30 m) e maré baixa (0,0 m), totalizando 438 casos. Após as propagações das ondas, foram desenhados nove perfis de praia para analisar uma zona de interesse centrada na área de estudo, para que fossem calculados os fluxos médios de energia e transportes de sedimentos em cada perfil de praia. As ondas que se propagam até a costa sofrem processos de difração e refração associados à morfologia de fundo e principalmente associados à barreira de recifes ao longo da costa, que fazem com que as ondas que chegam à praia apresentem uma variabilidade espacial muito marcada. Resultados das simulações numéricas da dinâmica costeira da região levaram à conclusão de que a área de interesse não está em equilíbrio. Com isso se supõe que, se não houver nenhuma providência, a erosão irá continuar ao longo dos próximos anos, com menor ou maior intensidade, de acordo com o clima de ondas vigente a cada ano.

Palavras-chave: Praia de Paulista. Quebra-mar. Erosão costeira.

INTRODUÇÃO

A morfologia de uma praia, em um dado momento é uma função das características do sedimento, das condições das ondas, bem como do estado anterior da praia. Entretanto, a longo prazo, a praia tende a mostrar um estado modal, ou de equilíbrio. Praias naturais mostram irregularidades, tanto em perfil como em planta, em todas as escalas de espaço e de tempo. Essas irregularidades estão associadas com a migração das barras nos diferentes estados da praia, em equilíbrio contínuo entre as forças de construção e de erosão das ondas e das correntes (VIDAL; LOSADA; MEDINA, 1995).

O litoral de Pernambuco é um dos menos extensos no Brasil, compreendendo uma faixa territorial de pouco mais de 180 km, porém abriga mais de 40% da população do estado, ou seja, mais de 3,5 milhões de habitantes. Em termos de compartimentação geográfica, esse litoral pode ser dividido em norte, sul e região metropolitana (ARAÚJO et al., 2007). É nesse último compartimento que está localizado o município de Paulista (mais de 300 mil habitantes), uma das porções territoriais mais atingidas pela erosão costeira no litoral pernambucano. Manso et al. (2006) destacam que a frente marinha urbana de Paulista é uma das mais artificializadas por obras rígidas de proteção costeira no estado, considerando também os municípios de Recife e Olinda.

Para Barbosa et al. (2008) e Oliveira et al. (2013), existe uma confluência de fatores que colaboram para o agravamento da erosão costeira no município de Paulista, sejam elas relacionadas à construção do Porto de Recife, à artificialização da costa por obras rígidas, que alteram o fluxo sedimentar, e às mudanças na configuração das cotas batimétricas na plataforma continental adjacente. Oliveira et al. (2013) calcularam que a linha de costa no trecho da Praia de Janga recuou mais de 100 m nos últimos anos, em decorrência da erosão costeira.

Cabral e Silva (2014) destacam que o problema de erosão costeira no litoral de Paulista não foi corretamente sanado pelas inúmeras obras de proteção que foram edificadas entre as décadas de 1990 e 2000. Dias (1993) destaca que as estruturas rígidas de proteção costeira contribuem para deixar mais estática a linha de costa, que está inserida em um meio com energia ou cargas dinâmicas, o que afeta diretamente o transporte sedimentar local.

Outro problema característico desse trecho costeiro é o forte adensamento urbano da orla, que contribui para a perda de resiliência do sistema ambiental. Oliveira et al. (2013) apontaram no seu estudo que mais de 40% da orla do município de Paulista é classificado como sendo de alta densidade pelo Projeto Monitoramento Ambiental Integrado (MAI). Decerto é que se trata de um trecho costeiro de alta vulnerabilidade a eventos de erosão costeira, em que as inúmeras tentativas de intervenção física (engordamento de praia, enrocamentos, espiões e quebra-mares) não alcançaram seu objetivo. Diante das inúmeras tentativas de mitigação do problema, a Prefeitura Municipal de Paulista deu início, em 2013, à construção de um dissipador de energia do tipo barra-mar (*Bagwall*).

O novo sistema de proteção, como a maioria dos anteriores, é uma estrutura rígida de controle da erosão marinha. Trata-se de uma muralha de concreto erguida sobre a linha de costa, em formato de escadaria e enraizado no continente. A estrutura tem por material básico o concreto simples, que é ensacado em formas geotêxteis para sua modelação em formato de bloco. A estrutura é sustentada por um aterro hidráulico.

Diante do exposto, o presente estudo tem por objetivo avaliar as condições hidrodinâmicas (ondas, marés, correntes e transporte de sedimentos) no litoral de Paulista, mais especificamente na Praia de Pau Amarelo, visando ajudar a identificação de possíveis alterações nos padrões de dinâmica costeira induzidos pela intensa urbanização do local. Nesse intuito foi utilizado o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) para a realização das simulações numéricas.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Paulista é um dos mais populosos do estado de Pernambuco, integrando a região metropolitana de Recife (também denominada de Grande Recife). Possui um alto índice de desenvolvimento humano (acima de 0,700), porém possui um modesto produto interno bruto (2.450 milhões de reais em 2013 (IBGE, 2013)). É um trecho continental que faz limite com os municípios de Igarassu, Abreu e Lima, Paudalho, Camaragibe, Recife e Olinda. Atualmente é um dos principais núcleos de erosão costeira no litoral de Pernambuco (Figura 6.1).

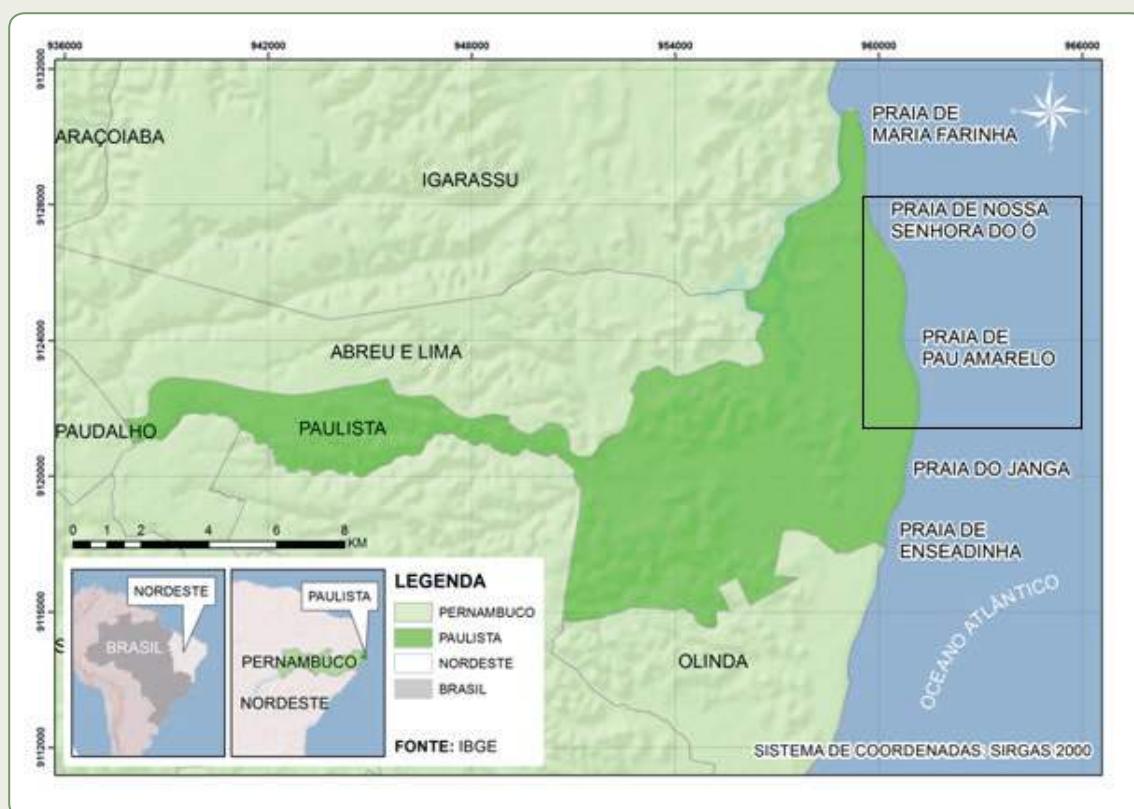
Figura 6.1 – Destrução provocada pela erosão costeira no litoral de Paulista (PE)



Fonte: Disponível em: <www.paulistaem1lugar.com>. Acesso em: set. 2011.

O litoral de Paulista se estende por mais de 14 km (sul-norte), possuindo cinco praias principais: Enseadinho, Janga, Pau Amarelo, Nossa Senhora do Ó e Maria Farinha (Figura 6.2). Todas as praias apresentam problemas com a erosão costeira, fato que rapidamente é observado através das inúmeras estruturas de proteção, que variam das mais simples, como sacos de areia na Praia de Maria Farinha até as mais complexas e tecnológicas, como o *bagwall*, instalado na Praia de Pau Amarelo. Essa última estrutura foi instalada em 2013, para tentar conter o avanço do mar na região e minimizar os prejuízos e danos ao patrimônio edificado à beira-mar de Paulista (Figura 6.3).

Figura 6.2 – Localização da área de estudo, com a representação da grade utilizada na simulação do Sistema de Modelagem Costeira (retângulo)



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 6.3 – Estrutura rígida (*bagwall*) construída ao longo da orla do município de Paulista (PE)



Fonte: Dos autores (2018).

METODOLOGIA

A metodologia foi baseada em simulações da dinâmica de sedimentos, utilizando-se o pacote de software SMC-Brasil. Antes de executar essas simulações, entretanto, foi necessário inicialmente inserir, dentro do ambiente de trabalho do programa, todas as características reais do local, dentre elas a mais importante, que é a batimetria detalhada da região, obtida através dos dados do Projeto MAI.

Nas simulações numéricas foram selecionados 146 casos mais representativos de regimes de ondas a serem propagados, através do método de desigualdade máxima, que assegura que um mínimo de simulações possa ter boa representatividade estatística dentro do escopo de climas de ondas que predominam na região (CAMUS et al., 2013).

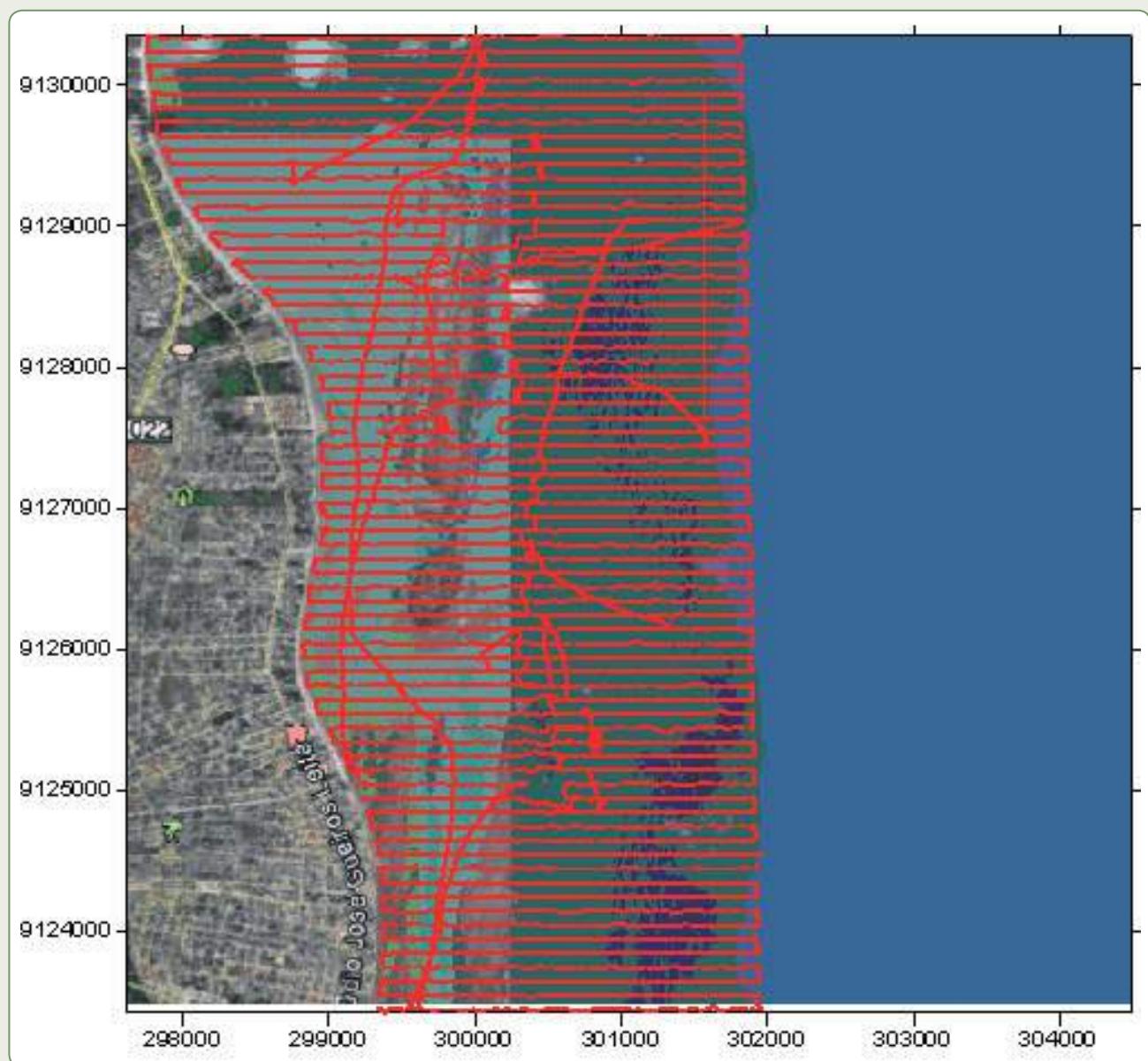
Os principais resultados das simulações numéricas são os transportes médios anuais de sedimentos em seções transversais posicionadas ao longo da área de estudo. Esses dados foram utilizados para obter as conclusões deste artigo.

Levantamento batimétrico

Para a realização do estudo, foi inicialmente levantada uma batimetria detalhada de uma área, em torno de 7 quilômetros de costa, desde a área de linha de costa até aproximadamente 15 m de profundidade mar adentro, que ficou a uma distância mínima de 2.700 m e máxima de 4.100 m da praia (Figura 6.4). Após o levantamento batimétrico, foi possível definir uma grade numérica do modelo para simulação do transporte de sedimentos, altura e magnitude das ondas, bem como as correntes geradas pelas ondas, descritas abaixo. O levantamento batimétrico foi realizado durante o mês de fevereiro de 2014, em área costeira adjacente ao município de Paulista, nas Praias do Janga, Pau Amarelo, Conceição e Maria Farinha, litoral norte do estado de Pernambuco.

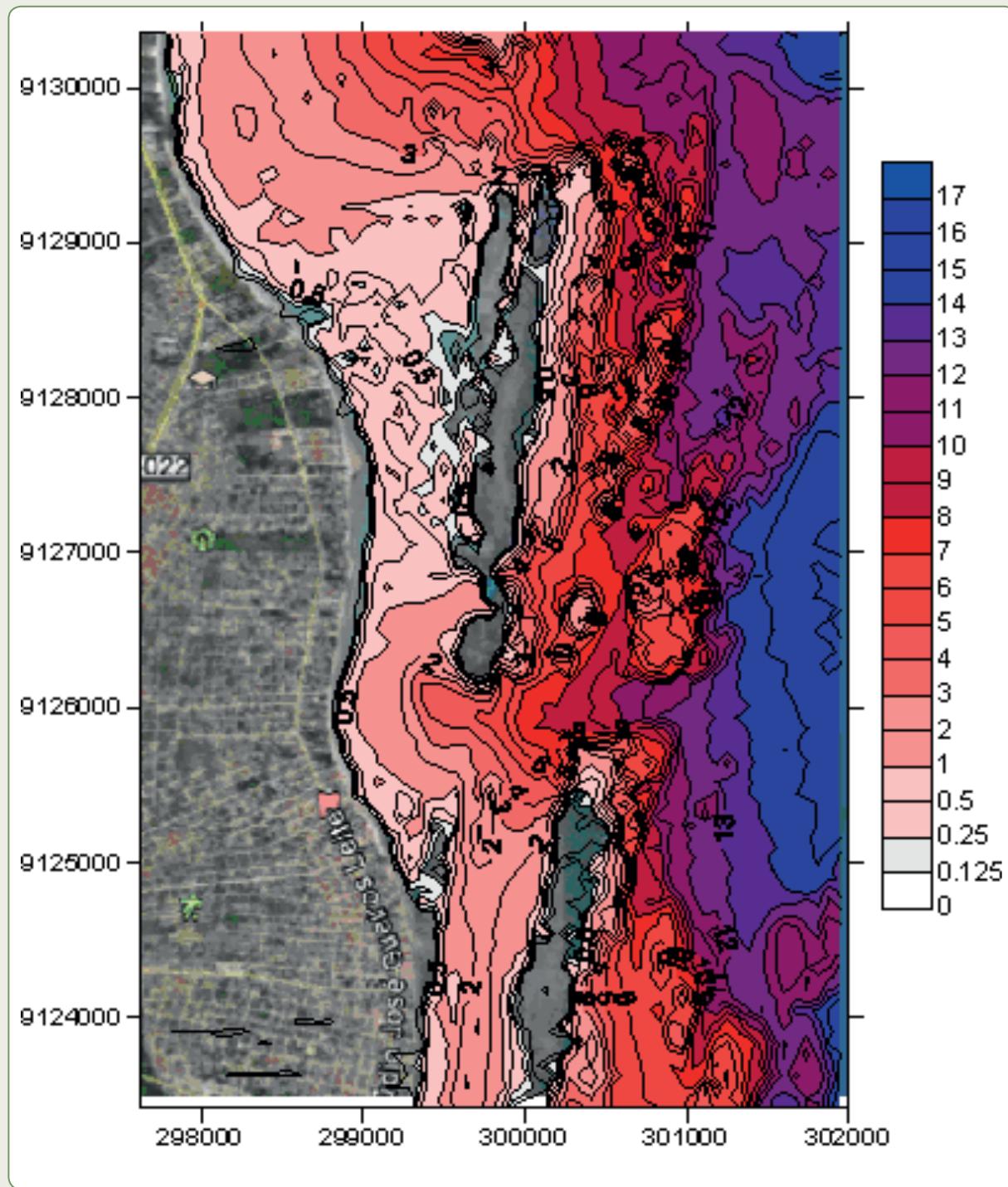
Para os levantamentos batimétricos, foram realizados 70 perfis na direção E-W, seguindo uma malha de linhas perpendiculares à costa, com 100 m de distância entre elas, somando aproximadamente 262 km percorridos (Figuras 6.4 e 6.5). Em complemento aos dados de batimetria em detalhes coletados *in situ*, foram também utilizados os dados batimétricos da carta da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) para complementar a região oceânica mais externa à região costeira levantada. Essas informações foram inseridas no programa SMC, no intuito de simular o ambiente costeiro em estudo de forma confiável, permitindo que as simulações produzissem resultados fiéis à realidade.

Figura 6.4 – Malha batimétrica em detalhe: 70 perfis na direção E-W, com 100 m de intervalo, somando aproximadamente 262 km percorridos



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 6.5 – Carta batimétrica gerada com os dados coletados em fevereiro de 2014 na região de estudo



Fonte: Dos autores (2018).

Simulação numérica – modelagem costeira

A ferramenta de modelagem costeira SMC-Brasil inclui um conjunto de metodologias e modelos numéricos que permitem estudar os processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais ou de atuações humanas na costa.

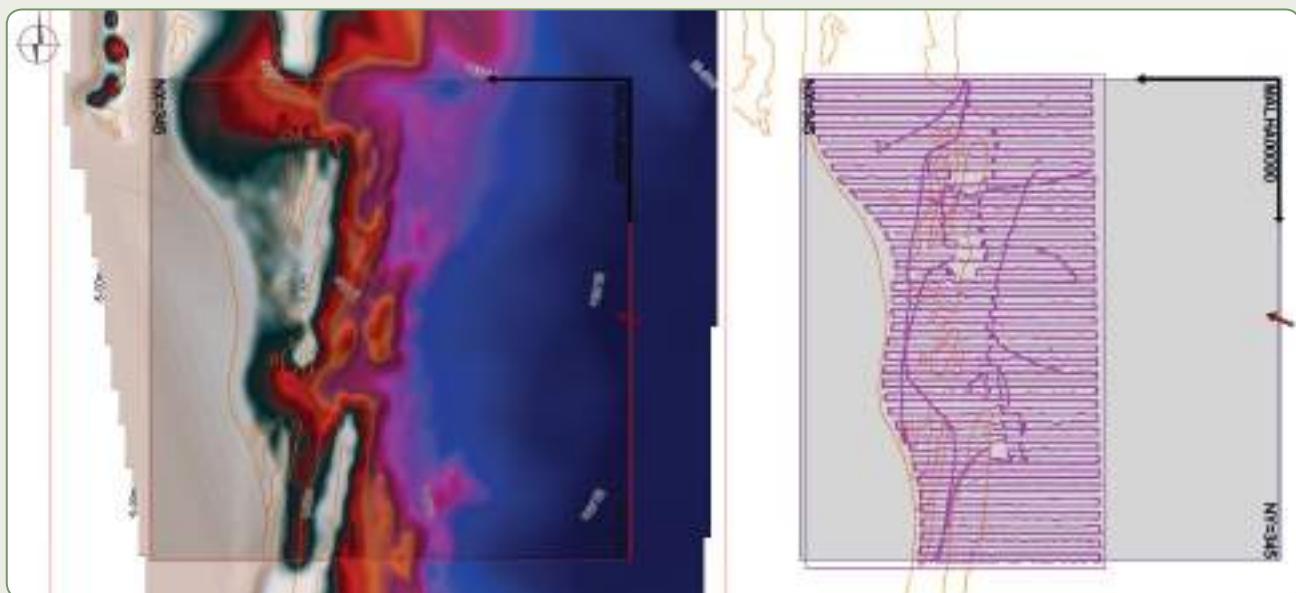
O SMC inclui um módulo numérico de hidrodinâmica, que simula a variação do nível da água e o fluxo em resposta às interações das ondas em águas rasas, e um módulo para a avaliação das taxas de transporte de sedimentos e variação do fundo do mar, como consequência dos fluxos de onda e de corrente combinados.

O modelo numérico utilizado foi o modelo de ondas de águas rasas OLUCA, que consegue simular a refração, a difração e o empinamento de componentes discretas das ondas, através da aproximação parabólica das interações de ondas e das correntes da equação da pendente suave (KIRBY; ÖZKAN, 1984). O módulo COPLA resolve a equação de fluxo médio devido às ondas que quebram como resultado da saída do modelo OLUCA. O COPLA é o modelo bidimensional de correntes de praia deduzidas a partir das equações de Navier-Stokes; ele usa os tensores de radiação previamente calculados pelo OLUCA como entrada (LONGUET-HIGGINS; STEWART, 1964). O Mopla é um módulo do SMC que modela a evolução morfodinâmica das praias em curto prazo, utilizando um conjunto de modelos numéricos que simulam a propagação das ondas, as correntes que são geradas pela arrebentação dessas ondas e, finalmente, o transporte de sedimentos induzido por essas correntes em conjunto com a arrebentação das ondas, possibilitando assim calcular a evolução da batimetria ao longo do tempo. O modelo de transporte de sedimentos utilizou a formulação de CERC (USACE, 1984). Ela relaciona a taxa de transporte de sedimentos ao longo da praia com o ângulo de incidência das ondas na costa.

Grade numérica do modelo

A grade utilizada para o modelo possui $6.880\text{ m} \times 6.880\text{ m}$, com 345 divisões em X e Y, fazendo com que cada linha e coluna da grade possuam 20 m de distância entre si. A malha foi orientada a 180° , e a origem da grade foi localizada na longitude: 304500.00 m e na latitude: 9130350.00 m em UTM (Figura 6.6).

Figura 6.6 – As dimensões e coordenadas da grade usada para as simulações



Fonte: Dos autores (2018).

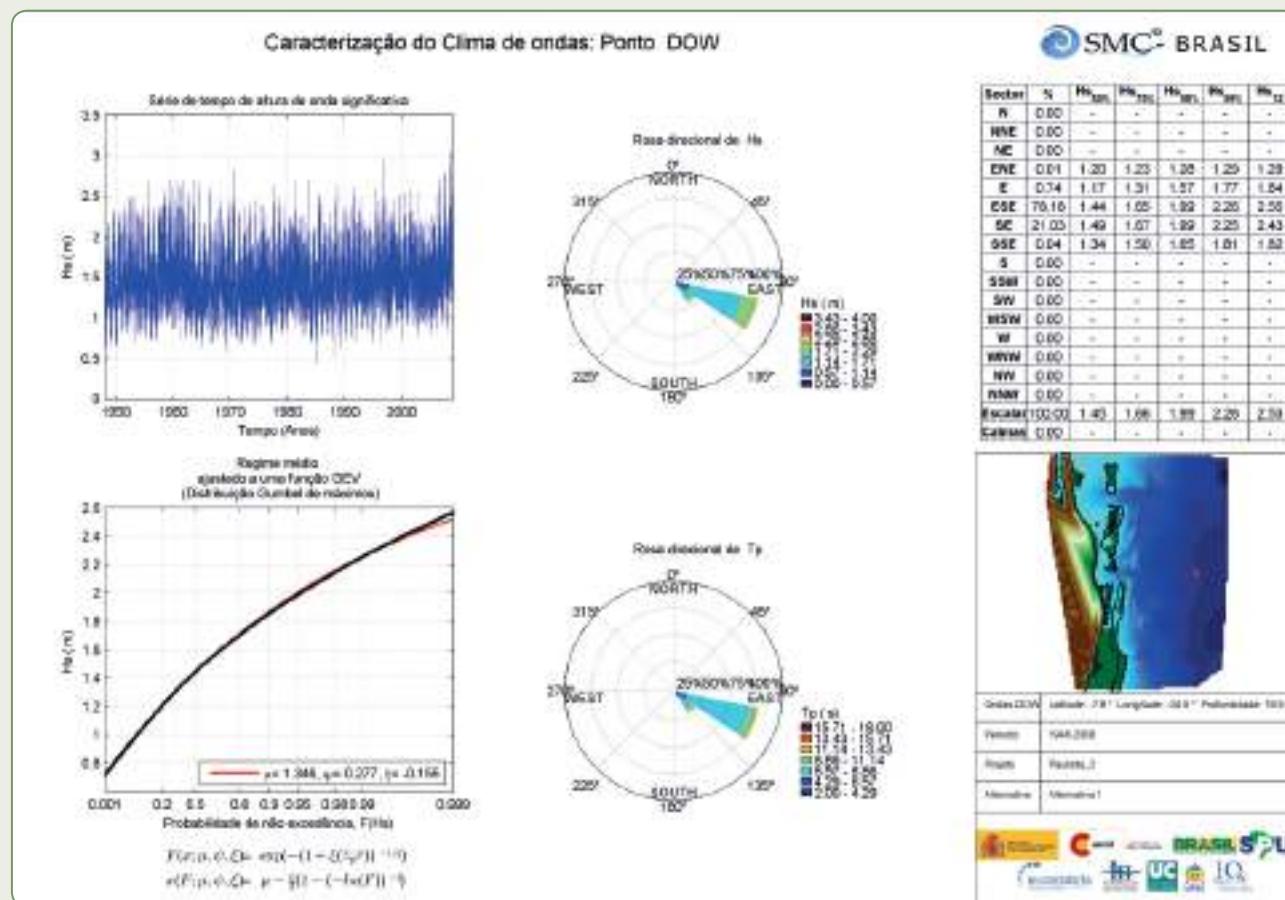
Dados de entrada da simulação

Para forçar o modelo, efetuando a simulação da dinâmica costeira, foi feito um estudo do clima de ondas na região, através do programa SMC-Tools. A grade descrita acima foi então desenhada com base nas características do clima de ondas predominante na região, obtendo-se resultados de simulações compatíveis com essas características (Figura 6.7).

O clima de ondas nessa área é descrito usando uma ferramenta estatística chamada de IH-AMEVA do SMC-Brasil. Um ponto no oceano a uma profundidade de 19,5 m, localizado nas coordenadas UTM 301562 E e 9126329 S, situado na zona UTM 25L, foi utilizado como referência para extrair os dados de ondas do banco de dados IH-DATA, do SMC-Brasil, que contém dados de 60 anos (1948-2008) de reanálise de ondas. A técnica conhecida como *Downscaling* utiliza o modelo SWAN (BOOIJ; RIS; HOLTHUIJSEN, 1999) para propagar as ondas de águas profundas para águas intermediárias, onde elas começam interagir com o fundo do mar.

Esse ponto, chamado de DOW (do inglês, *Downscaled Ocean Waves*), foi escolhido em um local onde a batimetria se apresentava praticamente uniforme, bem próximo à borda externa da grade de propagação, de forma a garantir que não haja variações significativas das características dos espectros das ondas que entram ao longo da borda externa da grade, em relação aos valores observados no ponto DOW.

Figura 6.7 – Relatório gerado do clima de ondas na região de estudo



Para a simulação numérica foram selecionados casos mais representativos a serem propagados nas simulações. Foram selecionados/simulados 146 casos, propagados nas condições de maré alta (2,60 m), meia-maré (1,30 m) e maré baixa (0,0 m), totalizando 438 casos. Após as propagações das simulações, foram desenhados nove perfis de praia em uma zona de interesse centrada na área de estudo, para que fossem calculados os fluxos médios de energia e transportes de sedimentos em cada perfil de praia.

RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

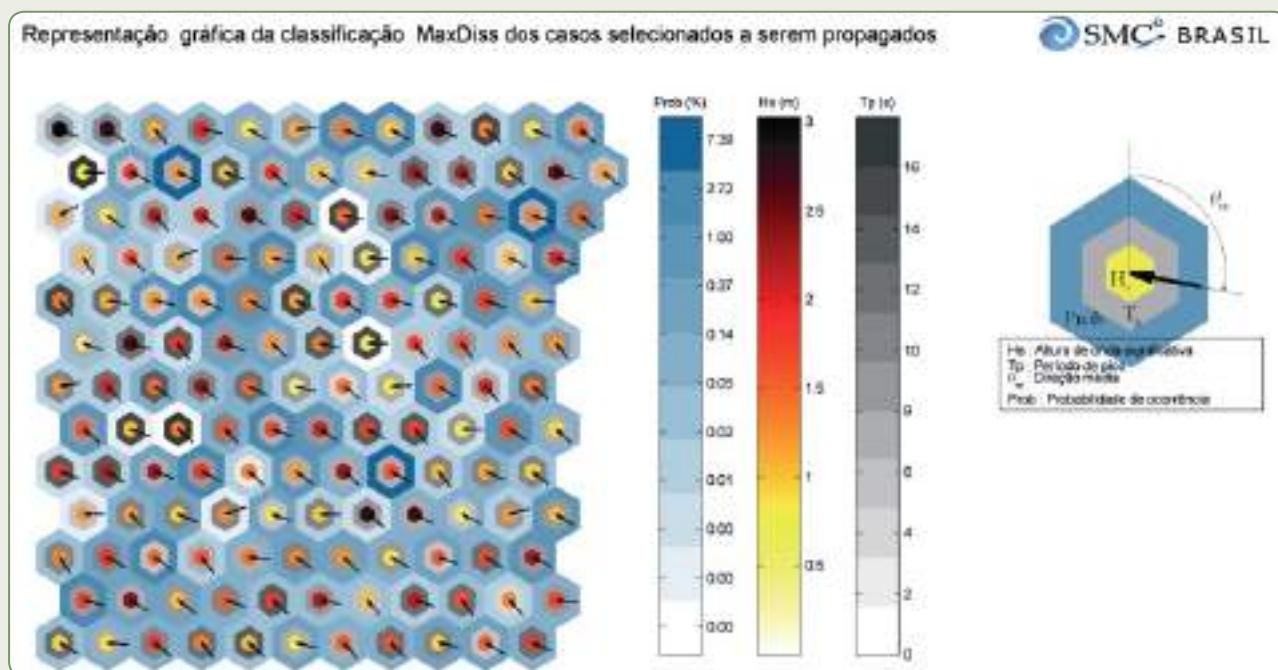
Dinâmica de ondas

Clima de ondas

O clima de ondas nessa área foi determinado pela ferramenta estatística IH-AMEVA do SMC-Brasil. Após a escolha do ponto DOW, sua posição é usada como referência para extrair os dados a partir da base de dados de IH-DATA, bem como para calcular a série de estados de mar mais representativos, utilizando-se a técnica da desigualdade máxima (MaxDiss) para minimizar a quantidade de estados de mar a serem propagados até a costa (Figura 6.8).

O clima de ondas no ponto DOW (Quadro 6.1 e Figura 6.9) tem mais de 78% de probabilidade de ondas provenientes predominantemente da direção leste-sudeste, e ondas vindas de sudeste com 21% de probabilidade. Outros 0,74% de ondas chegam da direção leste e uma porcentagem insignificante vem de sul-sudeste (0,04%).

Figura 6.8 – Representação gráfica de estados de mar selecionados para serem propagados para a costa, através do método de desigualdade máxima (MaxDiss)



Legenda: Cada seta indica um estado de mar, com altura, período, direção e probabilidade de ocorrência, denotados de acordo com as respectivas escalas

Fonte: Dos autores (2018).

O quadro estatístico de ondas mostra a altura de onda típica (ou normal), que é registrada 50% do tempo ($H_{S50\%}$), e a altura de onda de tempestade (ou extrema), que é registrada em um evento extremo que ocorre durante 12 horas de qualquer ano (H_{S12}), bem como os valores do período das ondas típico e extremo (Quadro 6.1).

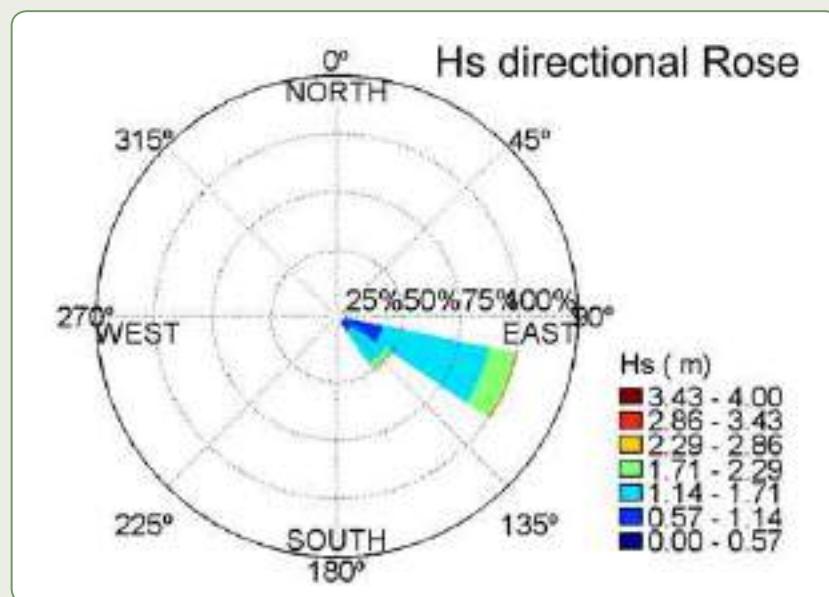
Uma vez que as ondas incidentes de leste-sudeste predominam, tanto no clima típico quanto na condição de tempestade, essas são as únicas a serem consideradas ao descrever o clima de ondas para esse local.

Quadro 6.1 – A probabilidade de ocorrência de ondas, calculada pelo IH-AMEVA. A direção leste-sudeste (ESE) é a mais predominante com 78% de probabilidade

Direção	Probabilidade (%)	$H_{S50\%}$ (m)	H_{S12} (m)
ENE	0,01	1,20	1,29
	0,74	1,17	1,84
	78,18	1,44	2,55
	21,03	1,49	2,43
	0,04	1,34	1,82

Fonte: Dos autores (2018).

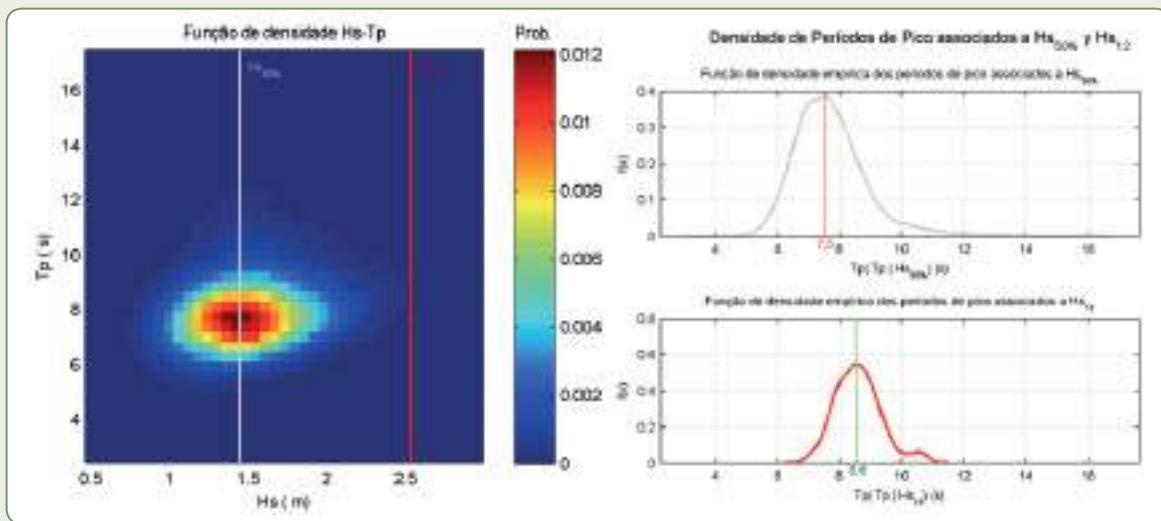
Figura 6.9 – Rosa direcional de H_s , calculada para o ponto DOW selecionado



Fonte: Dos autores (2018).

Os valores dos períodos de pico para o clima de ondas típico e para a condição de tempestade também são fornecidos pelo IH-AMEVA, através da função de densidade conjunta de altura de onda e período de pico (Figura 6.10).

Figura 6.10 – Funções de densidade conjunta de período de pico e altura significativa para o clima de ondas típico e a condição de tempestade

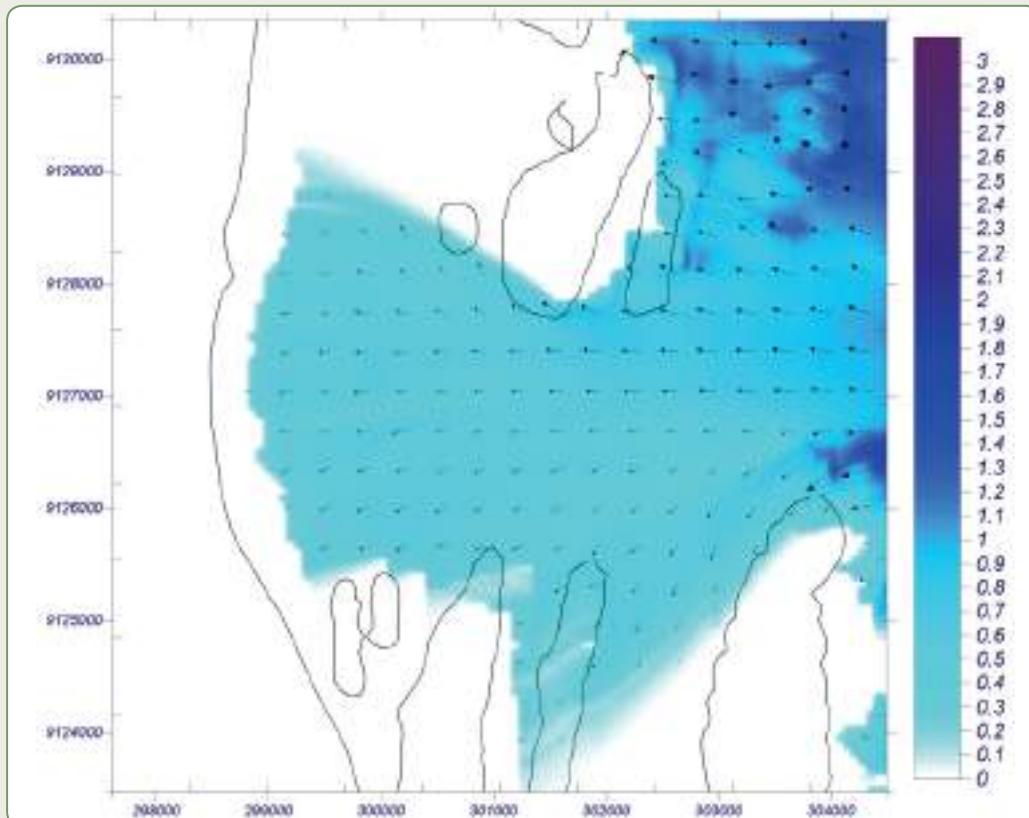


Fonte: Dos autores (2018).

Clima de ondas típico

As figuras 6.11, 6.12 e 6.13 demonstram os resultados das simulações de propagações de ondas próximo da costa, em condições oceânicas típicas (normais) da região.

Figura 6.11 – Dinâmica de ondas (direção e intensidade de H_s) em metros, em condições de maré baixa (0,0 m) e clima de ondas típico (H_s de 1,44 m e T_p de 7,5 s)

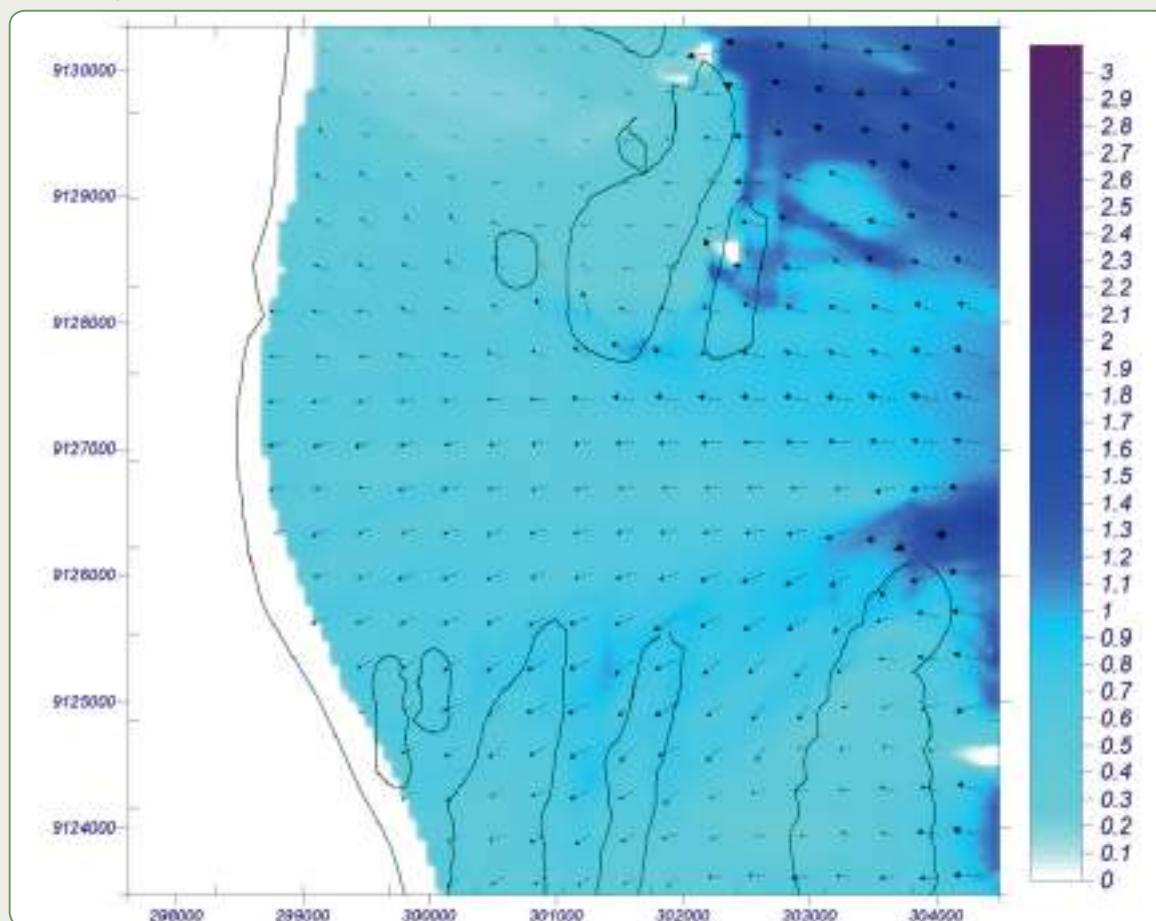


Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados das simulações com a maré baixa de (0,0 m) apresentaram ondas predominantemente com direção de SE (ao norte da área de estudo) e de E (região central da área de estudo), em alguns locais não há registro de ondas atingindo a costa, devido à proteção de barreiras de recife, com exceção da região central da área de estudo que se encontra desprotegida das barreiras de recifes (Figura 6.11).

Com amplitude de maré média (1,2 m de altura), houve o registro da dinâmica de ondas atuando próximo à costa com direções de SE (ao norte da área de estudo), E (região central da área de estudo) e NE (ao sul da área de estudo). Foram registradas alturas de ondas com no máximo 1,9 m. Nessas condições de maré, as ondas ultrapassam os recifes costeiros, ocasionando uma modificação na direção e altura das ondas que alcançam o litoral, principalmente na região norte da área de estudo (Figura 6.12).

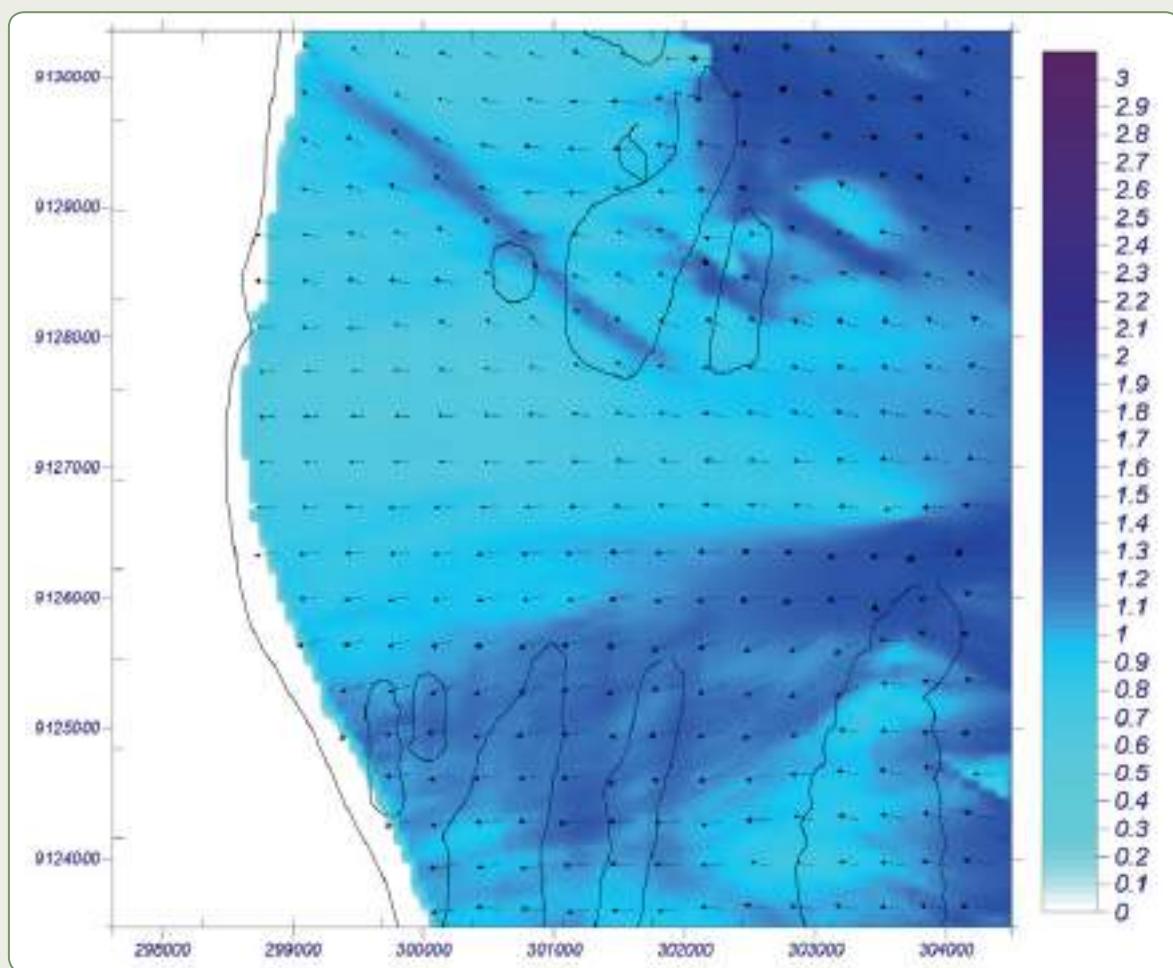
Figura 6.12 – Dinâmica de ondas (direção e intensidade de H_s), em condições de maré média (1,2 m) e clima de ondas típico (H_s de 1,44 m e T_p de 7,5 s)



Fonte: Dos autores (2018).

Com amplitude de maré alta (2,5 m), as direções das ondas próximo à costa tendem a ser orientadas para SE (ao norte da área de estudo) e E (região sul e central da área de estudo), atingindo valor máximo de 2,3 m de H_s (Figura 6.13).

Figura 6.13 – Dinâmica de ondas (direção e intensidade de H_s), em condições de maré alta (2,5 m) e clima de ondas típico (H_s de 1,44 m e T_p de 7,5 s)



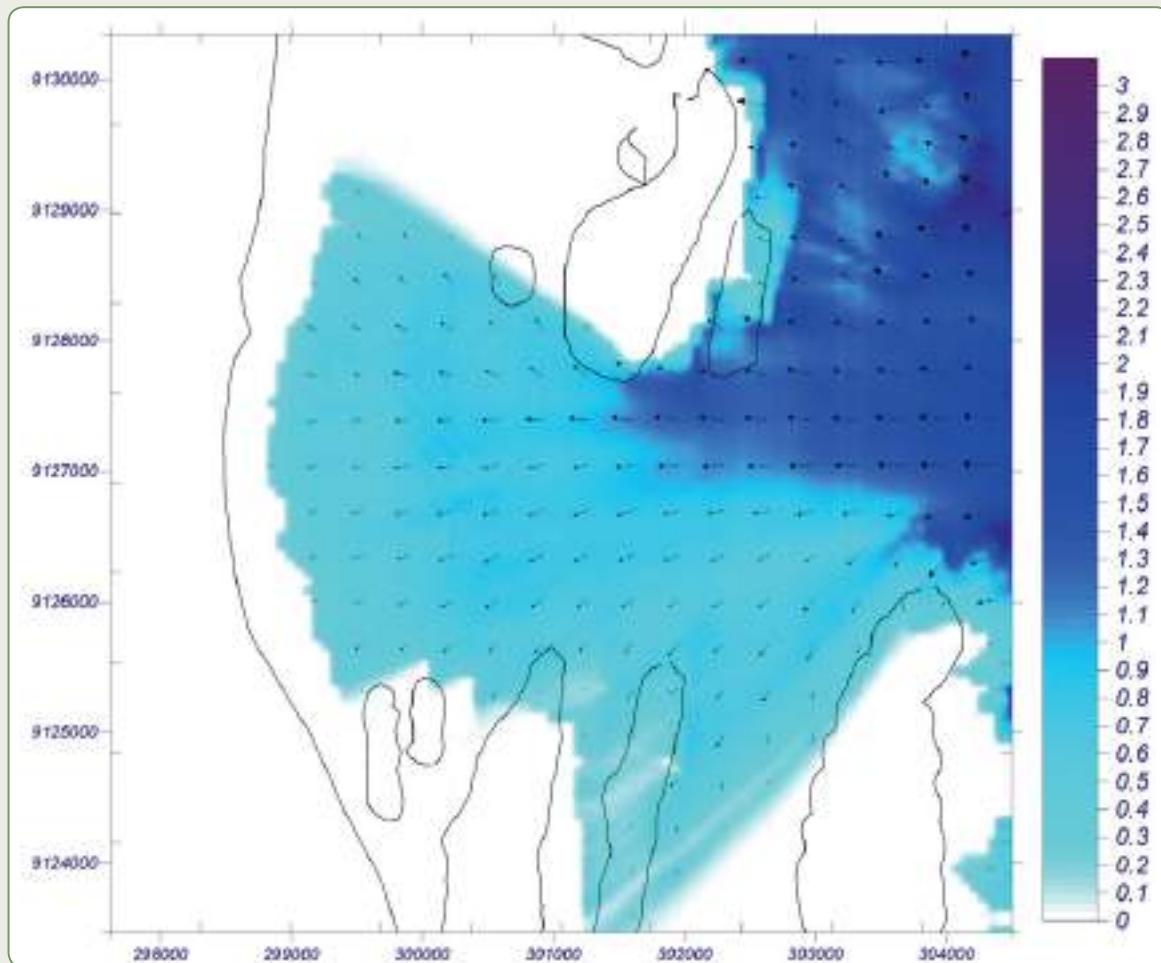
Fonte: Dos autores (2018).

Condição oceânica extrema (condições de tempestades)

As figuras 6.14, 6.15 e 6.16 mostram os resultados das simulações de propagações das ondas próximo à costa, para a região de estudo em situações de condições oceânicas extremas (condições de tempestades), com altura significativa de ondas (H_s) de 2,53 m e período de pico (T_p) de 8,6 s.

Na simulação com a maré baixa (0,0 m), as ondas chegam à costa com direção de SE (ao norte da área de estudo), E (região sul e central da área de estudo) e NE (região sul da área de estudo), e com valor máximo de 2,9 m de H_s (Figura 6.14).

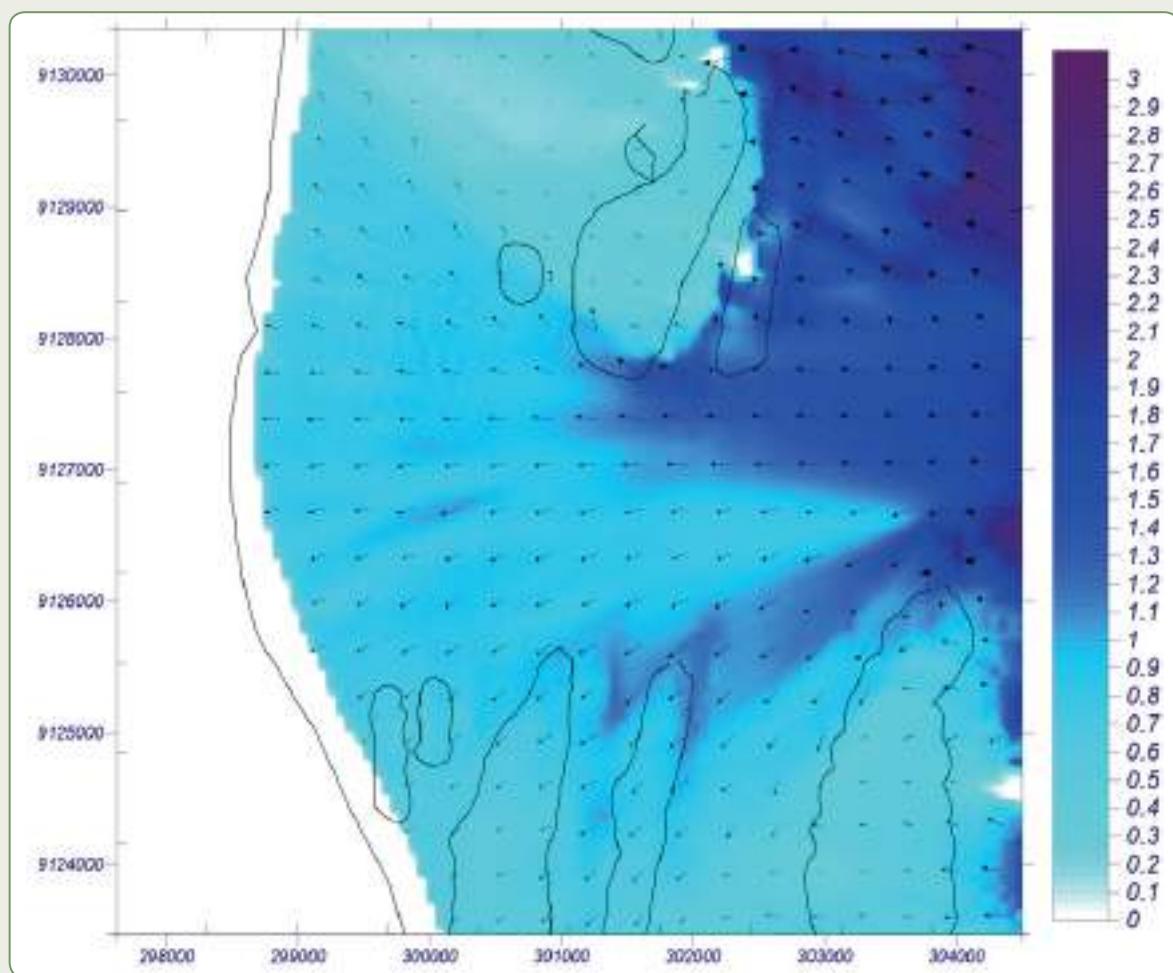
Figura 6.14 – Dinâmica de ondas (direção e intensidade de H_s), em condições de maré baixa (0,0 m) e tempestade (H_s de 2,53 m e T_p de 8,59 s)



Fonte: Dos autores (2018).

Com a maré média (1,2 m), a dinâmica de ondas atua próximo à costa com direções de SE (ao norte da área de estudo), E (região central da área de estudo) e NE (ao sul da área de estudo). Nessas condições de maré, as ondas ultrapassam os recifes costeiros, ocasionando uma modificação na direção e altura das ondas, principalmente na região norte da área de estudo. Nessas condições os valores máximos de H_s registrados ficaram em torno dos 2,9 m (Figura 6.15). Observa-se que, apesar da diferença entre a altura de onda em condições típicas e de tempestade, os resultados na linha de costa são praticamente os mesmos.

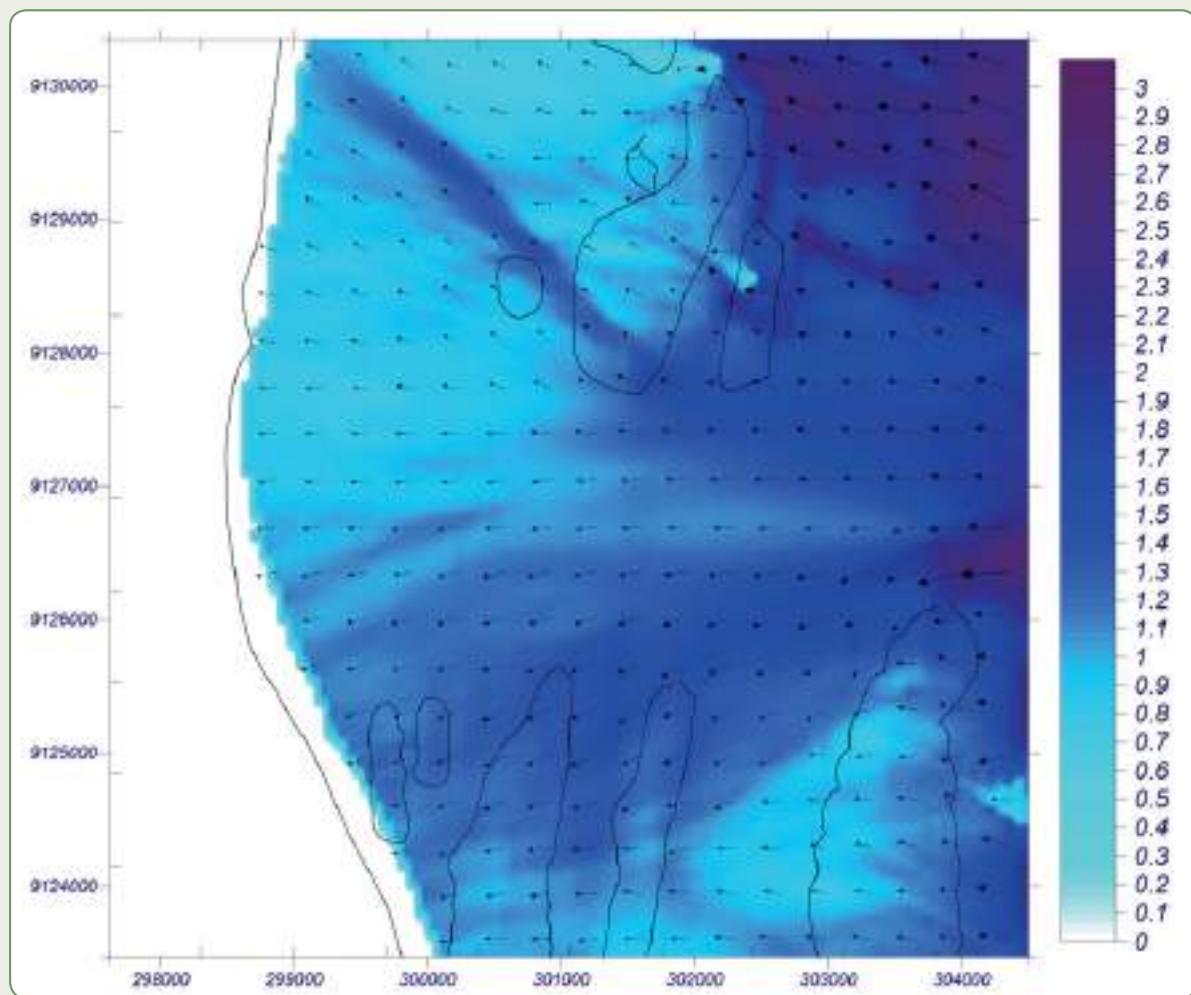
Figura 6.15 – Dinâmica de ondas (direção e intensidade de H_s), em condições de maré intermediária (1,2 m) e tempestade (H_s de 2,53 m e T_p de 8,59 s)



Fonte: Dos autores (2018).

Com a maré alta (2,5 m), a dinâmica das ondas apresentou a mesma tendência de direção da registrada para a maré intermediária, registrando H_s máximo de 3,0 m (Figura 6.16). A dinâmica neste caso se apresenta bastante semelhante à do clima de ondas típico com a maré alta (Figura 6.13), porém observa-se que as ondas alcançam o litoral com altura maior no caso das condições de tempestade.

Figura 6.16 – Dinâmica de ondas (direção e intensidade de H_s), em condições de maré alta (2,5 m) e tempestade (H_s de 2,53 m e T_p de 8,59 s)



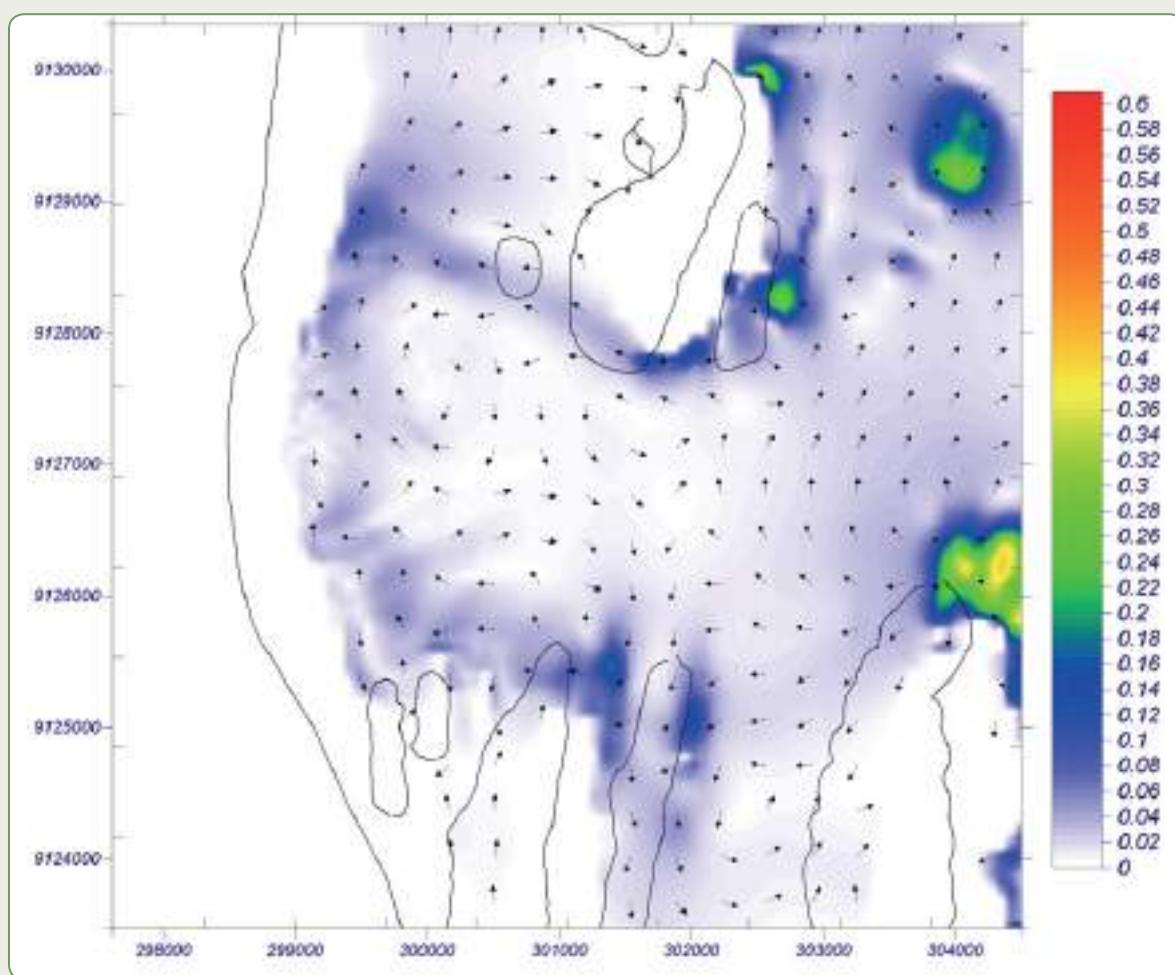
Fonte: Dos autores (2018).

Correntes causadas por ondas

Clima de ondas típico

As simulações de correntes geradas pelas ondas foram realizadas para o clima de ondas típico da região, com altura significativa de ondas (H_s) de 1,44 m e período de pico (T_p) de 7,5 s (Figuras 6.17, 6.18 e 6.19). Para a condição de maré baixa (0,0 m), as correntes tendem a se deslocar próximo da costa para norte (na região norte da área de estudo) e em direção ao mar aberto/offshore (fora da costa) ou formando vórtices na região central da área de estudo (Figura 6.17).

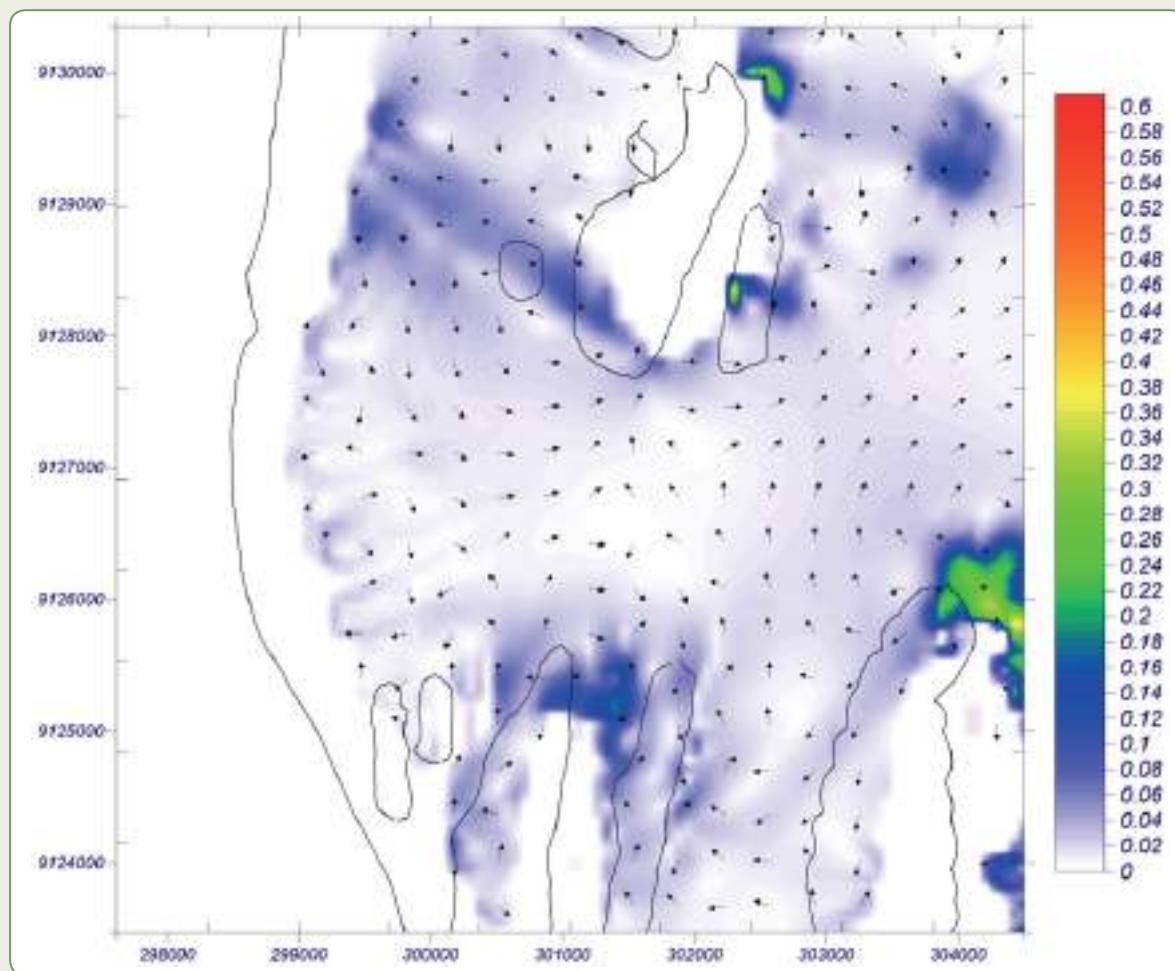
Figura 6.17 – Correntes ocasionadas por ondas (m/s) em condições de maré baixa (0,0 m) e clima de ondas típico (H_s de 1,44 m e T_p de 7,5 s)



Fonte: Dos autores (2018).

Nas simulações para as marés intermediária (1,2 m) e alta (2,5 m), foram registrados os deslocamentos das correntes em direção *offshore* na região central da área de estudo. Esses resultados de simulações demonstram que, na área central da região de estudo, ocorre uma remoção do sedimento da costa, sendo esse sedimento deslocado para a região oceânica (Figuras 6.18 e 6.19).

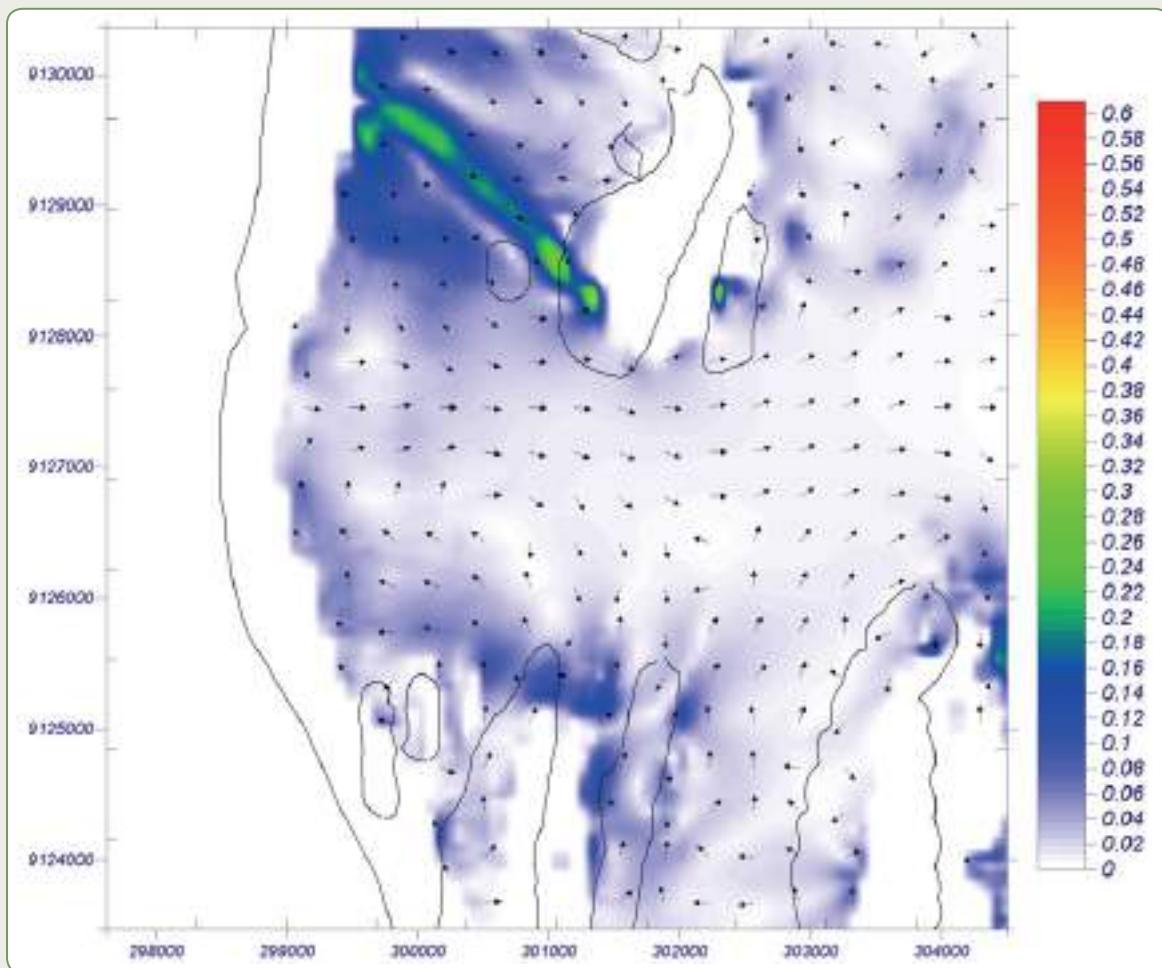
Figura 6.18 – Correntes ocasionadas por ondas (m/s) em condições de maré intermediária (1,2 m) e clima de ondas típico (H_s de 1,44 m e T_p de 7,5 s)



Fonte: Dos autores (2018).

Observa-se, nas marés intermediária e alta, a formação de uma corrente na região norte da área de estudo, estreita e intensa no sentido transversal, que tende a deslocar o sedimento do fundo para a costa. Essa corrente apresenta maior intensidade na maré alta (Figura 6.19). Aparentemente ela se forma devido à quebra das ondas sobre o recife intermediário, numa área onde ocorre refração, cujo efeito é concentrar a energia das ondas exatamente sobre esta linha de corrente (Figura 6.13). Quando ocorre a quebra dessas ondas com energia concentrada, o efeito é a criação dessa corrente mais intensa em direção ao litoral.

Figura 6.19 – Correntes ocasionadas por ondas (m/s) em condições de maré alta (2,5 m) e clima de ondas típico (H_s de 1,44 m e T_p de 7,5 s)*



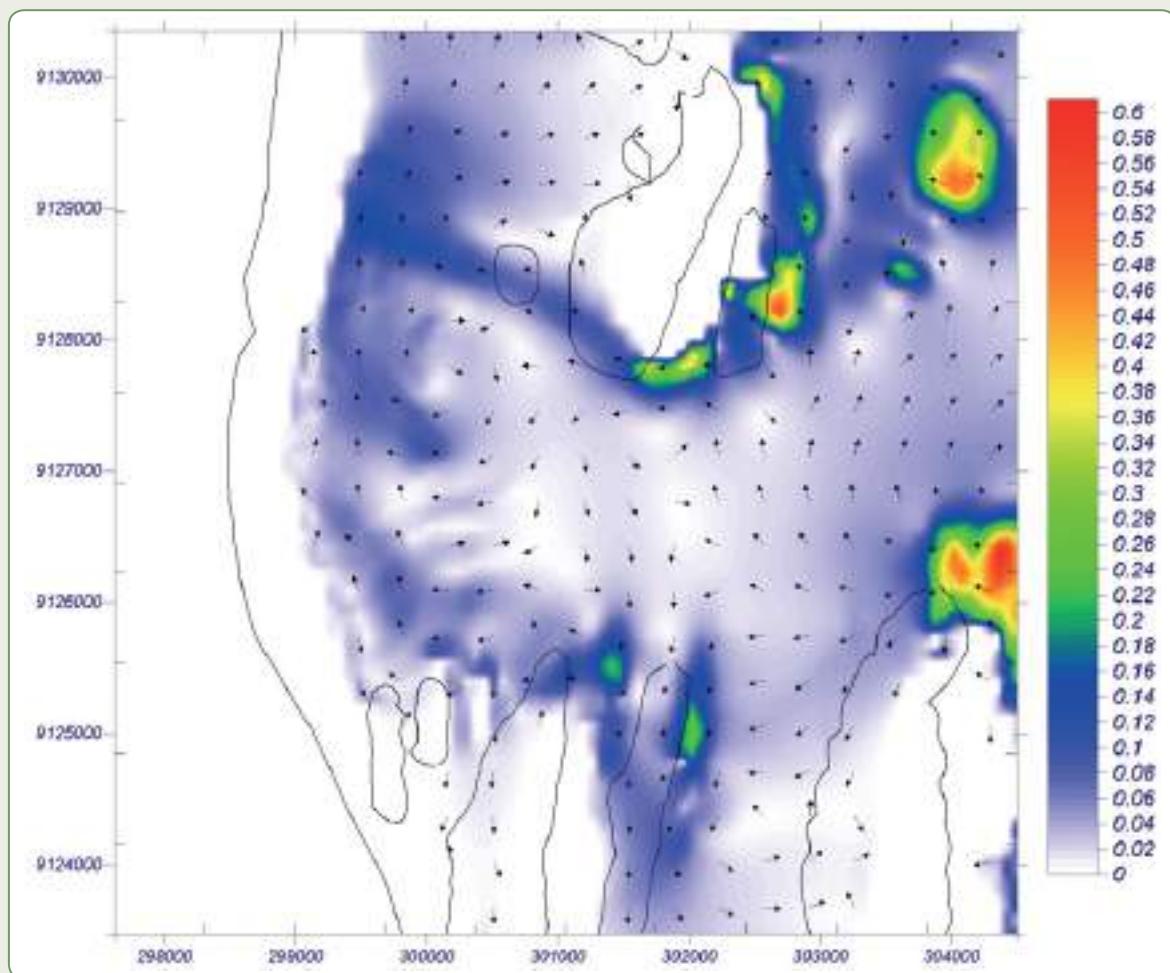
*Observe a linha de corrente transversal em direção ao litoral na região norte da área de estudo, aparentemente criada por um efeito de refração das ondas

Fonte: Dos autores (2018).

Condição oceânica extrema (condições de tempestades)

Nas simulações de correntes geradas por ondas em condições de tempestades, ou seja, com altura significativa de ondas (H_s) de 2,53 m e período de pico (T_p) de 8,6 s. (Figuras 6.20, 6.21 e 6.22), as correntes ocasionadas por ondas em condições de maré baixa (0,0 m) (Figura 6.20) registram o deslocamento das correntes para norte (na região ao norte da área de estudo), para sul (na região ao sul da área de estudo) e em direção offshore (na região central da área de estudo).

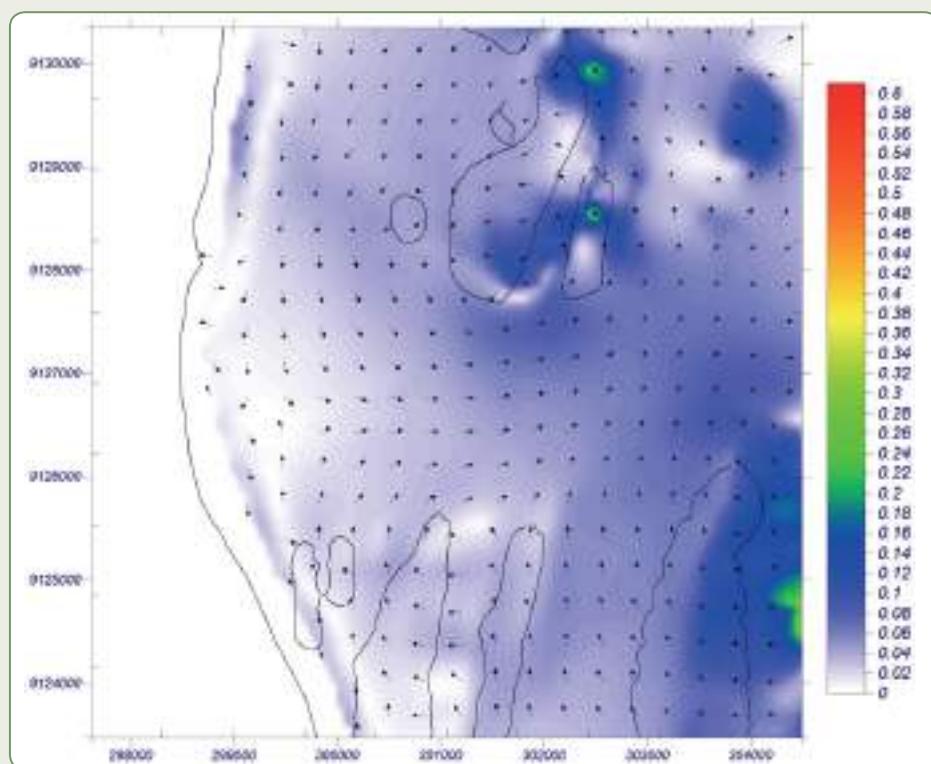
Figura 6.20 – Correntes ocasionadas por ondas (m/s) em condições de maré baixa (0,0 m) e tempestade (H_s de 2,53 m e T_p de 8,6 s)



Fonte: Dos autores (2018).

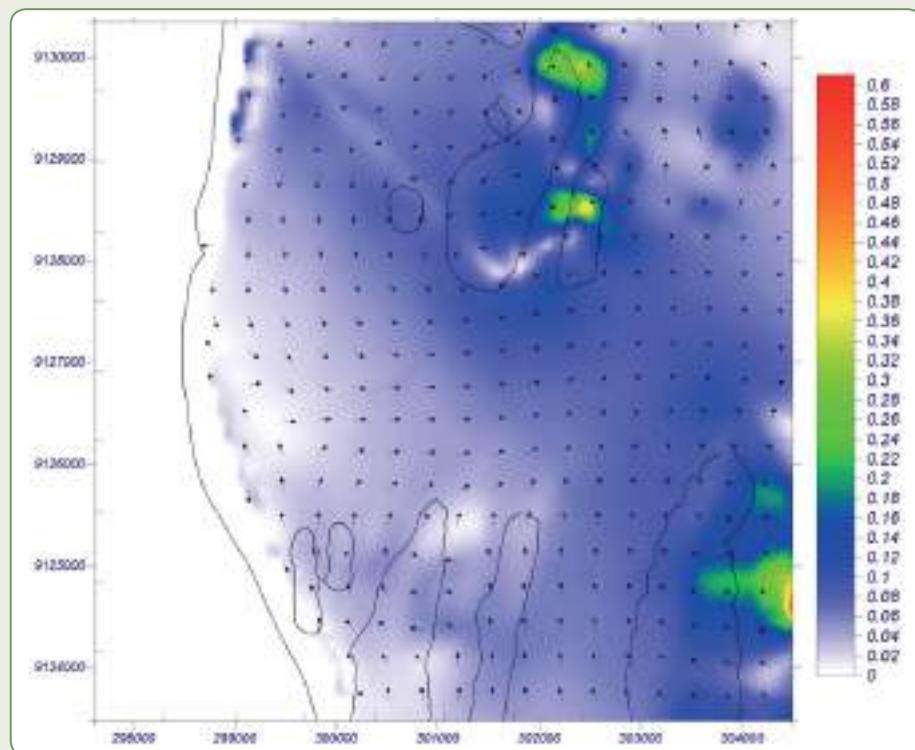
As simulações efetuadas para as condições de maré intermediária (1,2 m) e alta (2,5 m) também registraram correntes em direção *offshore* na região central da área de estudo. Esses resultados demonstram que na área central da região de estudo, nessas condições de tempestade, ocorre uma grande perda de sedimento da costa, sendo esse sedimento deslocado para a região oceânica e não retornando para a região costeira (Figuras 6.21 e 6.22).

Figura 6.21 – Correntes ocasionadas por ondas (m/s) em condições de maré intermediária (1,2 m) e tempestade (H_s de 2,53 m e T_p de 8,6 s)



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 6.22 – Correntes ocasionadas por ondas (m/s) em condições de maré alta (2,5 m) e tempestade (H_s de 2,53 m e T_p de 8,6 s)



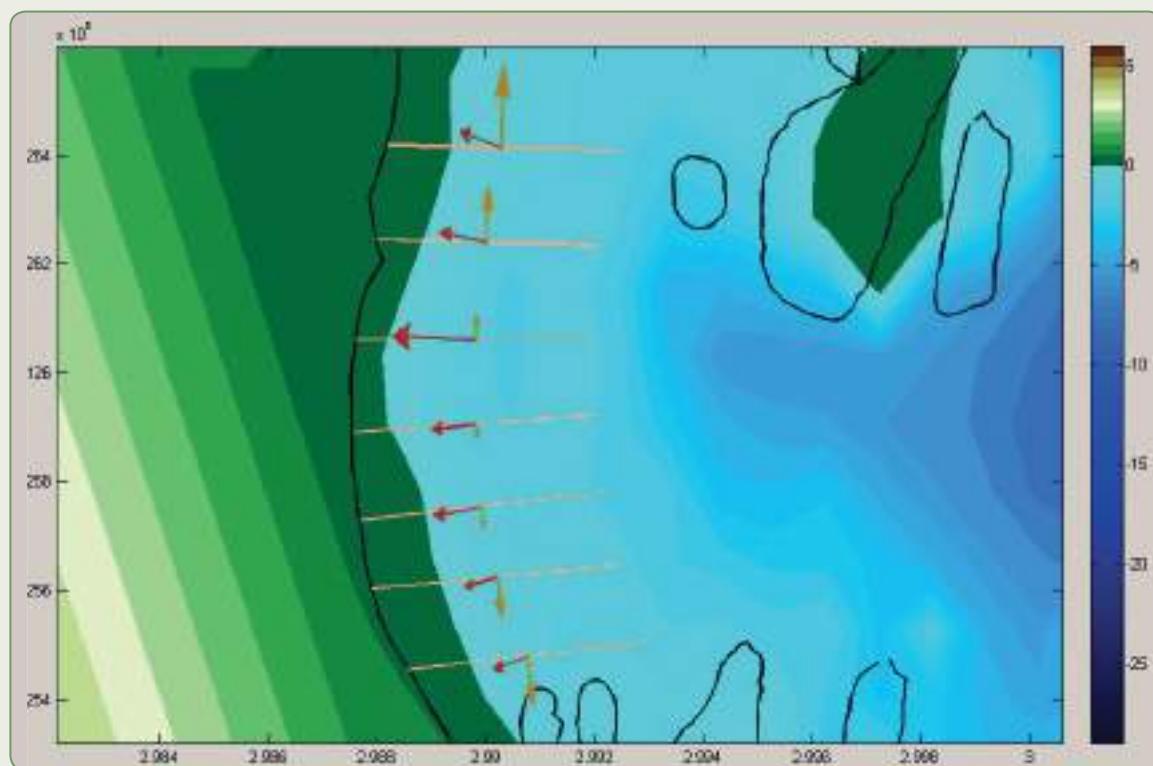
Fonte: Dos autores (2018).

Transporte de sedimentos

Foram obtidos os resultados que eram esperados, e que foram confirmados pelas simulações produzidas pelo modelo, mostrando que a área de interesse, situada entre dois bancos de arrecifes naturais e naturalmente exposta à maior ação erosiva das ondas, não está em equilíbrio (Figura 6.23 e 6.24).

Essa área, situada na Praia de Pau Amarelo, em Paulista, é a que apresenta a erosão mais problemática, e possui grande número de obras rígidas de contenção construídas à beira-mar, como muros de concreto e paredões de pedra. Nota-se na figura 6.24, que há uma tendência de divergência de transporte, entre os perfis P4 e P5, porque nessa área o transporte médio anual de sedimentos possui direções opostas, denotando ser uma área onde os sedimentos tendem a ser constantemente removidos.

Figura 6.23 – Perfis selecionados para o cálculo do transporte médio anual de sedimentos



Legenda: Os vetores vermelhos denotam o fluxo de energia médio provocado pela quebra das ondas, enquanto os vetores amarelos indicam o transporte médio anual de sedimentos

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 6.24 – Cálculo do transporte médio anual de sedimentos nos perfis de praia selecionados



Fonte: Dos autores (2018).

DISCUSSÃO

Este estudo demonstra que as condições da dinâmica costeira no litoral de Paulista (PE) estão diretamente relacionadas à geomorfologia costeira (morfologia de fundo, recifes costeiros, etc). Através dos resultados numéricos, simulados em três condições de marés (marés baixa, intermediária e alta), foi possível identificar na região três áreas com condições dinâmicas distintas: ao norte da área de estudo – ondas com direções de SE, gerando correntes que tendem a se deslocar próximo da costa para norte; na região central da área de estudo – ondas com direção de leste, gerando correntes em direção ao mar aberto (fora da costa) ou formando vórtices; e ao sul da área de estudo – ondas com direção de NE, que geram correntes em direção ao sul.

Comparando o resultado do transporte médio, que leva em conta os 60 anos de reanálise, com as simulações feitas para os climas típico e extremo de ondas, nota-se que o transporte médio corresponde aos vários cenários de climas de ondas e marés. Em alguns cenários, as correntes costeiras apresentam direções contrárias, contudo, são situações isoladas, que não influem significativamente no resultado final do transporte médio.

Estudos observacionais realizados em outro local do litoral de Pernambuco confirmam variação na direção e diminuição na altura das ondas ao longo da plataforma interna de Boa Viagem, causadas pela variação na batimetria e pela presença de recifes de arenito (BEZERRA, 2013).

A incidência das ondas e correntes costeiras está relacionada diretamente com a morfologia da linha de costa (CANDELLA, 1997), alterando constantemente os perfis de praia em resposta à energia da onda incidente (WRIGHT, COLLING; PARK, 1999), o que pode resultar em processos tais como a erosão e a deposição costeira.

Os resultados numéricos apresentados neste capítulo confirmam o que pode ser observado naturalmente: que há uma redistribuição da areia da praia para áreas mais afastadas da costa e posterior reposição, processo esse resultante da atuação conjunta de ondas, correntes e marés, sendo o nível da maré o que determinará a área de atuação da onda e consequentemente a área que sofrerá mobilização desse sedimento (ZHANG; DOUGLAS; LEATHERMAN, 2004).

CONCLUSÃO

As ondas que se propagam até a costa sofrem processos de difração e refração associados à morfologia de fundo, principalmente em razão da barreira de recifes ao longo da costa, que faz com que as ondas que chegam à praia do litoral norte de PE (Paulista) apresentem uma variabilidade espacial muito marcada. A quebra das ondas devido ao efeito do fundo, em conjunto com os gradientes de altura de onda gerados ao longo do sistema e a incidência oblíqua das ondas produzem um sistema de correntes próximo da praia que se move predominantemente para norte, sul e em direção *offshore* (leste).

Essas correntes geram um transporte longitudinal, que resultou em três zonas caracterizadas por comportamentos distintos: a zona norte apresenta correntes que transportam sedimentos do fundo para o litoral, e depois em direção ao sul; a zona sul apresenta comportamento semelhante, com correntes vindas do fundo para a costa e depois para o norte; a zona central possui um movimento de convergência de correntes longitudinais e uma corrente transversal que tende a transportar os sedimentos para o fundo.

Os resultados das simulações numéricas da dinâmica costeira da região levaram à conclusão de que a área de interesse não está em equilíbrio. Pode-se supor, observando os resultados do transporte médio anual de sedimentos, que se não houver nenhuma providência, a erosão irá continuar ao longo dos próximos anos, com menor ou maior intensidade, contudo, para uma conclusão definitiva, mais medições *in situ* deverão ser realizadas.

Trabalhos futuros de estudo de monitoramento ambiental da dinâmica de corrente e ondas (observado ou simulado) sobre estrutura ou futuras estruturas devem ser realizados, além do estudo de evolução temporal (anuais e mensais) de transporte de sedimentos nos perfis de praia já monitorados ou futuramente monitorados.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE (Projeto APQ-1056-1.08/15) e o Convênio entre a UFPE e a Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura do Paulista (PE) (nº 81/2014). Esta pesquisa também foi apoiada pelo Projeto “Estudo de caso do Sistema de Modelagem Costeira Brasileira (SMC-BRASIL) em Pernambuco” – SEDR/MMA, SEMAS, CPRH e UFPE (Convênio nº 74/2013).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. C. B. et al. Análise da ocupação urbana das praias de Pernambuco, Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, p. 97-104, 2007.
- BARBOSA, C. C. A.; SILVA, H. A.; MARQUES DE SÁ, L. A. C.; PORTUGAL, J. L. **Base de dados espaciais aplicada a erosão costeira**. Recife: [s.n.], 2008.
- BEZERRA, C. S. **Clima de ondas e correntes no litoral de Boa Viagem (Recife-PE)**: aplicação do sistema de radar náutico de banda-X. 2013. 99 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.
- BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions. I – Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.
- CABRAL, A. J.; SILVA, W. F. G. O. Impactos ambientais derivados do uso e ocupação da linha de costa em trechos das praias de Pau Amarelo e Maria Farinha – Município de Paulista/PE: estudo preliminar. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, p. 74-88, 2014.
- CAMUS, P. et al. High resolution downscaled ocean waves (DOW) reanalysis in coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 72, p. 56-68, 2013.
- CANDELLA, R. N. **Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica**. 1997. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.
- DIAS, J. M. A. **Estudo de avaliação da situação ambiental e propostas de medidas de salvaguarda para a faixa costeira portuguesa (Parte de Geologia Costeira)**. Lisboa: [s.n.], 1993.
- IBGE. Pernambuco “Paulista” **Produto Interno Bruto dos Municípios – 2013**. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/grafico_cidades.php?lang=&codmun=261070&idtema=152&search=pernambuco|paulista|produto-interno-bruto-dos-municípios-2013>. Acesso em: 26 fev. 2016.
- KIRBY, J. T.; ÖZKAN, H. T. **Combined refraction/diffraction model for spectral wave conditions**. Newark: Center Applied Coastal Research, University of Delaware, 1984.
- LONGUET-HIGGINS, M. S.; STEWART, R. W. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. **Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts**, v. 11, n. 4, p. 529-562, 1964.
- MANSO, V. DO A. V. et al. Erosão e progradação do litoral brasileiro: Pernambuco. In: DIETER MUEHE (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. 2. ed. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2006. p. 179-196.
- OLIVEIRA, P. F. P.; SILVA, H. A.; BARRETO, E. P.; VALENÇA, L. M. M.; MANSO, V. A. Variação longitudinal dos sedimentos de praia e sua relação com a inclinação da face praial e a morfodinâmica, Município de Paulista-PE. **Estudos Geológicos**, v. 23, n. 2, p. 141-151, 2013.
- OLIVEIRA, P. F. P.; SILVA, H. A.; SANTANA, N. M. G.; SILVA, E. R. A. C.; MANSO, V. A. V. Variação da linha de costa da Praia do Janga/Paulista-PE, através da técnica de fusão de imagens orbitais CBERS HRC/CCD. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: TecArt Editora Ltda., 2011
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). **Shore protection manual**. Engineer Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 1984.
- VIDAL, C.; LOSADA, M. A; MEDINA, R. Modelos de morfodinâmica de playas. **Ingeniería del Agua**, v. 2, p. 55-74, abr. 1995.
- WRIGHT, J.; COLLING, A.; PARK, D. **Waves, tides and shallow-water Processes**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 228 p. (The Open University).
- ZHANG, K.; DOUGLAS, B.; LEATHERMAN, S. Global warming and coastal erosion. **Climatic Change**, v. 64, n. 1-2, p. 41-58, 2004.

ESTUDO DE CASO DE EROSÃO COSTEIRA NA PRAIA DE CANDEIAS (PE)

Gabriel Gomes
Andrea Olinto
Alex Costa da Silva

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo de caso das mudanças no transporte de sedimentos induzidas pela construção de um quebra-mar e sua posterior modificação. O estudo foi realizado utilizando o software SMC (Sistema de Modelagem Costeira) como a principal ferramenta para simular a dinâmica do litoral para os diferentes cenários modelados. A área de estudo foi a Praia de Candeias, na região metropolitana de Recife (PE), Brasil. Foram modelados os cenários do quebra-mar contínuo, do quebra-mar interrompido e sem quebra-mar. Os resultados foram consistentes com as mudanças documentadas para a região.

Palavras-chave: Praia de Candeias. Quebra-mar. Erosão costeira.

INTRODUÇÃO

As praias arenosas constituem um sistema de defesa natural da costa, contra a ação de ondas e marés. O problema de erosão costeira tem afetado várias localidades no Nordeste do Brasil, associado principalmente à falta de planejamento ocupacional nas regiões costeiras. A urbanização, em conjunto com um histórico de ocupação e utilização do solo, incluindo o aterro de áreas de mangue, a prática da impermeabilização do solo (que impede a drenagem), combinados com as características

meteoceanográficas locais, desencadearam um problema de erosão crescente, contribuindo para a redução da resiliência das praias.

Este estudo tem como objetivo principal a investigação da dinâmica de sedimentos em uma área da Praia de Candeias, localizada na região metropolitana do Recife, no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil (Figura 7.1), onde uma estrutura rígida (quebra-mar) foi instalada para a proteção contra a erosão costeira e, mais recentemente, modificada para mitigar problemas de retenção de sedimentos e erosão na praia vizinha.

Este estudo analisa e compara as dinâmicas costeiras sem a proteção de um quebra-mar, bem como sob a influência de diferentes configurações do quebra-mar, utilizando a modelagem numérica para determinar qual configuração resulta em menor impacto na erosão da linha de costa.

As modelagens foram realizadas com os módulos e ferramentas numéricas incluídas no pacote do *software* Sistema de Modelagem Costeira (SMC).

A PRAIA DE CANDEIAS

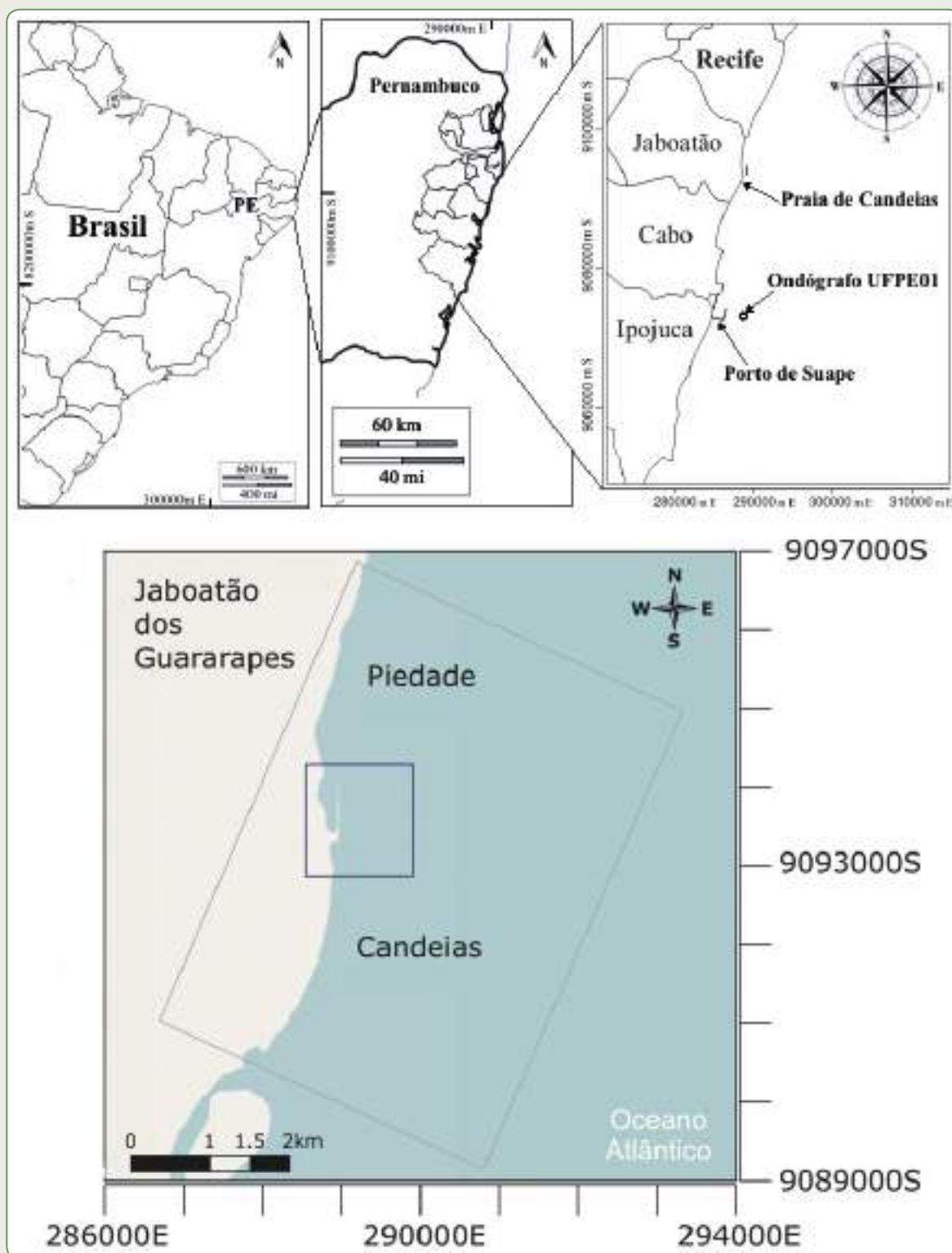
A Praia de Candeias está localizada no município de Jaboatão dos Guararapes, região metropolitana do Recife (PE). Apresenta cerca de 3 km de extensão e uma elevada densidade populacional (Figuras 7.1 e 7.2). Em 2013, a densidade populacional registrada em Jaboatão dos Guararapes foi de 2.491,82 habitantes por quilômetro quadrado (<http://cod.ibge.gov.br/A62>), com uma concentração ainda maior na zona costeira, preferida para moradia.

As características geográficas da área de estudo a tornam altamente suscetível à ação do mar, incluindo: baixas altitudes (entre 2,0 e 4,0 m acima do nível médio do mar (NMM)); áreas planas, rodeadas por planícies costeiras; drenagem superficial com a presença de rios, córregos e lagos e áreas de inundação permanente, devido ao nível raso do lençol freático (FINEP/UFPE, 2009).

Verifica-se também uma tendência geral de retrogradação do litoral nessa região, causada principalmente pela elevação do nível do mar, bem como o aumento do número de eventos de tempestade (NEVES; MUEHE, 1995).

Essa tendência também é exibida ao longo de vários trechos da costa de Pernambuco, sendo seus efeitos mais notáveis sentidos principalmente nos municípios da região metropolitana do Recife, devido à sua elevada densidade populacional e consequente pressão do setor imobiliário (FINEP/UFPE, 2009; MARRONI; ASMUS, 2005).

Figura 7.1 – Localização da área de estudo, no litoral do município de Jaboatão dos Guararapes, região metropolitana do Recife (PE)



Legenda: O retângulo azul delinea a área de estudo com o quebra-mar na sua configuração original, o retângulo cinza é o contorno da grade de propagação utilizada no SMC

Fonte: Dos autores (2018).

Proteção natural dos arrecifes

As formações de arrecifes naturais, como os arrecifes de corais e arrecifes de arenito, agem como barreiras submersas protegendo a linha de costa da erosão costeira, devido à redução na energia das ondas induzida pela sua presença (DALLY; DEAN; DALRYMPLE, 1985; KENCH; BRANDER, 2006; ROBERTS; MURRAY; SUHAYDA, 1975; SALLINGER; HOLMAN, 1985).

Em algumas áreas do litoral da região metropolitana do Recife, a maior parte da energia das ondas é dissipada por arrecifes, consequentemente, produzindo apenas correntes fracas (LONGUET-HIGGINS, 1970). No entanto, nos trechos em que o arrecife é interrompido ou em que o seu topo é mais raso, a energia das ondas que atinge a praia é quase a mesma registrada em trechos não protegidos da linha de costa (COSTA, 2010).

Enquanto a Praia de Candeias está quase totalmente protegida dos eventos de ondas extremas por uma formação de arrecife de franja (Figura 7.2), no seu trecho norte, uma interrupção natural no arrecife conhecida como “Barra dos Abreus” está presente (Figura 7.2c). O segmento de arrecife isolado situado à norte da interrupção é conhecido como “Abreus” (Figura 7.2b).

Devido à elevada profundidade do canal da Barra dos Abreus (Figura 7.2c), a energia de onda de águas profundas pode se propagar quase sem qualquer obstáculo até a linha de costa. O empinamento das ondas e o atrito com o fundo dissipam apenas uma pequena fração da energia das ondas, expondo assim a área da praia em frente à Barra dos Abreus a um nível elevado de transporte de sedimentos provocado pela energia das ondas e das correntes.

Figura 7.2 – Praia de Candeias



Legenda: (a) quebra-mar modificado na configuração atual; (b) arrecife isolado conhecido como Abreus; (c) Barra dos Abreus; e (d) formação de arrecife de franja que protege a maior parte da praia

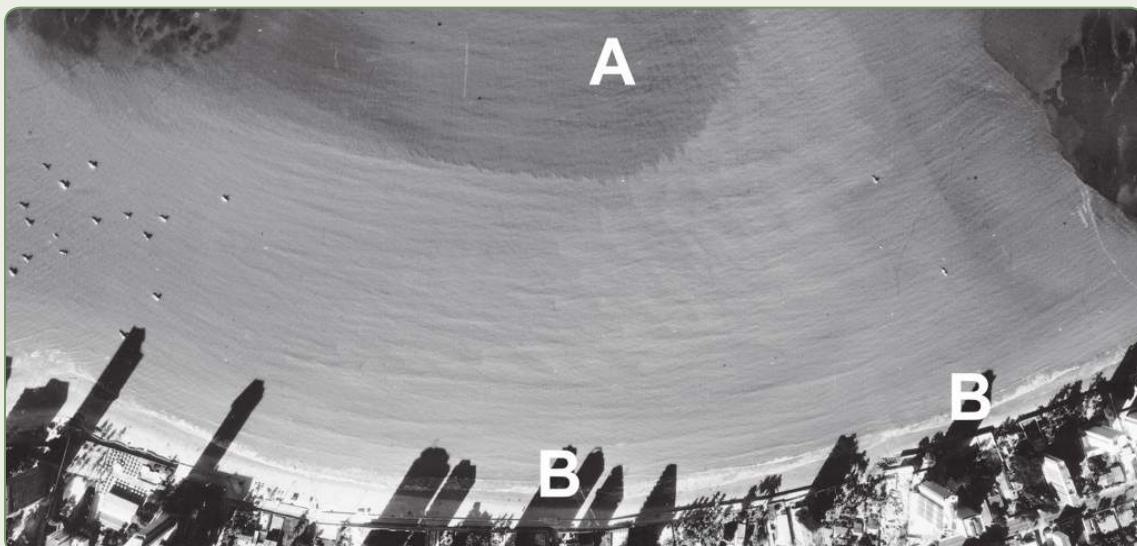
Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (jul. 2013).

Invasão do litoral

A morfodinâmica das praias é afetada por construções humanas instaladas na área de pós-praia, porque essas construções tendem a estabilizar a areia que, de outro modo, poderia servir como uma reserva natural de sedimentos para o sistema praial. A crescente pressão imobiliária e uma gestão não integrada da urbanização costeira (MUEHE, 2004) permitiram a construção de edifícios avançando até mesmo sobre a área de praia (Figura 7.3). Muitas dunas costeiras foram destruídas, com a urbanização estendendo-se até próximo à linha de preamar (BORBA; MANSO, 1999).

Além da invasão da praia por construções urbanas, estruturas rígidas, como espiões e diques de contenção, foram também instaladas. Essas estruturas costeiras foram implementadas sem qualquer conhecimento aprofundado da dinâmica costeira local (FINEP/UFPE, 2009) e apenas transferiram o problema da erosão para as praias adjacentes, como consequência da interrupção do equilíbrio dinâmico do transporte de sedimentos.

Figura 7.3 – Litoral de Jaboatão dos Guararapes em 1997



Legenda: a) a Barra dos Abreus; e b) uma pequena área de pós-praia e diques de contenção para proteger os edifícios que invadiram a zona de praia

Fonte: A adaptação dos autores (2018) sobre foto da Agência Condepe-Fidem (1997).

Em 2004 um quebra-mar destacado, medindo 700 m de comprimento, foi instalado a 20 m da praia em uma área exposta à ação das ondas (Figura 7.4a). Apesar dos quebra-mares destacados serem geralmente construídos como forma de proteção da linha de costa, a sua instalação, mesmo acompanhada de um estudo prévio e de simulações da dinâmica costeira, pode acarretar a erosão em áreas adjacentes (EDWARDS; NAMIKAS, 2011), o que de fato ocorreu na área de estudo.

Figura 7.4 – Litoral de Jaboatão dos Guararapes, mostrando a ocupação de alta densidade da área de estudo



Legenda: a) quebra-mar destacado, instalado na região em sua primeira configuração; b) pequeno espigão; c) áreas já esgotadas de sedimento, protegidas por diques de contenção; d) saliência formada por sedimentos imobilizados; e e) área erodida ao norte

Fonte: Roberto Angelo (ca. 2000).

Em 2013, nove anos após a instalação do quebra-mar, ele foi modificado para sua configuração atual, consistindo da abertura de quatro lacunas de 100 m cada, ao longo do seu comprimento, resultando assim em uma geometria com cinco trechos menores e isolados do quebra-mar original (Figuras 7.2a e 7.5a).

Essa reconfiguração planejada do quebra-mar foi executada em conjunto com uma engorda ao longo de toda a Praia de Candeias, num esforço para restabelecer a morfologia típica da praia. As últimas observações mostram que as correntes induzidas por ondas têm promovido um rearranjo de sedimentos no local (Figura 7.5).

Figura 7.5 – Configuração do quebra-mar em uma maré baixa de sizígia (31 de março de 2014)



Legenda: a) quatro das seções restantes do quebra-mar; b) uma saliência; c) uma baía formada pelo sedimento rearranjado pelas ondas e correntes, apenas alguns meses depois da reconfiguração do quebra-mar

Fonte: Dos autores (2018).

CONFIGURAÇÃO DO MODELO REGIONAL

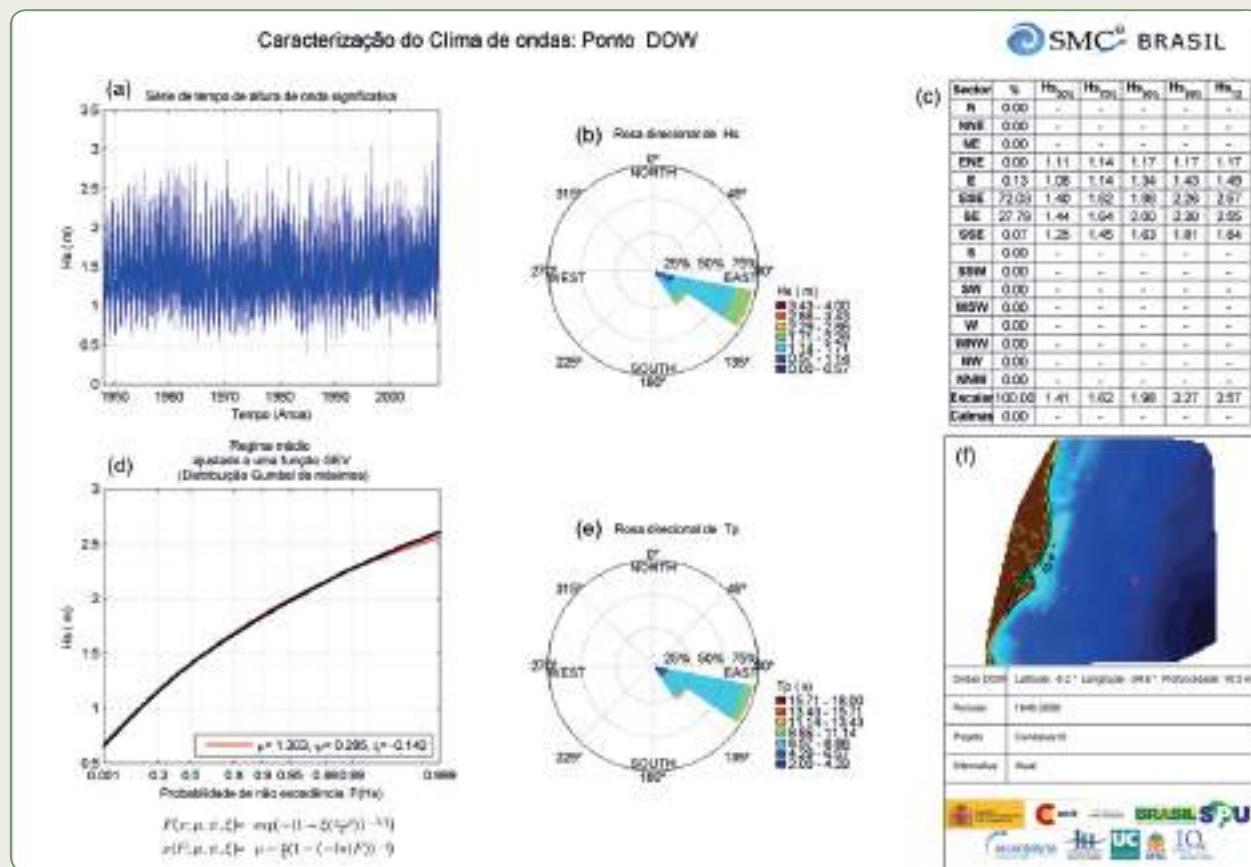
Clima de ondas

O clima de ondas nessa área é descrito usando o IH-AMEVA, a ferramenta de análise estatística do módulo SMC-Tools. Um ponto DOW (*Downscaling Ocean Waves*) em uma profundidade de 15,6 m na baixa-mar média de sizígia (MLWS), localizado nas coordenadas 290687 E e 9093096 S, foi utilizado como referência para extrair os dados da base de dados de reanálise de ondas do IH-DATA, e também para calcular a série de estados de mar mais representativos, utilizando a técnica da máxima dissimilitude (ou desigualdade máxima), para serem propagados até a linha de costa.

O clima de ondas no ponto DOW (Quadro 7.1 e Figura 7.6) mostra a existência de mais de 75% de probabilidade de ondas provenientes de leste-sudeste, e ondas de sudeste com 24% de probabilidade. Outros 0,5% das ondas chegam de direção leste e uma porcentagem insignificante de sul-sudeste (0,08%).

Uma vez que as ondas incidentes leste-sudeste predominam, essas ondas foram as únicas consideradas para se descrever o clima de ondas nessa região.

Figura 7.6 – Caracterização do clima de ondas para o ponto de águas intermediárias (ponto DOW) utilizado como a fonte de energia de ondas a serem propagadas para a região costeira através do módulo SMC



Legenda: a) série temporal de altura significativa das ondas H_s ; b) rosa direcional de H_s ; c) probabilidades de H_s para cada porcentagem de probabilidade; d) probabilidade de não exceder H_s ; e) rosa direcional de T_p ; f) localização do ponto DOW

Fonte: Dos autores (2018).

Quadro 7.1 – Clima de ondas calculado pelo componente AMEVA do SMC

Direção	Probabilidade (%)	$H_{S50\%}$ (m)	H_{S12} (m)	$T_{P50\%}$ (s)	T_{P12} (s)
ENE	0.00	1.11	1.13	9.51	10.98
E	0.55	0.90	1.78	7.06	10.97
ESE	75.25	1.37	2.59	7.46	12.12
SE	24.11	1.37	2.48	6.65	8.41
SSE	0.08	1.25	1.86	5.36	11.04

Legenda: As ondas de ESE são predominantes com mais de 75% de probabilidade. $H_{S50\%}$ = ondas registradas em 50% do tempo; H_{S12} = ondas registradas em um evento extremo que ocorre durante 12 horas por ano; $T_{P50\%}$ e T_{P12} = períodos de onda associados respectivamente a $H_{S50\%}$ e H_{S12}

Fonte: Dos autores (2018).

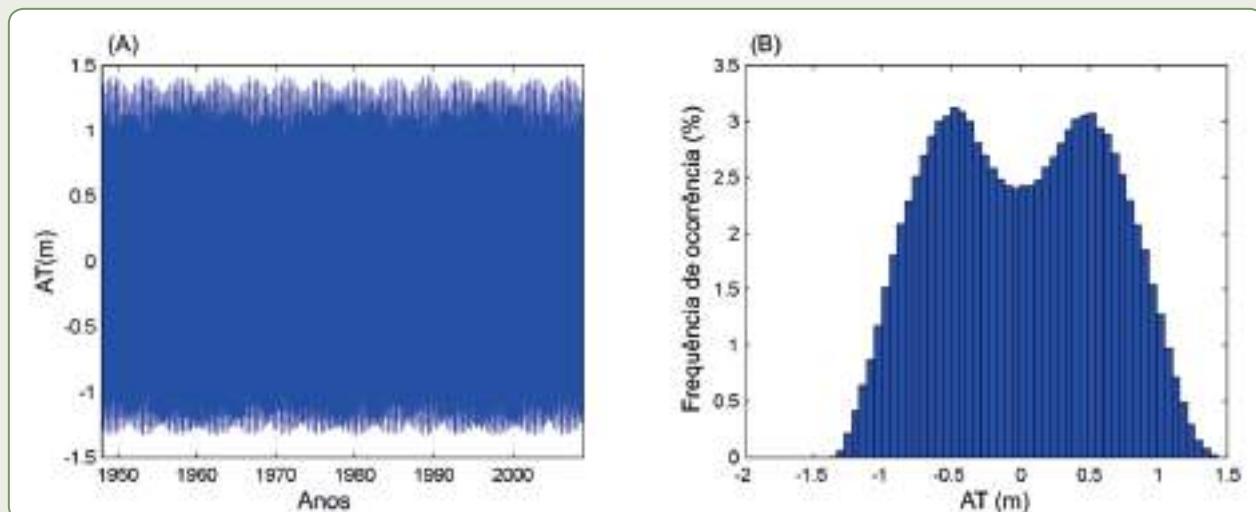
Caracterização do nível do mar

O regime de marés na região é semidiurno, com um número de forma $F = 0,09$ e uma média de 12,42 horas de período, apresentando duas marés altas e duas marés baixas por dia lunar, com pequena desigualdade diurna. De acordo com a classificação de Hayes (1979), as marés do estado de Pernambuco são do tipo forte mesomaré, variando de -0,2 a 2,6 m.

Para caracterizar as marés astronômicas, foram utilizados os dados da base *Global Ocean Tides* (GOT), no ponto de coordenadas 332466E 9118711S, e para as marés meteorológicas um ponto da base de dados *Global Ocean Surge* (GOS) com coordenadas 307266E 908211S.

Os resultados mostram que o regime de oscilação do nível do mar é principalmente governado pela maré astronômica, com oscilações de $\pm 1,4$ m (Figura 7.7), enquanto as marés meteorológicas oscilam na ordem de $\pm 0,1$ m, com influência praticamente desprezível (Figura 7.8).

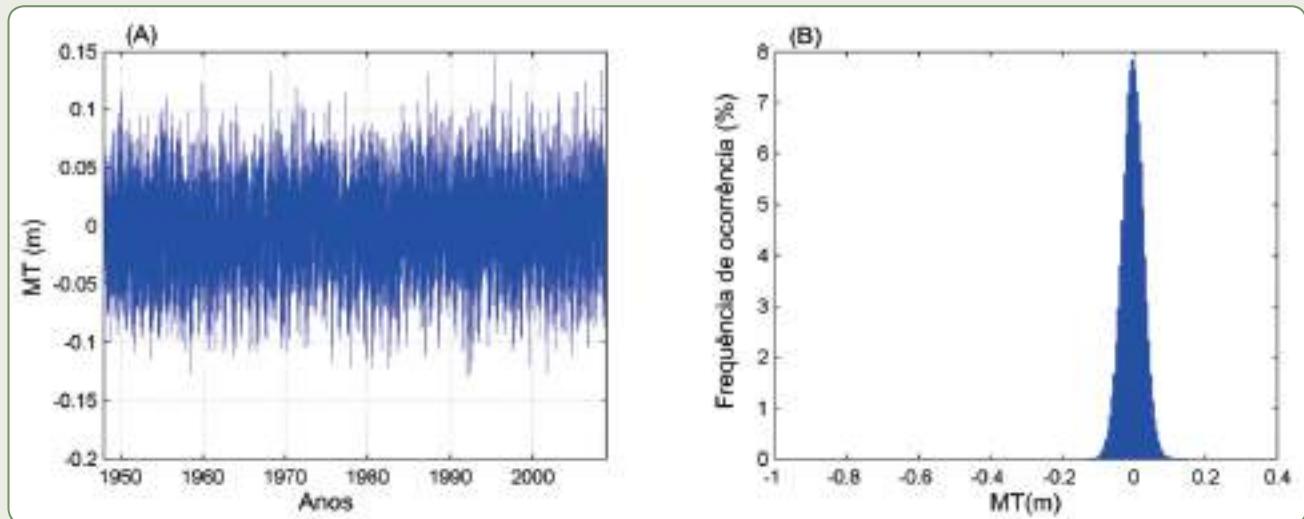
Figura 7.7 – Caracterização maré astronômica



Legenda: a) série histórica; b) histograma

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 7.8 – Caracterização da maré meteorológica



Legenda: a) série histórica; b) histograma

Fonte: Dos autores (2018).

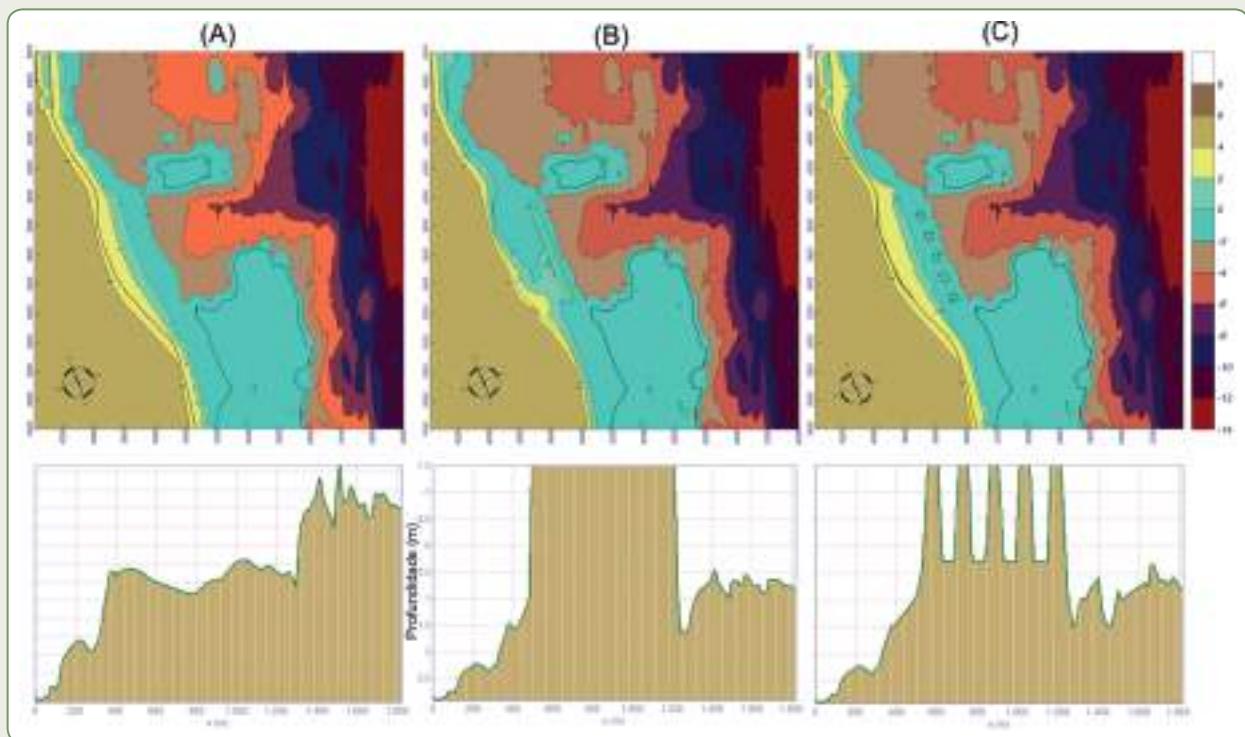
Características dos sedimentos

De acordo com Borba e Manso (1999), os sedimentos da pós-praia da área de estudo apresentam valores de D_{50} entre 0,25 e 0,125 mm (areia fina).

Batimetria

A batimetria de baixa resolução da área de estudo foi extraída da base de dados IH-AMEVA. A esta foram acrescentadas medições de alta resolução obtidas pelo projeto MAI (FINEP/UFPE, 2009). As batimetrias foram então modificadas para refletir as diferentes configurações do quebra-mar, bem como foi preparada uma batimetria sem quebra-mar, utilizando-se o Módulo de Modelagem de Terreno (MMT) do SMC (Figura 7.9).

Figura 7.9 – As três configurações diferentes da área de estudo



Legenda: a) sem quebra-mar; b) antigo quebra-mar; e c) quebra-mar atual

Fonte: Dos autores (2018).

O quadro 7.2 resume os cenários analisados neste estudo.

Quadro 7.2 – Cenários simulados da área de estudo

Cenário	Partes e comprimento do quebra-mar	Ano de conclusão
Antigo	Quebra-mar contínuo com 750 m de extensão	2004
	Quebra-mar segmentado em 5 segmentos de 50 m de comprimento, separados	2013
Atual	100 m entre si	
Sem	Sem quebra-mar	–

Fonte: Dos autores (2018).

RESULTADOS

Ondas, correntes e transporte de sedimentos

Para satisfazer os critérios do método de Booij (1981) que se aplica ao modelo de ondas OLUCA, as ondas propagadas necessariamente têm que estar dentro da faixa de $\pm 50^\circ$ da direção principal de propagação. A propagação de ambas as direções, de sudeste e de leste, estão dentro da faixa de $\pm 30^\circ$

em relação à direção principal, de leste-sudeste, por isso apenas a grade que foi criada para propagar a direção predominante de leste-sudeste foi suficiente para cobrir mais de 99% de todas as direções de entrada de ondas.

Para obter os melhores resultados das simulações, a largura da grade é escolhida de tal forma que a interferência com as fronteiras laterais não afetam a área de interesse, uma vez que a reflexão de algumas das ondas nas fronteiras laterais é um efeito secundário indesejável, porém que normalmente está presente na simulação de ondas. Para melhor simular as condições, uma grade medindo 6.380 m de largura, centrada na área de estudo, foi criada.

Os níveis do mar mais representativos a serem considerados incluem apenas a maré astronômica, uma vez que a maré meteorológica é insignificante. Para este estudo, os níveis do mar considerados são 2,5 m da maré alta e 0,0 m da maré baixa de sizígia, assim como a maré média de 1,25 m.

As simulações foram realizadas para os três cenários utilizados neste estudo (Quadro 7.2), considerando-se ondas típicas e extremas (Quadro 7.1) e os três níveis de maré.

A importância da caracterização do nível do mar nas simulações está relacionada com mudanças na profundidade, o que altera a interação das ondas com o fundo do mar, resultando em variações de altura de onda na zona de arrebentação e, consequentemente, alterando os padrões de ondas-correntes e o transporte de sedimentos.

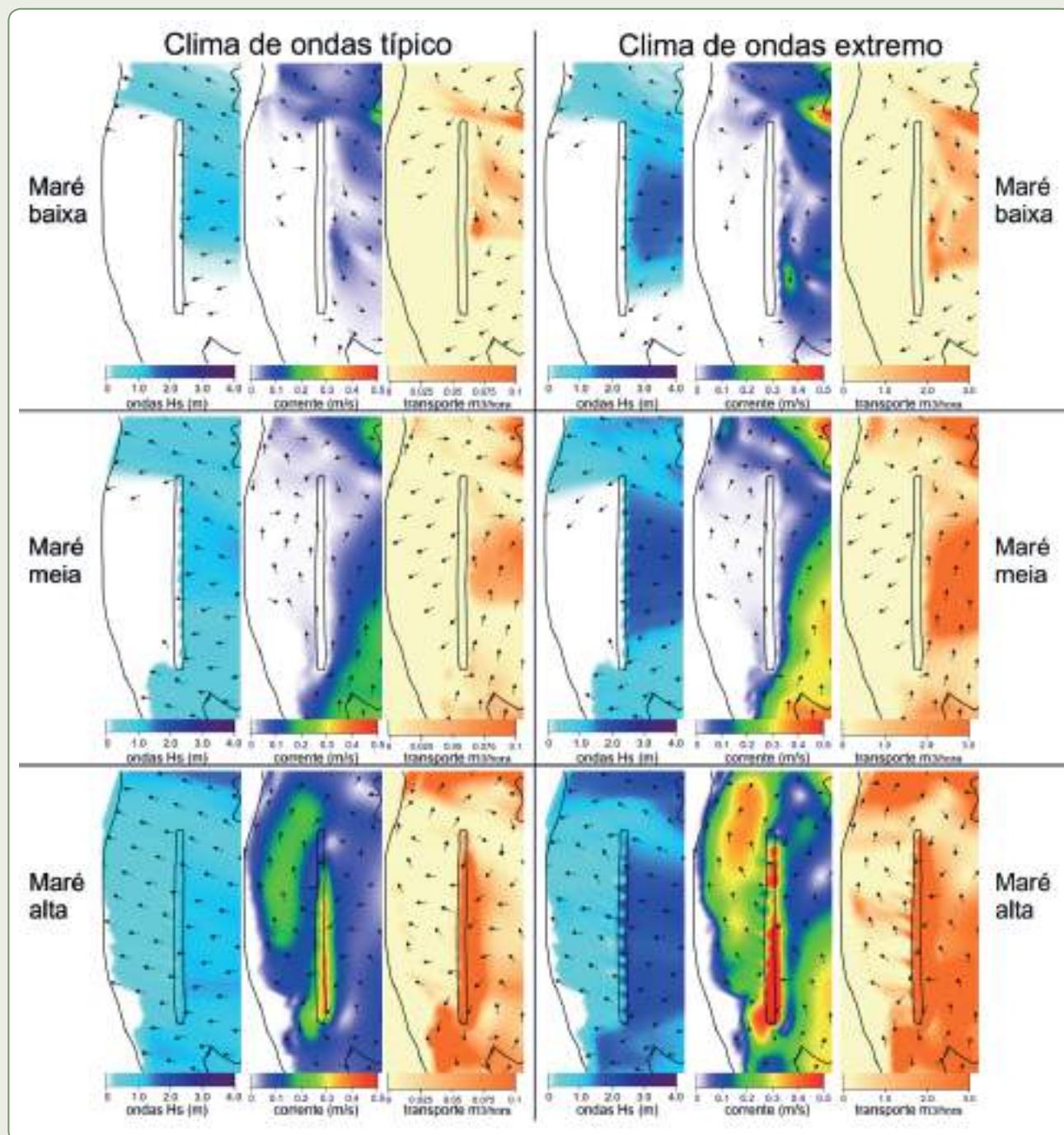
Os resultados da modelagem para o cenário de quebra-mar contínuo mostram uma tendência de acumulação de sedimentos entre o quebra-mar e a praia (Figura 7.10). Essa foi a situação observada nos anos após a construção da estrutura, corroborando a modelagem realizada neste estudo.

Os resultados da simulação para o cenário com a presença da configuração atual do quebra-mar são apresentados na Figura 7.11. E um outro cenário sem o quebra-mar mostra uma tendência para a erosão da linha de costa (Figura 7.12). A comparação dos resultados desses dois cenários é discutida na seção seguinte.

Média anual de transporte de sedimentos

Para os cálculos da média anual do transporte de sedimentos, os estados de mar mais relevantes foram selecionados utilizando a técnica da Máxima Dissimilitude (ou desigualdade máxima). Cerca de 150 estados de mar foram selecionados e propagados até a linha de costa para os três níveis de maré: baixa (0,0 m), média (1,25 m) e alta (2,5 m), utilizando o módulo IH-Dynamics, incluído no SMC-Tools.

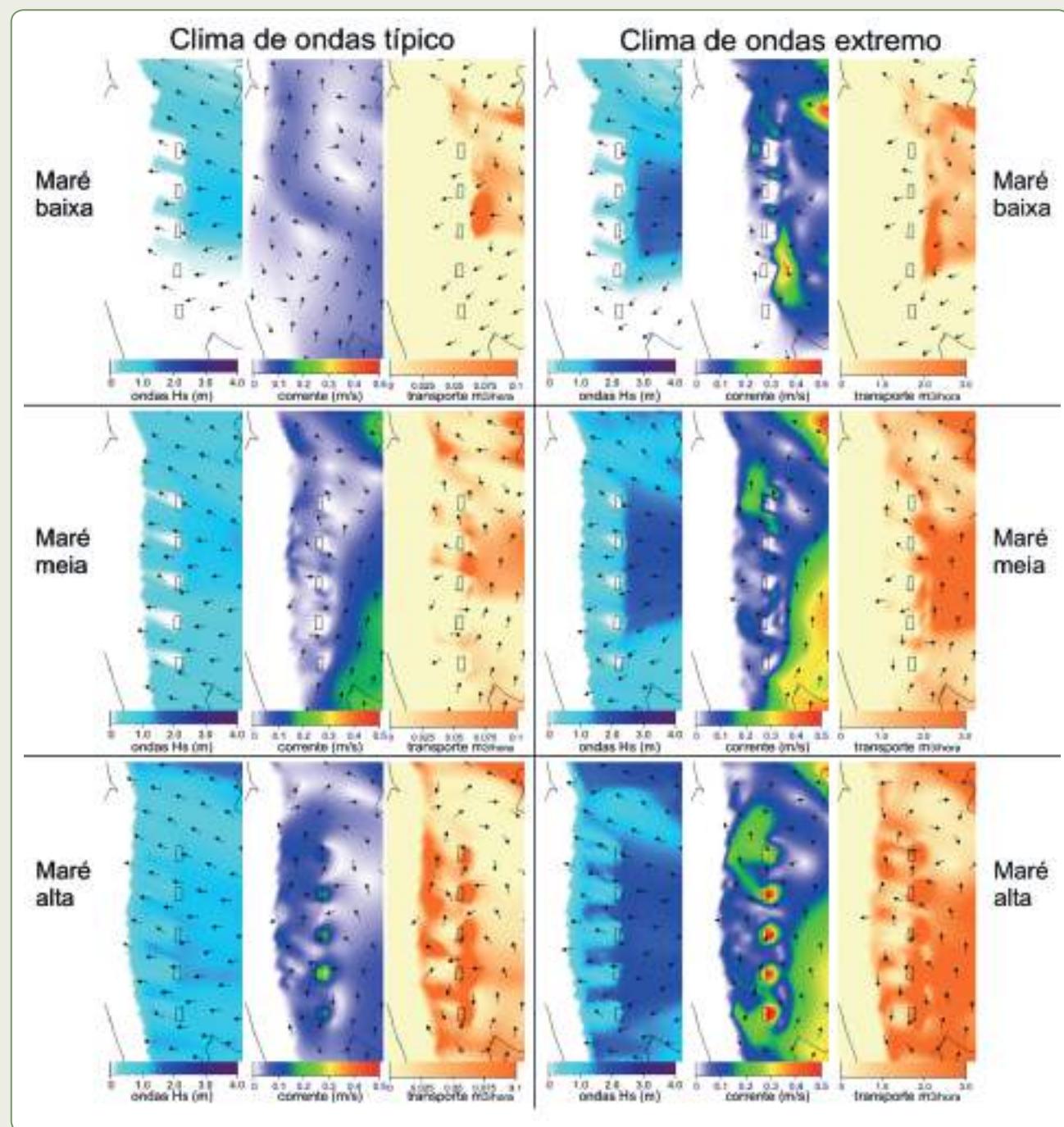
Figura 7.10 – Resultados das simulações para a configuração inicial do quebra-mar, tanto para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) quanto extrema (lado direito) (ver Quadro 7.1)



Legenda: Do topo para baixo as figuras mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada situação são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos

Fonte: Dos autores (2018).

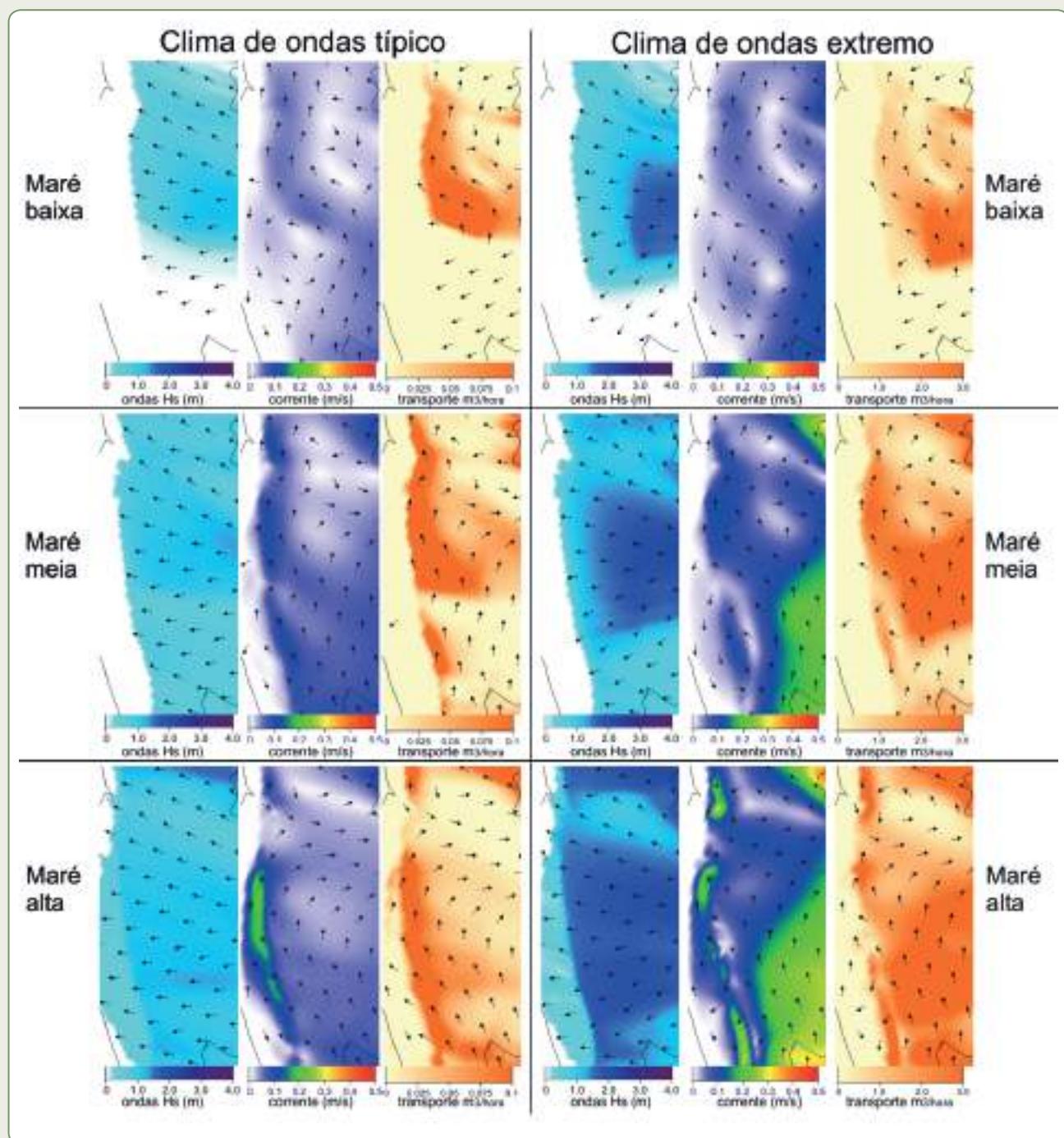
Figura 7.11 – Resultados das simulações para a configuração atual do quebra-mar, para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (ver Quadro 7.1)



Legenda: Do topo para baixo, as figuras mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada situação são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 7.12 – Resultados das simulações para o cenário sem quebra-mar, para as condições climáticas de ondas típica (lado esquerdo) e extrema (lado direito) (ver Quadro 7.1)



Legenda: Do topo para baixo, as figuras mostram os resultados das simulações para a maré baixa, maré intermediária e maré alta. Para cada lado são exibidos os resultados de altura de onda, corrente e transporte de sedimentos para cada condição de clima de ondas

Fonte: Dos autores (2018).

Para a extração dos dados de transporte de sedimentos, são traçados perfis de praia perpendicularmente à linha de costa em pontos de interesse selecionados.

Para a atual configuração do quebra-mar e para o cenário sem quebra-mar, os perfis selecionados estão na mesma posição. Para a configuração de quebra-mar contínuo, os perfis foram traçados, tanto fora como dentro da área protegida pelo quebra-mar para se avaliar as diferenças no transporte de sedimentos nessas regiões.

O transporte de sedimentos é representado por setas desenhadas nas laterais dos perfis de praia, traçadas sobre a imagem de satélite da área de estudo. Usando a convenção padrão de um observador posicionado na praia olhando para o mar, são atribuídos valores positivos para os sedimentos transportados para a direita e negativos para os sedimentos transportados para a esquerda. Os valores de transporte de sedimentos estão apresentados no Quadro 7.3, onde o transporte para sul é positivo, e para norte é negativo.

Os valores estão apresentados na ordem da posição dos perfis de praia de norte para sul, como nas Figuras 7.13 a 7.15.

Como as características das ondas variam ao longo do ano, o sentido do transporte do sedimento também varia. O transporte líquido representa a resultante do transporte total (de ambas as direções).

Os valores apresentados no Quadro 7.3 são os volumes transportados para norte (Q_-), para sul (Q_+) e o transporte líquido (Q).

O transporte líquido anual de sedimentos varia para cada um dos cenários modelados (Figuras 7.13, 7.14 e 7.15), entretanto apresentam semelhanças para os cenários com o quebra-mar atual (Figura 7.14) e sem quebra-mar (Figura 7.15).

Exceto no perfil 2, um transporte líquido de sedimentos para o sul predomina para o cenário com o quebra-mar atual, do mesmo modo que para o cenário sem quebra-mar, ainda que neste último caso os valores sejam de modo geral maiores.

Quadro 7.3 – Valores de transporte de sedimentos, calculados para a configuração atual do quebra-mar e para o cenário sem o quebra-mar, nos perfis de praia dispostos em uma ordem de norte para sul, medidos em 1.000 m³ por ano (valores arredondados)

Perfil	Quebra-mar atual			Sem quebra-mar		
	Q	Q_+	Q_-	Q	Q_+	Q_-
1	626	647	-22	380	394	-13
2	-33	44	-77	-413	858	-414
3	77	95	-18	-133	0.4	-133
4	158	164	-6	11	24	-12
5	225	226	-1	228	233	-4
6	531	533	-1	392	392	-0.6
7	803	831	-28	248	248	-0.5

Fonte: Dos autores (2018).

De outro lado, os valores do transporte de sedimentos para o norte são maiores na maior parte da linha de costa no cenário sem quebra-mar, em comparação com o cenário com o quebra-mar atual. Esses valores aumentam no sentido norte, onde a exposição às ondas vindas de leste-sudeste

aumenta, devido à menor proteção nesse trecho oferecida pelos arrecifes em franja (Figuras 7.9 e 7.12).

A configuração atual do quebra-mar, aparentemente, oferece uma proteção razoável (Figura 7.11) com menos transporte de sedimentos para o norte nas áreas central e norte da região estudada.

Os perfis de fronteira 1 e 7 mostram grande transporte para o sul, em ambos os casos, devido à influência dos arrecifes em frente, produzindo refração e difração das ondas.

O transporte líquido anual de sedimentos, calculado para a antiga configuração do quebra-mar (Figura 7.13), mostra o efeito de retenção de sedimentos que ele provoca, acarretando erosão do litoral ao norte.

Na área protegida interna ao antigo quebra-mar, o transporte de sedimentos é ínfimo, e em sentidos opostos, com uma tendência predominante dos sedimentos se moverem para o sul, em direção ao saliente que se formou na ocasião. Desse modo, essa área funcionava como uma armadilha, capturando e acumulando o sedimento que então se movia para o interior dela.

Figura 7.13 – Transporte líquido anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração do quebra-mar antigo



Legenda: Por convenção, o transporte de sedimento para o sul é definido como positivo e representado por uma seta magenta. O transporte para o norte é negativo e representado por uma seta amarela. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em m³/ano), com o transporte líquido mostrado à direita de cada linha de perfil de praia (em m³/ano)

Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÕES

Os resultados das simulações numéricas para as diferentes configurações do quebra-mar apresentaram-se compatíveis com as mudanças observadas na área de estudo. A ferramenta numérica utilizada neste estudo contribui para projetos que visam minimizar os impactos da erosão costeira.

Figura 7.14 – Transporte líquido anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração atual do quebra-mar



Legenda: Por convenção, o transporte de sedimento para o sul é definido como positivo, e representado por uma seta magenta. O transporte para o norte é negativo e representado por uma seta amarela. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em m³/ano), com o transporte líquido mostrado à direita de cada linha de perfil de praia (em m³/ano)

Fonte: Dos autores (2018).

Comparando os resultados das simulações para os cenários com o quebra-mar atual com o cenário sem quebra-mar, não fica ainda claro se a configuração atual irá resultar em uma proteção eficiente contra a erosão.

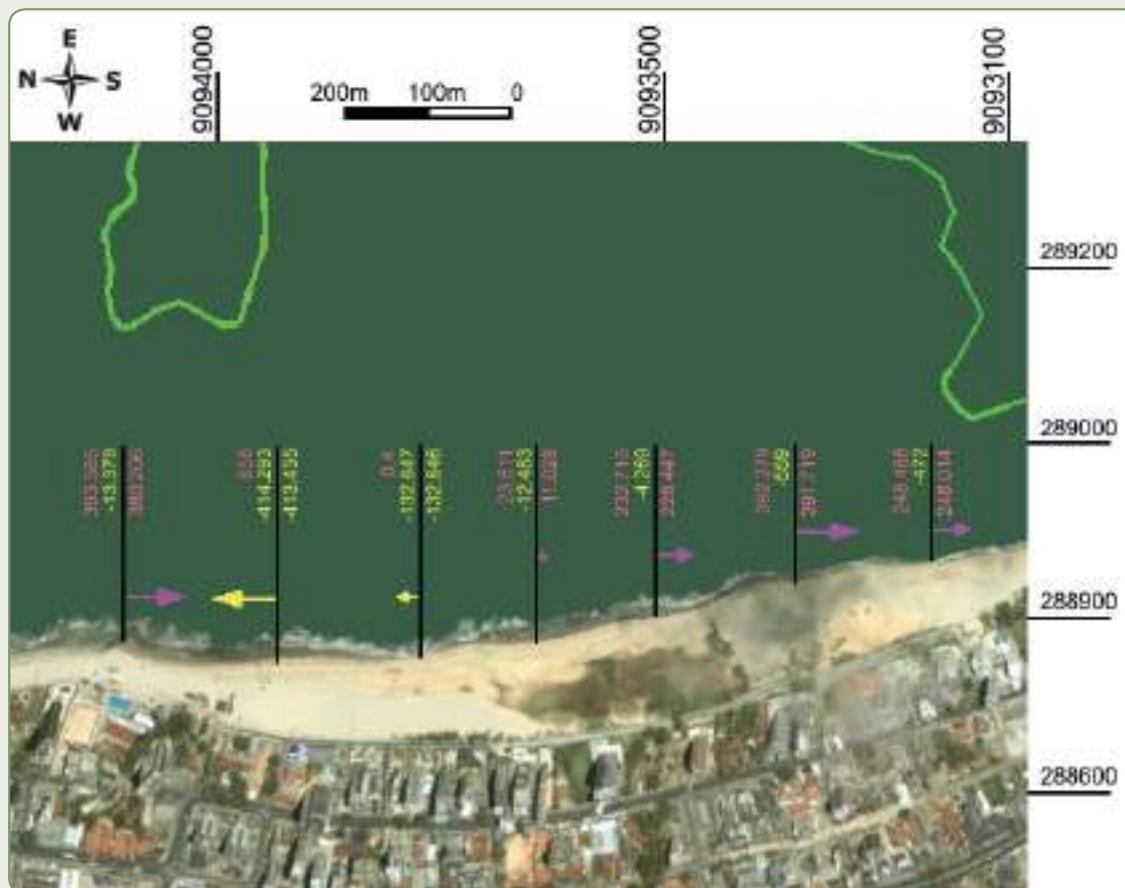
Em comparação com o cenário sem quebra-mar, as simulações mostram que com o quebra-mar atual verifica-se uma grande redução no transporte de sedimentos na área ao norte. Entretanto, a divergência de transporte de sedimentos observada na área central deve provavelmente resultar em erosão a longo prazo.

A mesma tendência é verificada no trecho sul do quebra-mar. De fato, o transporte de sedimentos para o sul é ainda maior quando comparado ao cenário sem quebra-mar. Isso pode reduzir dramaticamente a disponibilidade de sedimentos na área, resultando em maior erosão costeira no futuro.

Por outro lado, verifica-se uma melhoria relacionada com a modificação do quebra-mar para a sua configuração atual. As aberturas criadas no quebra-mar contínuo restabeleceram o transporte de sedimentos, eliminando assim a armadilha criada pela instalação do quebra-mar original.

Com a circulação costeira restaurada, existe ainda a possibilidade de mudanças adicionais na geometria da linha de costa, já que a região foi pouco exposta às ondas de inverno mais energéticas e, portanto, com maior potencial de remodelar o litoral em direção a um novo equilíbrio.

Figura 7.15 – Transporte líquido anual de sedimentos em perfis de praia selecionados ao longo da área de estudo para a configuração sem quebra-mar



Legenda: Por convenção, o transporte de sedimento para o sul é definido como positivo e representado por uma seta magenta. O transporte para o norte é negativo e representado por uma seta amarela. Os números à direita mostram o transporte anual para cada direção (em m³/ano), com o transporte líquido mostrado à direita de cada linha de perfil de praia (em m³/ano)

Fonte: Dos autores (2018).

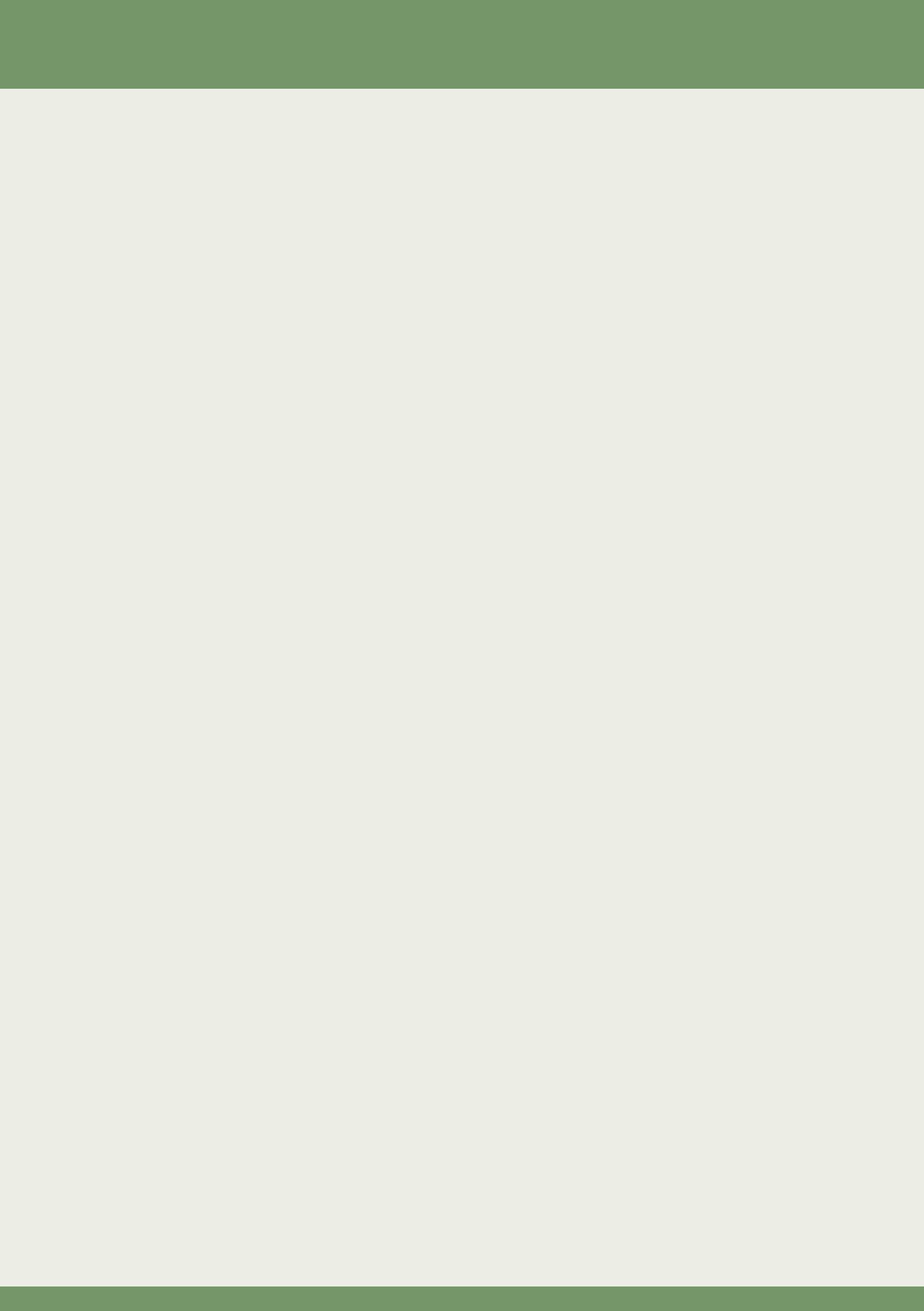
Este trabalho analisou, utilizando a modelagem numérica, as mudanças na geometria da linha de costa resultantes da modificação do antigo quebra-mar na Praia de Candeias. Ele também exemplifica o valor da modelagem costeira para prever as mudanças na morfologia da praia, como resultado do desenvolvimento costeiro planejado, e convida a futuras simulações através de modelagens, antes de realizar quaisquer outros desenvolvimentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) (Projeto APQ-1056-1.08/15). Esta pesquisa também foi apoiada pelo Projeto “Estudo de caso do Sistema de Modelagem Costeira Brasileira (SMC-BRASIL) em Pernambuco” – SEDR/MMA, SEMAS, CPRH e UFPE (Convênio nº 74/2013).

REFERÊNCIAS

- BOOIJ, N. **Gravity waves on water with non-uniform depth and current.** 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Geociências) – Delft University of Technology, Delft, 1981.
- BORBA, A. L. S.; MANSO, V. do A. V. **Estudos sedimentológicos, morfodinâmicos e da vulnerabilidade das praias da Piedade, Candeias e Barra das Jangadas – Municípios do Jaboatão do Guararapes.** Recife: UFPE, 1999.
- COSTA, M. B. S. F. **Influência da estrutura recifal na transformação das ondas do litoral de Recife e Jaboatão dos Guararapes/PE – Brasil.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2010.
- DALLY, W. R.; DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. Wave height variation across beaches of arbitrary profile. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 6, p. 11917-11927, 1985.
- EDWARDS, B. L.; NAMIKAS, S. L. Changes in shoreline change trends in response to a detached breakwater field at Grand Isle, Louisiana. **Journal of Coastal Research**, v. 27, n. 4, p. 698-705, 2011.
- FINEP/UFPE. **Monitoramento ambiental integrado (MAI-PE).** Recife: [s.n.], 2009.
- HAYES, M. O. Barrier island morphology as a function of tidal and wave regime. In: LEATHERMAN, S. P. (Org.). **Barrier islands, from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico.** New York: Academia Press, 1979. p. 1-27.
- KENCH, P. S.; BRANDER, R. W. Wave processes on coral reef flats: Implications for reef geomorphology using Australian case studies. **Journal of Coastal Research**, v. 22, n. 1, p. 209-223, 2006.
- LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. **Journal of Geophysical Research**, 1970.
- MARRONI, E. V.; ASMUS, M. L. **Gerenciamento costeiro:** uma proposta para o fortalecimento comunitário na gestão ambiental. Pelotas: USEB, 2005.
- MUEHE, D. Definição de limites e tipologias da orla sob os aspectos morfodinâmico e evolutivo. **Subsídios para um projeto de gestão/Brasília.** Brasília: MMA, MP, 2004.
- NEVES, C. F.; MUEHE, D. Potential impacts of sea-level rise on the Metropolitan Region of Recife, Brazil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, n. 14, p. 116-131, 1995.
- ROBERTS, H. H.; MURRAY, S. P.; SUHAYDA, J. M. Physical processes in a fringing reef system. **Journal of Marine Research**, v. 33, n. 2, p. 233-260, 1975.
- SALLINGER, A. H.; HOLMAN, R. A. Wave energy saturation on a natural beach of variable slope. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. 6, p. 11939-1944, 1985.



UTILIZAÇÃO DO SMC-BRASIL PARA SIMULAÇÃO DE UM RECIFE ARTIFICIAL MULTIFUNCIONAL ADEQUADO PARA A PRÁTICA DO SURFE E PROTEÇÃO COSTEIRA NA PRAIA DE CAMBURI, VITÓRIA (ES)

Fabio Pavan Piccoli
Pablo Medeiros Jabor
Felipe Azevedo Bastos
Igor Domingues Venancio
Julio Tomás Aquije Chacaltana

RESUMO

Neste trabalho o sistema de modelos SMC-Brasil é utilizado para analisar as mudanças ocasionadas no ambiente costeiro da Praia de Camburi, Vitória (ES), decorrentes da implantação de um recife artificial multifuncional para a prática do surfe e proteção costeira. Usando o SMC-Brasil, foi simulada a propagação de ondas regulares e irregulares de E-SE e SE em condições naturais (sem o recife artificial) e com a implantação do recife artificial multifuncional. Somente os valores modais das características das ondas, que representam o estado típico da região da Baía do Espírito Santo, foram propagados até a Praia de Camburi. Os resultados numéricos revelam que há aumento na altura da onda sobre o recife artificial, propício para a prática do surfe, e que o recife artificial adianta a quebra da onda e cria correntes em direção à praia que terminam bloqueando a corrente longitudinal, o que pode indicar que o recife artificial pode funcionar como um elemento de proteção à erosão costeira.

Palavras-chave: Recife artificial multifuncional. Surfe. Proteção costeira. Modelagem numérica. Turismo.

INTRODUÇÃO

Por meio do Acordo de Cooperação Técnica celebrado pelos governos brasileiro e espanhol foi disponibilizada à sociedade brasileira, em outubro de 2013, a ferramenta computacional de apoio à gestão costeira intitulada Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil). Essa ferramenta foi desenvolvida no âmbito do projeto Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira, entre a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), com a participação do Ministério do Meio Ambiente através da Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável (MMA/SEDR), da Secretaria do Patrimônio da União do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (SPU/MP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), da Universidade de São Paulo (USP), da Universidade da Cantábria (IHC/Espanha) e do Instituto Ambiental Brasil Sustentável (IABS) (OLIVEIRA, 2013).

No âmbito do estado do Espírito Santo, convênios foram celebrados entre a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e o Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN) com o Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), em 2013. Este trabalho é resultado do esforço colocado pelos responsáveis na execução dos convênios institucionais para aplicar a ferramenta SMC-Brasil na avaliação do impacto ambiental decorrente da instalação de alguma obra marítima no ambiente costeiro ou pela mudança no clima de ondas de gravidade que atingem a costa do estado do Espírito Santo.

A erosão costeira é um dos maiores problemas para as diversas atividades que se desenvolvem em cidades costeiras, como, por exemplo, a indústria de turismo. Muitos projetos já foram elaborados para proteger uma praia da erosão, tais como a construção de paredes marinhas (*seawall*), espigões (*groins*) e quebra-mares (*breakwaters*) (PRASETYA; BLACK, 2003). Todas essas estruturas têm sido construídas com a proposta de proteger a linha de costa dos efeitos que causa a erosão, sem consideração de algum outro aspecto importante, como a estética paisagística ou as atividades diárias da população local, como as atividades de lazer na área costeira, que muitas vezes não são consideradas.

Na indústria de turismo, atualmente há uma forte tendência e um maior interesse dos turistas para locais com atrativos naturais e com atividades de aventura. Grande parte dos turistas prefere uma praia natural sem a interferência de estruturas que influenciem na estética paisagística. Se o número de turistas diminui, o rendimento e o número de empregos também diminuem, o que afeta o crescimento da economia local.

Por isso, alguns países como Austrália, Nova Zelândia, Índia e Inglaterra já apresentaram e executaram propostas para solucionar os problemas de erosão costeira com a implantação de uma estrutura que, além de ser “invisível” para os usuários da praia, venha lhes promover condições de lazer, seja habitat para os organismos marinhos e desempenhe certa proteção da linha de costa. Essas estruturas, denominadas de recifes artificiais de uso múltiplo ou multifuncionais (RAM), basicamente são quebra-mares submersos que são usados para estabilizar uma praia. Elas apresentaram um melhor custo/benefício (BLACK, 2004), em comparação com a construção de espigões de fragmentos de rochas.

Uma das principais fontes de energia que atua na região costeira provém da ação das ondas, que são responsáveis pela alteração morfodinâmica da linha de costa através da mobilização de sedimentos. As ondas geradas pelo vento em águas profundas, ondas do tipo *swell*, quando alcançam a plataforma continental e propagam em direção à costa são influenciadas pela morfologia do fundo e pela profundidade da coluna d’água. As modificações nas ondas são ocasionadas pelos processos de refração, difração, reflexão, empinamento e quebra, que alteram as características das ondas (forma, altura, comprimento, velocidade e direção) durante a sua propagação em direção à linha de costa (MUEHE, 1996; SILVESTER; HSU, 1997; SILVA et al., 2004).

Próximo da linha de costa, dependendo da intensidade das modificações nas ondas, pode ocorrer a instabilidade na crista da onda, ocasionando sua quebra e produzindo uma zona de forte turbulência na coluna d'água. Assim, o fluxo de energia é dissipado, resultando numa diminuição na altura da onda que se propaga em direção à costa (FREDSØE; DEIGAARD, 1997). A turbulência, causada pela quebra da onda, pode mobilizar e colocar os sedimentos em suspensão, os quais serão transportados pelas correntes do sistema de circulação costeira, tais como as correntes longitudinais (*longshore currents*) e as correntes de retorno (*rip currents*) (LIN; LIU, 1998).

É bem conhecido que as praias possuem a função natural de sistema de defesa da costa e que estão expostas à ação natural da onda, variação do nível médio do mar e ações antrópicas. A costa capixaba não é um caso particular e vem sentindo os efeitos da erosão em consequência da ocupação não planejada e desordenada. Tendo em vista esse caráter antrópico, fica clara a necessidade de proteção, restauração e manutenção dos ecossistemas costeiros do estado quando submetidos a um estresse externo.

As intervenções antrópicas realizadas na Baía do Espírito Santo (BES), e particularmente na Praia de Camburi, podem ter ocasionado uma redução da qualidade da balneabilidade da praia, alterando a relação de uso desse recurso natural pela população. Os serviços prestados pela praia, como natação, banho de sol e pesca, podem ter sido prejudicados ao longo da ocupação, reduzindo o potencial turístico da orla.

A Praia de Camburi é o principal cartão postal do município de Vitória, no estado de Espírito Santo, e passou por diversas intervenções que tiveram início na década de 1960 com a intensificação do processo de crescimento portuário, principalmente com a construção do píer de Tubarão. Desde então, a Praia de Camburi vem sendo submetida a obras de engordamento artificial, para a reconstrução dos perfis praiais e a construção de espiões, devido aos processos erosivos nela instalados.

No entanto, existem outras alternativas técnicas capazes de oferecer proteção à costa, sem a necessidade de investir grandes montantes de recursos financeiros, e maximizar o potencial turístico da praia. Neste trabalho é proposta a implantação de um recife artificial submerso como uma boa alternativa para atender às diversas finalidades, tanto as de proteção à erosão costeira como a de formação de ondas de qualidade para a prática do surfe e a valorização ambiental com ganhos para o setor turístico.

Um recife artificial submerso e raso próximo à Praia de Camburi pode ser eficaz na dissipaçāo de energia das ondas *swell* e também maximizar a qualidade da onda para a prática de surfe durante as marés mais altas com incidência de ondas de pequenas amplitudes. Assim, eventuais alterações no campo de ondas ocasionadas pela instalação do recife artificial podem, em tese, além de impulsionar a prática efetiva do esporte, tornar Vitória protagonista no cenário do surfe estadual e nacional. Dessa forma seria possível um incentivo à criação de atividades que configuram a “indústria do surfe” e que se convertam em um efetivo (e novo) vetor para o desenvolvimento econômico da capital capixaba.

O presente estudo visa a aplicação do Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil) para a região da Baía do Espírito Santo, localizada na região central do estado do Espírito Santo. Como parte estratégica, a Praia de Camburi, no município de Vitória, foi escolhida para a instalação de um recife artificial multifuncional para protegê-la da erosão costeira e para aumentar a qualidade da onda para o surfe.

SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC-BRASIL)

Os modelos numéricos de ondas têm-se mostrado uma importante ferramenta para simular a propagação de ondas de gravidade quando elas viajam em direção à região costeira, para compreender os processos erosivos instalados numa região específica da linha de costa ou para entender o comportamento das ondas quando interagem com estruturas costeiras como portos, marinas, quebra-mares ou recifes artificiais.

Os modelos de propagação de ondas do SMC-Brasil que realizam a propagação de ondas regulares e irregulares, respectivamente denominados de OLUCA-MC e OLUCA-SP, consideram os efeitos de refração, de difração (apenas da direção transversal à propagação da onda), interação com correntes e dissipação de energia devido à quebra da onda, porém não consideram o fenômeno de reflexão. O fenômeno de refração é o processo em que a crista da onda muda sua direção de propagação e tende a se tornar paralela às linhas de mesma profundidade (isóbatas) à medida que se aproxima da costa. Já a difração é ocasionada pela presença de algum obstáculo, como ilhas, estruturas artificiais, promontórios, entre outros, o qual faz a direção de propagação das ondas se espalhar radialmente para a região protegida pela estrutura, a zona de sombra. Portanto a ação conjunta desses processos é de grande importância para o estudo da interação das ondas com o ambiente costeiro, e o modelo SMC-Brasil é uma ferramenta de baixo custo computacional que pode ser aplicada a grandes áreas costeiras onde os fenômenos de reflexão podem ser negligenciados.

A partir dos dados de saída dos modelos de ondas, anteriormente citados, o SMC-Brasil apresenta dois modelos, COPLA-MC e COPLA-SP, que solucionam as equações de conservação dentro da zona de arrebentação para calcular a magnitude e a direção das correntes geradas pelas ondas. Por fim, o SMC-Brasil se completa para o estudo de morfodinâmica costeira com a inclusão do modelo EROS, também considerado, para casos de ondas regulares, EROS-MC, e para casos de ondas irregulares, EROS-SP, que consiste em um modelo de evolução morfológica de uma praia, devido à ação de ondas e correntes na zona de arrebentação.

O modelo de propagação de ondas do SMC-Brasil é baseado no modelo desenvolvido por Kirby e Dalrymple (1983), é um modelo de fraca não linearidade e considera a ação combinada dos processos físicos de refração e difração, além de considerar o empinamento da onda e a dissipação de energia das ondas num leito com declividade suave (Modelo *mild slope* de Berkhoff). Nesse modelo, a reflexão das ondas por obstáculos não é considerada.

Para o modelo linear de Berkhoff, Booij (1983) concluiu que para declives menores de 1:3 o modelo apresenta resultados viáveis e que para declives ligeiramente superiores o modelo ainda é capaz de calcular a variação da altura de onda e os coeficientes de refração, porém os resultados tornam-se menos precisos.

No modelo de declividade suave foram implementados dois tipos de condições de contorno laterais: i) a condição de contorno aberta, onde a onda propaga para fora do domínio; e ii) condição de contorno fechada, adicionando condição de reflexão total. As equações de governo para a amplitude são solucionadas por técnicas de diferenças finitas usando o método implícito de Crank-Nicholson. A altura da onda, H , a direção da onda, θ , e a elevação da superfície livre, η , são calculados em cada ponto da malha (SILVA; TEIXEIRA; CALLIARI, 2014).

As equações de governo do modelo são baseadas na expansão de Stokes para o problema de ondas de gravidade e incluem a terceira ordem para a velocidade de fase da onda. A solução numérica do modelo envolve o uso da aproximação parabólica de Kirby (1986a), onde a maior precisão de propagação e a geração de ondas estão restritas a um espalhamento na direção da onda de $\pm 70^\circ$ em relação ao eixo de propagação da onda, que geralmente coincide com o eixo x.

O sistema de equações algébricas para a amplitude da onda resulta em uma matriz tridiagonal, a qual é rapidamente invertida. A discretização espacial do domínio é realizada em uma malha regular retangular.

A equação de declividade suave de Berkhoff é escrita em termos de elevação da superfície livre, $\eta(x, y)$, como:

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \eta) + \sigma^2 \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (\text{Eq. 8.1})$$

onde $C = \sqrt{g/k \tanh kh}$ é a celeridade da onda e $C_g = C(1+2kh/\sinh 2kh)/2$ é a velocidade de grupo, a profundidade local é dada por $h(x, y)$, g é a aceleração devida à gravidade e ∇_h é o gradiente espacial horizontal. O número de onda local, $k(x, y)$, está relacionado com a frequência angular da onda, σ , e com a profundidade, h , através da relação dada pela expressão:

$$\sigma^2 = gk \tanh kh \quad (\text{Eq. 8.2})$$

O efeito da corrente foi incluído por Booij (1983) no modelo Berkhoff através de uma aproximação lagrangiana, que considera que as correntes são fracas. A interação não linear que considera a interação das ondas com fortes correntes foi introduzida por Kirby e Dalrymple (1983), escrita abaixo como:

$$(C_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)(C_g + U)A + \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V}{\sigma} \right) \right] A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[(p - V^2) \frac{\partial A}{\partial y} \right] - \sigma \frac{k^2}{2} D |A|^2 A = 0 \quad (\text{Eq. 8.3})$$

onde $p = CC_g$ e \bar{k} é o número de onda de referência, determinado como o número de onda médio ao longo de y , A é a amplitude complexa relacionada com $\eta = Ae^{i(kx-\sigma t)}$, U é a componente da velocidade média da corrente paralela ao eixo x e V é a componente da velocidade média paralela ao eixo y . O coeficiente D do termo não linear incluído na equação (8.3) é definido pela expressão abaixo:

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \sinh^4 kh} \quad (\text{Eq. 8.4})$$

Considerando um fluido não rotacional e não viscoso, Kirby e Dalrymple (1985) desenvolveram uma nova versão do modelo parabólico que inclui fortes correntes, que desconsidera a influência de onda longa e a dependência de A no tempo. Aplicando o princípio “Minimax”, a equação de Kirby e Dalrymple (1985) foi estendida por Kirby (1986b), permitindo ângulos de propagação maiores em relação ao eixo x . A equação estendida que governa a refração, a difração e o empinamento de um componente discreto da onda é escrita a seguir:

$$\begin{aligned}
 & (C_g + U) \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)(C_g + U)A + \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g + U}{\sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V}{\sigma} \right) \right] A \\
 & - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[(p - V^2) \frac{\partial A}{\partial y} \right] + \frac{i}{2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[UV \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[UV \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\
 & + \frac{i}{4k} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y} \left[(p - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + 2i \frac{\partial}{\partial x} \left[\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] \right\} \\
 & - \frac{\beta}{4} \left\{ 2i\omega U \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) + 2i\sigma V \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) - 2UV \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right\} \\
 & - \frac{\beta}{4} \frac{\partial}{\partial y} \left[(p - V^2) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \right] + \frac{i}{4k} \left[\frac{\partial}{\partial y} (\omega V) + 3 \frac{\partial}{\partial x} (\omega U) \right] \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{\sigma} \right) \\
 & + \frac{\gamma A}{2} + \frac{i\sigma}{2} G(|A|, kh) A = 0
 \end{aligned} \tag{Eq. 8.5}$$

Sendo

$$\beta = \frac{1}{k^2} \frac{\partial k}{\partial x} + \frac{1}{2k^2(p - U^2)} \frac{\partial}{\partial x} \left[k(p - U^2) \right] \tag{Eq. 8.6}$$

onde $G(|A|, kh)$ é uma função não linear com a amplitude, ω é a frequência angular absoluta, σ é a frequência angular intrínseca e γ está relacionado com dissipação de energia por atrito de fundo e quebra da onda.

Essa equação é utilizada pelo modelo de ondas regulares OLUCA-MC e irregulares OLUCA-SP. Para maiores informações sobre o SMC-Brasil, o leitor pode consultar os manuais alocados no endereço <http://smcbrasil.ihcantabria.com/>.

O sistema de circulação costeira na zona de quebra é dominado pelas forças induzidas pela ação da onda devido à redução de profundidade: o colapso da onda gera um excesso de quantidade do movimento na zona de arrebentação (tensores de radiação), que são responsáveis pela formação das correntes costeiras derivadas pelas ondas. Para solucionar essa circulação costeira, o modelo SMC-Brasil conta com os modelos COPLA-MC e COPLA-SP, os quais simulam a circulação devido à ação de ondas regulares (monocromáticas) e irregulares (randômicas), respectivamente. O modelo COPLA é deduzido a partir das equações de Navier-Stokes sob as hipóteses do fluido homogêneo, incompressível e de massa específica constante. Também é considerado que a variação da profundidade é suave, as flutuações turbulentas devido às ondas são desprezíveis, a força de Coriolis é negligenciada e não ocorre interação das correntes com o trem de ondas. Para mais detalhes, ver o manual de referência do COPLA.

O modelo morfodinâmico (EROS) trata das mudanças na profundidade de uma praia devido a ação de ondas e correntes geradas na zona de arrebentação. O modelo EROS soluciona as equações do transporte de sedimentos dentro da zona de surfe, bem como as variações na profundidade, para prever a evolução morfológica do leito marinho submetida à ação de ondas e correntes geradas pela quebra da onda. Para isso são necessários como entrada do modelo EROS os dados do campo de ondulação (altura da onda e direção da frente) calculados pelo modelo OLUCA-MC ou pelo modelo OLUCA-SP,

os dados do campo de correntes geradas pela quebra da onda calculados pelo modelo COPLA-MC ou pelo modelo COPLA-SP e os dados das características do sedimento da praia. Para maiores detalhes o leitor pode consultar o manual de referência do EROS.

ÁREA DE ESTUDO

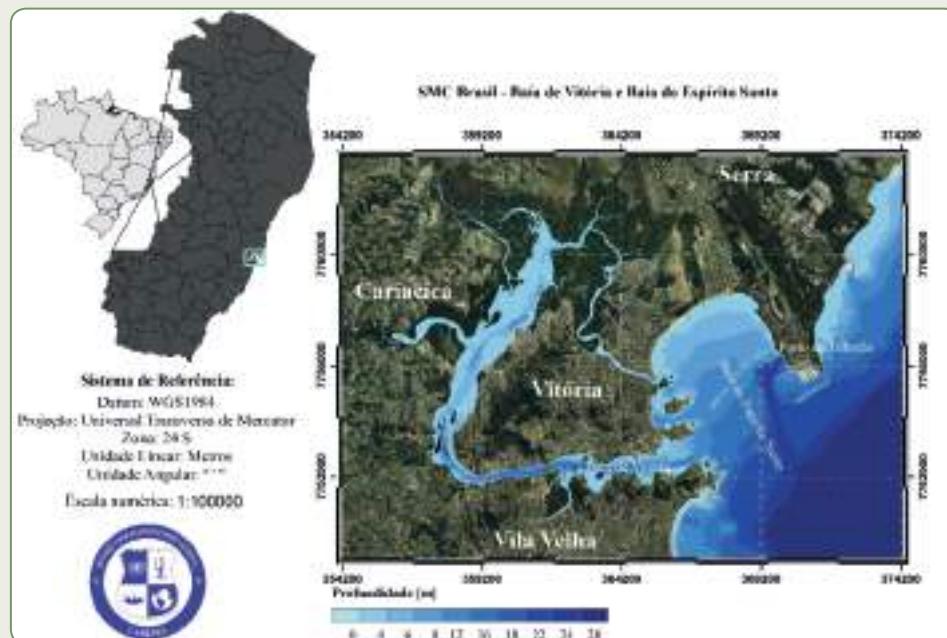
A região deste estudo consiste na Baía do Espírito Santo (BES), localizada no município de Vitória, capital do estado do Espírito Santo, e encontra-se limitada pelas coordenadas geográficas de latitudes $20^{\circ}16'S$ e $20^{\circ}19'S$ e de longitudes $40^{\circ}14'W$ e $40^{\circ}18'W$. Tal região é caracterizada como um corpo semifechado de água, cuja entrada está voltada para SE, e possui aproximadamente 5 km de largura, entre o porto de Tubarão e a parte continental do município de Vila Velha (Figura 8.1).

Estudos de Albino et al. (2001) observaram que ocorrem maiores difração e dissipação de energia das ondas a partir do porto de Tubarão e na entrada da Baía do Espírito Santo. A Ponta de Tubarão protege a baía contra as ondas incidentes de NE, que, através do processo de difração, rotaciona essas ondas para SE ou E-SE dentro da baía, próximo à linha de costa.

Esse redirecionamento da onda devido à morfologia da região também foi observado no trabalho de Soares e Chacaltana (2003), no qual, através da modelagem dos processos de refração e de difração da onda (Figura 8.2), mostraram que os raios da onda tendem a incidir perpendicularmente à linha de costa e que ocorre uma concentração de energia na área entre a Ilha do Socó e o espião central. Essa região é propícia para a implantação do protótipo da estrutura submersa e para a avaliação do comportamento das ondas na Praia de Camburi.

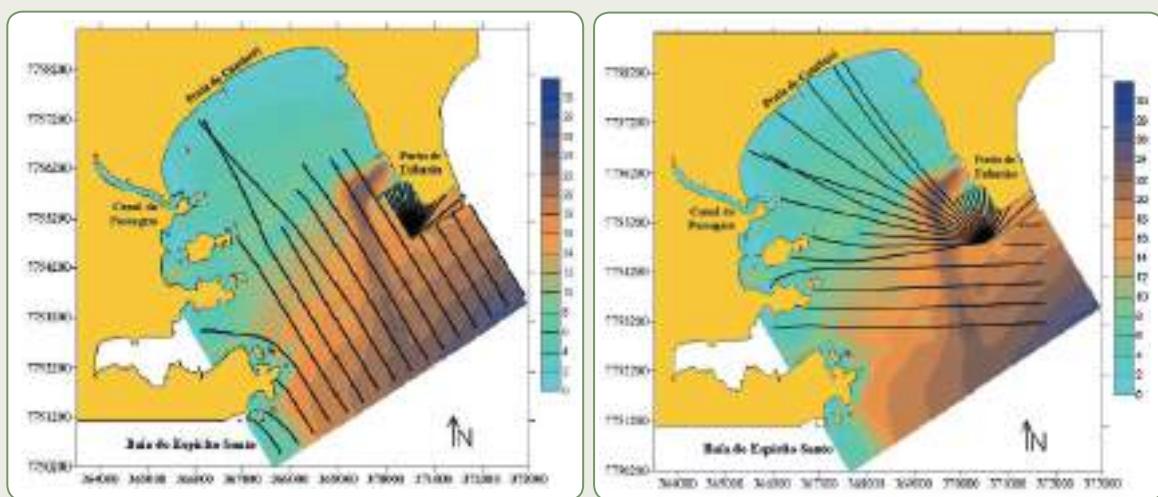
Uma classificação geral do clima de ondas no Espírito Santo foi realizada por Piumbini (2009) utilizando como referência dados de onda de reanálise do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) com periodicidade de 6 h, entre setembro de 1957 e agosto de 2002, cuja localização está entre $23^{\circ}/17,5^{\circ}$ S e $40,5^{\circ}/35^{\circ}$ W. Analisando os dados com valores acima de 500 ocorrências de ondas, Piumbini (2009) encontrou que as ondas são predominantes entre 0 e 210° (Figura 8.3).

Figura 8.1 – Localidade da Baía do Espírito Santo



Fonte: Dos autores (2018).

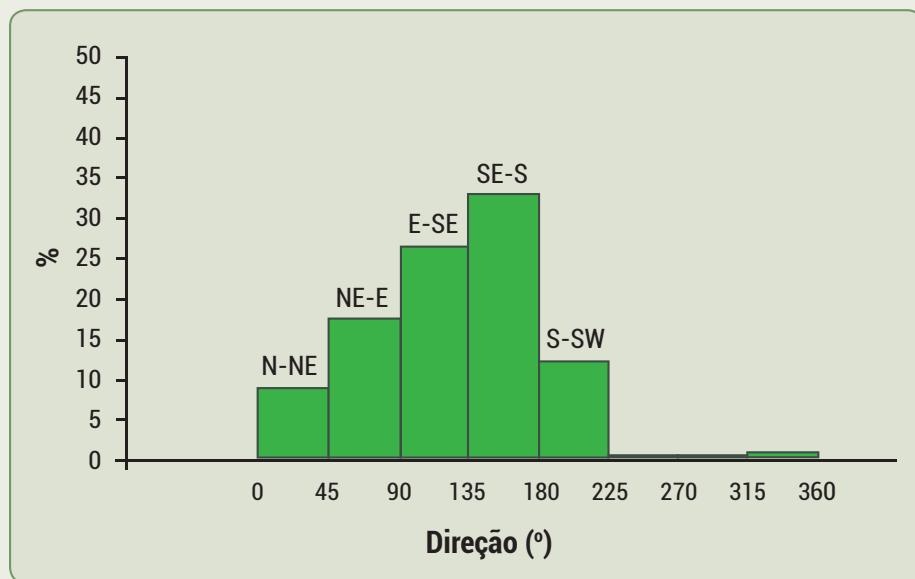
Figura 8.2 – Resultados da simulação do modelo numérico RefDif (Teoria dos raios) desenvolvido por Soares e Chacaltana (2003) na Baía do Espírito Santo



Legenda: A figura da esquerda consiste na entrada de ondas de sudeste e a da direita consiste na entrada de ondas de leste

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 8.3 – Histograma de direção média da onda entre os anos de 1957 e 2002 para a região oceânica adjacente ao estado de Espírito Santo

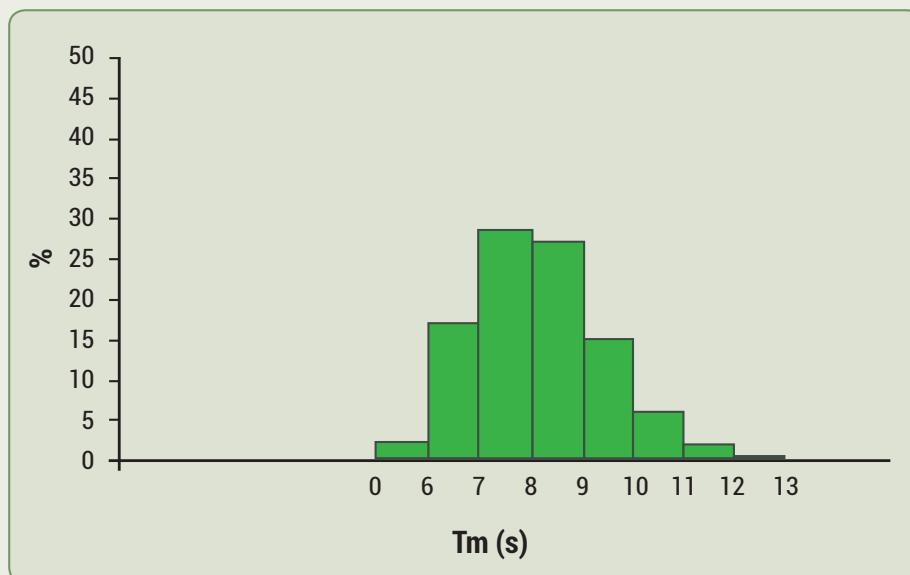


Fonte: Piumbini (2009).

Já que a Baía do Espírito Santo é protegida das ondas do quadrante de NE, conclui-se que as principais direções de ondas que podem incidir de forma direta até a linha de costa seriam as ondas de SE-S (135° - 180°) e E-SE (90° - 135°).

Na análise estatística do período de onda que caracteriza o clima de ondas na região do Espírito Santo, Piumbini (2009) encontrou que o valor típico do período ($T_{m50\%}$) está no intervalo de 7,0 a 8,0 s (Figura 8.4). Para o padrão extremo, o valor típico do decil superior do período médio ($T_{m90\%}$) se encontra no intervalo de 9,8 a 14,2 s.

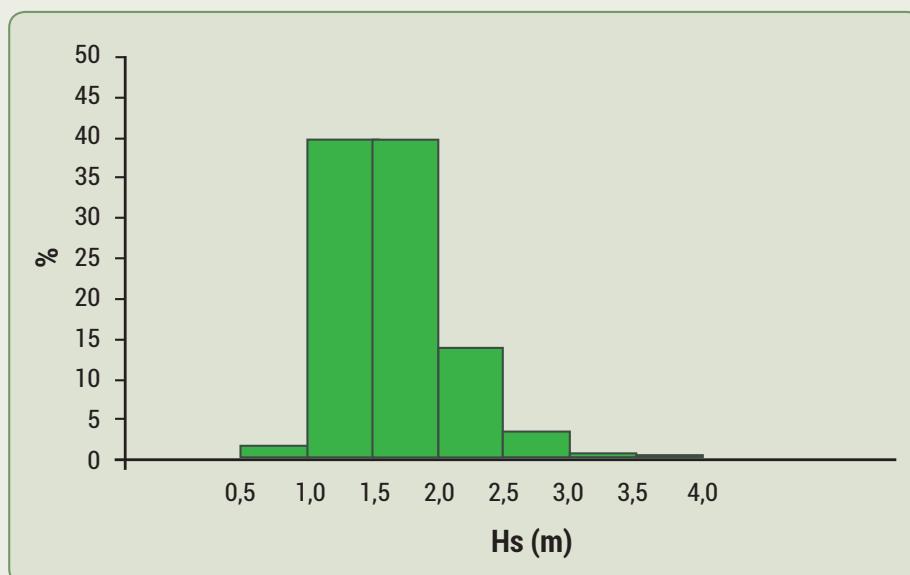
Figura 8.4 – Histograma do período médio da onda entre os anos de 1957 e 2002 para a região oceânica adjacente ao estado de Espírito Santo



Fonte: Piumbini (2009).

Para o padrão típico da altura de onda H_s , Piumbini (2009) encontrou valores entre 1,0 e 2,0 m (cerca de 80% do registro), e não foram encontradas alturas significativas inferiores a 0,5 m nem superiores a 5,3 m (Figura 8.5).

Figura 8.5 – Histograma da altura significativa da onda entre os anos de 1957 e 2002 para a região oceânica adjacente ao estado de Espírito Santo



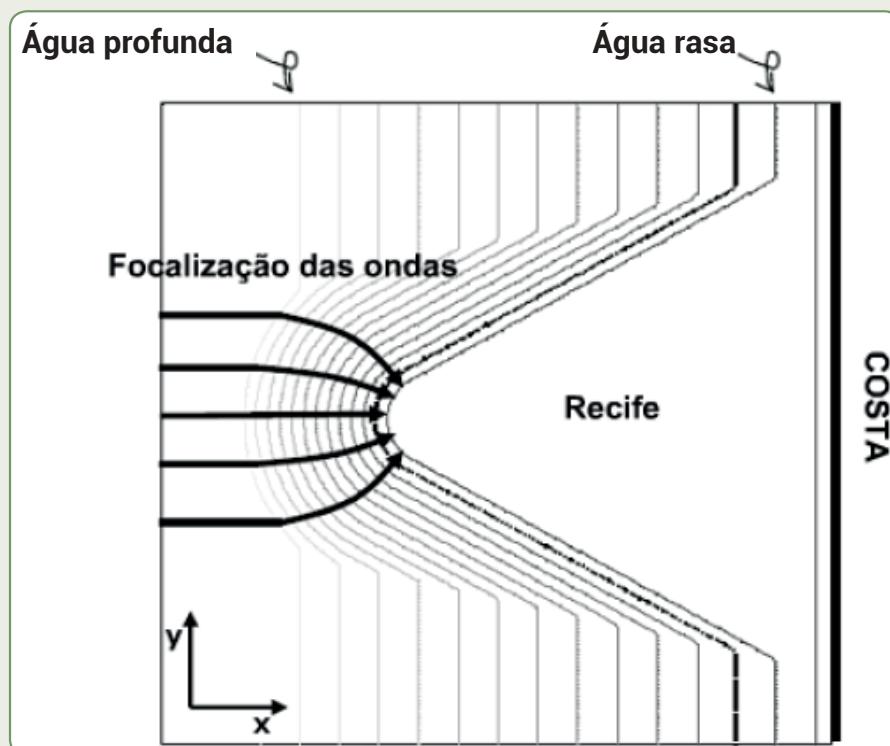
Fonte: Piumbini (2009).

RECIFE ARTIFICIAL MULTIFUNCIONAL

O mecanismo de funcionamento dessas estruturas é baseado nos princípios físicos da mecânica das ondas. Conforme as ondas propagam sobre a estrutura submersa, sua altura e direção são alteradas devido às diferenças de profundidade e à inclinação dessa estrutura. Quando as ondas alcançam o ponto de menor profundidade, tendem a quebrar devido à instabilidade gerada na crista da onda. Assim, a maioria dos engenheiros e pesquisadores projetam o RAM para focalizar a energia das ondas e gerar uma zona de arrebentação mais afastada da linha de costa.

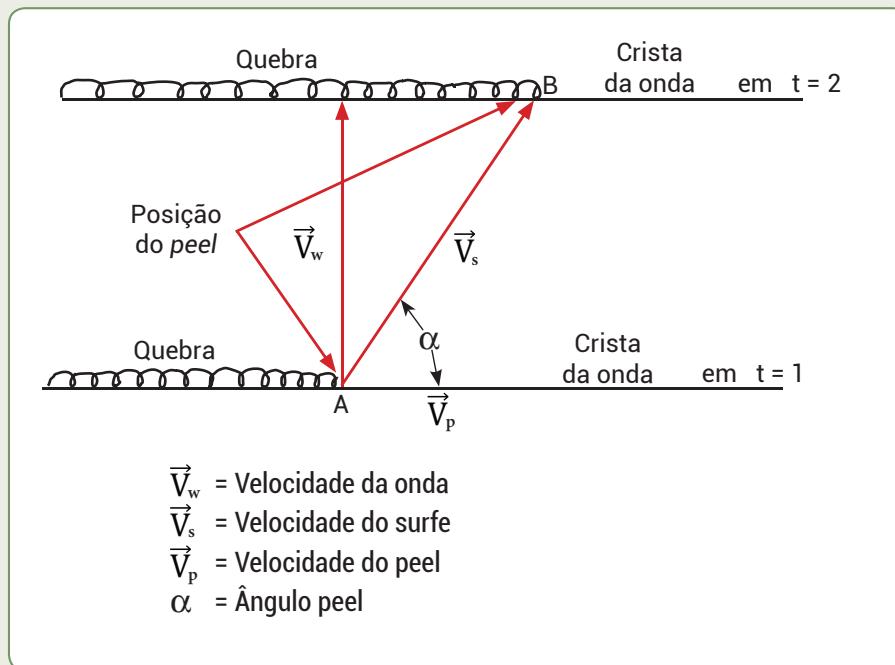
A focalização da onda (*wave focusing*) é o processo físico de convergência dos raios de onda devido ao efeito de refração sobre a profundidade (Figura 8.6). Dessa forma, a altura da onda é amplificada sobre a estrutura até que a inclinação da face da crista (*steepness*) se torne muito íngreme, ocorrendo o colapso da onda na forma de quebra. Após o colapso inicial no ponto mais raso do recife, a onda continua arrebentando lateralmente sobre a estrutura, formando um ângulo entre a quebra da onda no instante inicial e em um instante posterior (Figura 8.7), conhecido como ângulo *peel* (WEST et al., 2003).

Figura 8.6 – Convergência dos raios de ondas concentrando energia no recife artificial convencional



Fonte: Van Ettinger (2005), adaptado por Piccoli (2008).

Figura 8.7 – Ilustração mostrando o ângulo *peel* de uma onda e dois instantes de tempo durante uma quebra



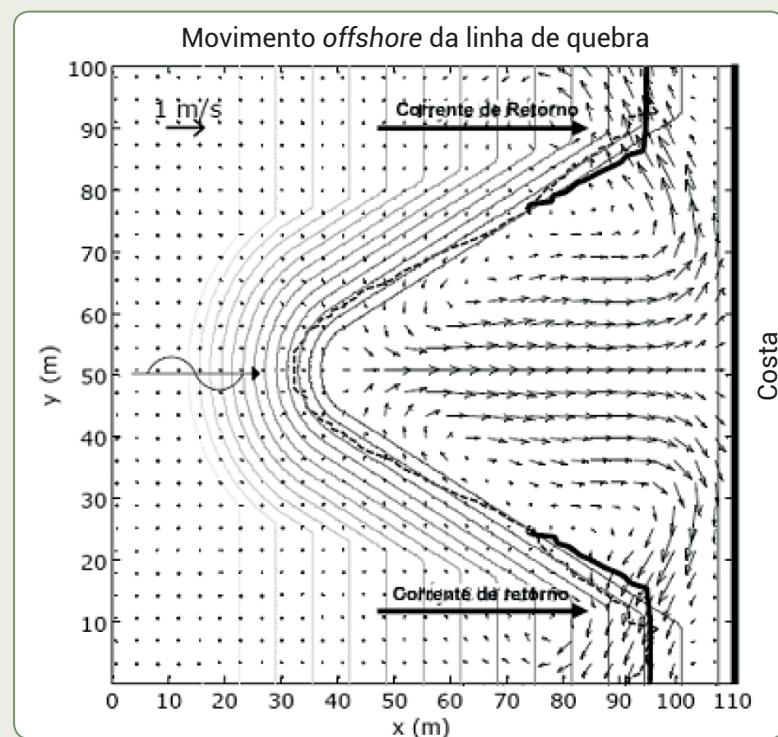
Fonte: Ranasinghe, Hacking e Evans (2001), adaptado por Piccoli (2008).

O ângulo *peel* varia entre 0 e 90°, com os menores valores do ângulo em ondas de surfe rápidas e maiores ângulos em ondas de surfe lentas (MEAD, 2003). Geralmente, a quebra de ondas com ângulo *peel* entre 30 e 60° é característica das ondas adequadas para a prática do surfe (COURIEL; COX, 1996).

Como a estrutura submersa tende a direcionar e alterar a forma da onda, essas estruturas também irão modificar o padrão de escoamento local, através das correntes longitudinais e de retorno (Figura 8.8). Van Ettinger (2005) realizou um estudo numérico para encontrar um dimensionamento ideal para um tipo de recife artificial multifuncional (RAM), variando a morfologia da estrutura. O autor encontrou uma configuração que reduz as correntes de retorno nas extremidades da estrutura quando projetou um canal na parte central do recife (Figura 8.9). No canal de retorno o empinamento da onda é menor que nas estruturas laterais o que resulta em um menor nível médio da água (*setup*) no canal. As variações ao longo da costa no *setup* da onda produzem um “alimentador” de correntes em direção do canal e para os lados do recife, diminuindo a intensidade das correntes com relação a um dimensionamento convencional (sem o canal).

Dessa forma, com a intenção de diminuir a energia da onda ao longo da costa e melhorar as condições de surfe das ondas, os RAMs são construídos com dois “braços” separados, como o modelo encontrado em Black (2004), que é projetado para, além de proteção costeira, desenvolver ondas adequadas para a prática de surfe e um canal de remada para dar aos surfistas acesso durante as condições de ondas moderadas e grandes.

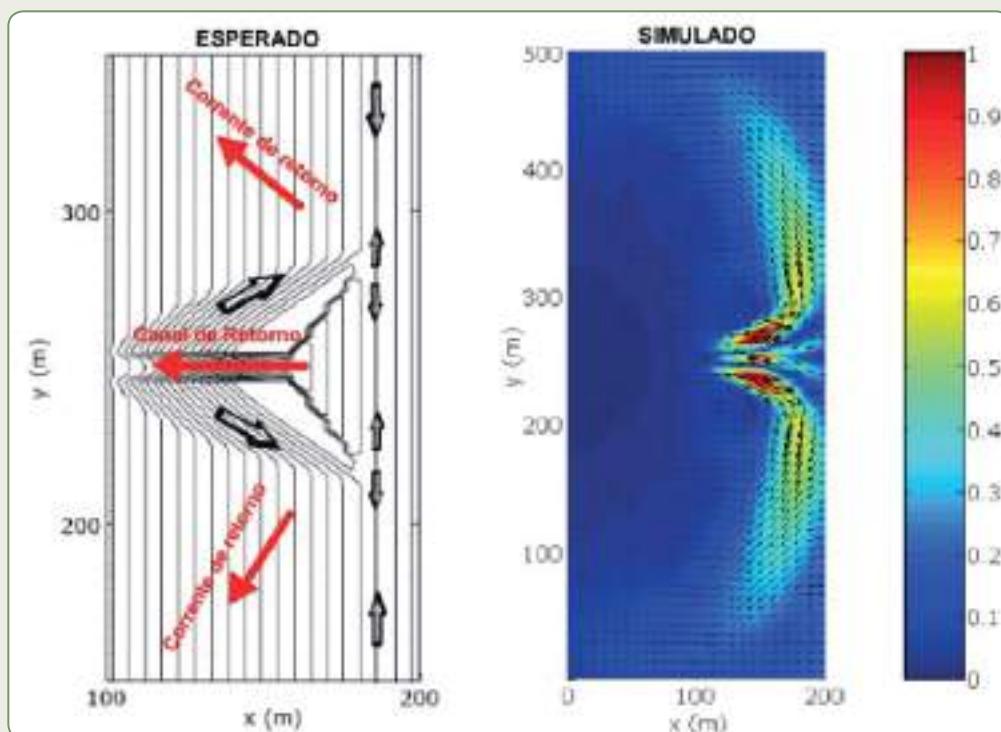
Figura 8.8 – Batimetria de um recife artificial de surfe convencional



Legenda: As setas denotam as direções das correntes e sua magnitude, as finas linhas sólidas indicam os contornos de profundidade de 6 a 1,5 m, as linhas tracejadas indicam a linha de quebra e a linha sólida grossa indica a linha de quebra sem a presença das correntes

Fonte: Van Ettinger (2005), adaptado por Piccoli (2008).

Figura 8.9 – Simulação mostrando as velocidades das correntes atuando em um RAS com canal de retorno



Fonte: Adaptado de van Ettinger (2005).

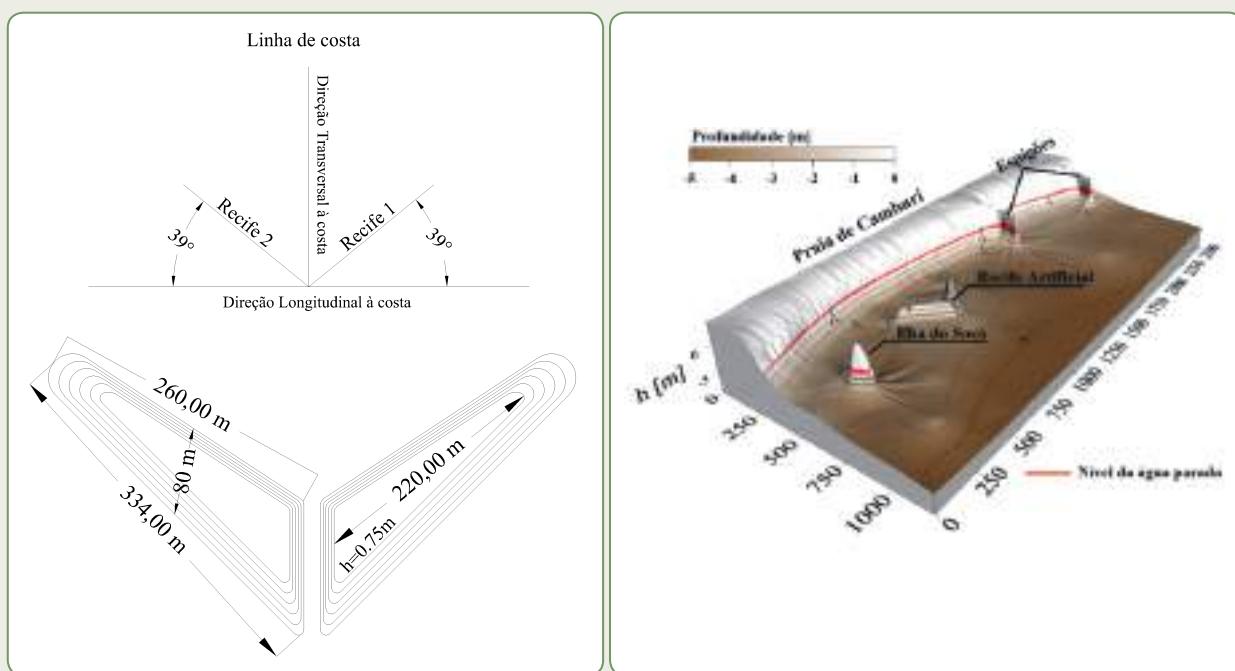
Para a configuração do RAM é necessário um estudo dos tipos de quebra de ondas que são adequadas para a prática de surfe. Mead e Black (2001) realizaram um estudo das quebras de ondas que são de boa qualidade para o surfe e concluíram que quebras deslizantes e mergulhantes são as mais utilizadas para o surfe. Assim, para esses tipos de quebra, a declividade da estrutura deve respeitar os limites do parâmetro de similaridade do surfe, ou número de Iribarren, que é dado por:

$$\xi_0 = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{H_0/L_0}} \text{ ou } \xi_b = \frac{\tan \varphi}{\sqrt{H_b/L_b}} \quad (\text{Eq. 8.7})$$

onde ξ é o número de Iribarren, H_0 é a altura de onda de água profunda, $L_0 = 1,56T_s^2$ é o comprimento de onda de água profunda, T_s é o período da onda, φ é a declividade do fundo e H_b é a altura na onda no ponto de quebra. Esta última pode ser escrita como $H_b/H_0 = 0,56(L_0/H_0)^{1/5}$ ou, em função da profundidade (h), como $H_b \geq 0,8h$ (FREDSØE; DEIGAARD, 1997).

A configuração do protótipo do RAM foi projetada para uma altura mínima da onda de 0,6 m no ponto de quebra, que ocorre no topo da estrutura a uma profundidade de 0,75 m. Conforme a predominância da área de alta energia da Praia de Camburi, típica de SE, o RAM foi projetado na forma de V com dois recifes separados por um canal de retorno e com um ângulo referente à linha de costa de aproximadamente 39° (Figura 8.10). Essa configuração foi projetada para gerar ângulos de surfe (*peel angle*) adequados para a prática de surfe, determinando uma quebra de onda caminhando para a esquerda do RAM e outra para a direita do RAM. Para a declividade da estrutura calculada pela $\tan \varphi$, onde φ é o ângulo entre a estrutura e o leito, foi adotado um valor de 1:20 que, para o padrão das ondas na região, produz valores do parâmetro de similaridade do surfe das quebras deslizantes ($\xi_0 < 0,5$ ou $\xi_b < 0,4$) e mergulhantes ($0,5 < \xi_0 < 3,3$ ou $0,4 < \xi_b < 2,0$).

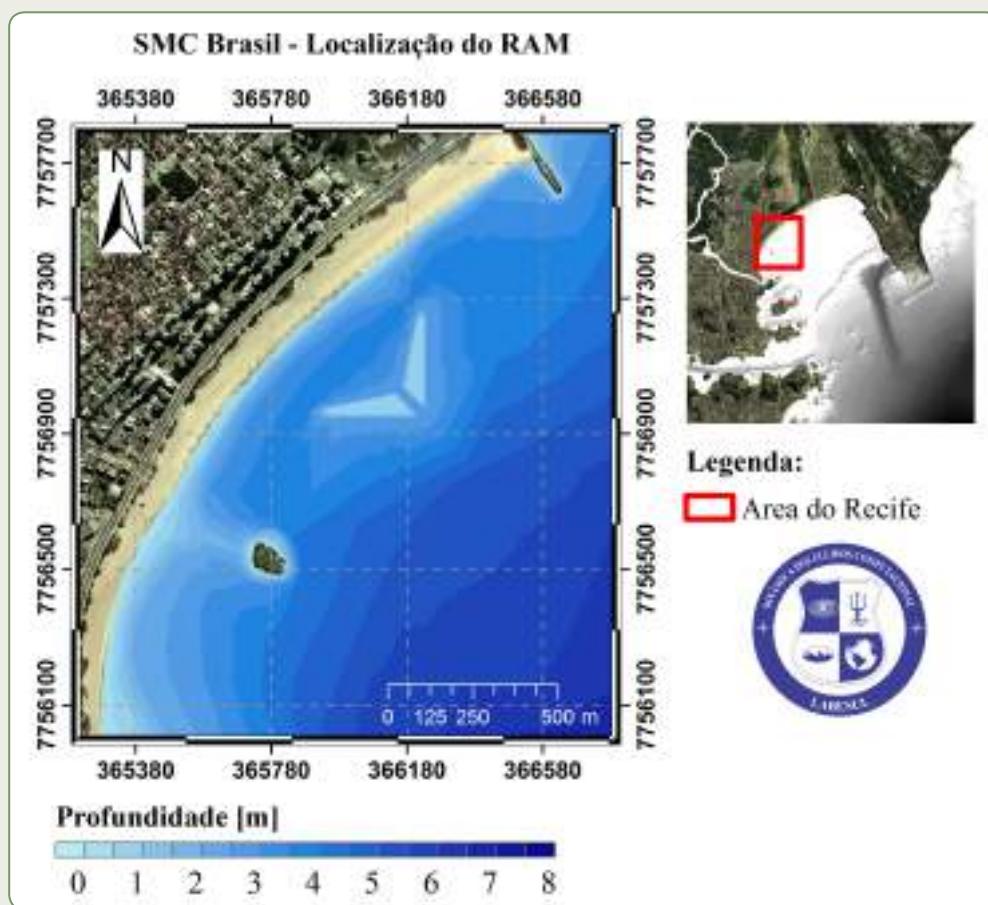
Figura 8.10 – Configuração do RAM na Praia de Camburi, Vitória (ES)



Fonte: Dos autores (2018).

A posição da estrutura imersa em relação à costa e o seu dimensionamento estão relacionados com a resposta da linha de costa na formação de saliência. É importante ressaltar que as dimensões do RAM devem ser calculadas em função da sua distância em relação à costa e do seu comprimento efetivo para a linha de costa, isso para que a estrutura estabilize a praia sem ocorrer a formação de tómbolo ou assoreamento do RAM. No presente trabalho foi escolhido o valor de 1 para a relação do comprimento efetivo da estrutura ($L_s \approx 360$ m) com a sua distância da costa ($X \approx 360$ m). Estudos realizados por Black e Andrews (2001) mostraram que para valores de L_s/X menores que 2 pode ocorrer a formação de saliências sem a formação de tómbolo ou assoreamento. Com isso, o ponto de interseção dos recifes do RAM foi localizado na coordenada UTM de 366.136,65E e 7.756.955,00N, no datum WGS84 e zona 24S, em uma profundidade de aproximadamente 3 m (Figura 8.11).

Figura 8.11 – Localização do RAM na Praia de Camburi, Vitória (ES)



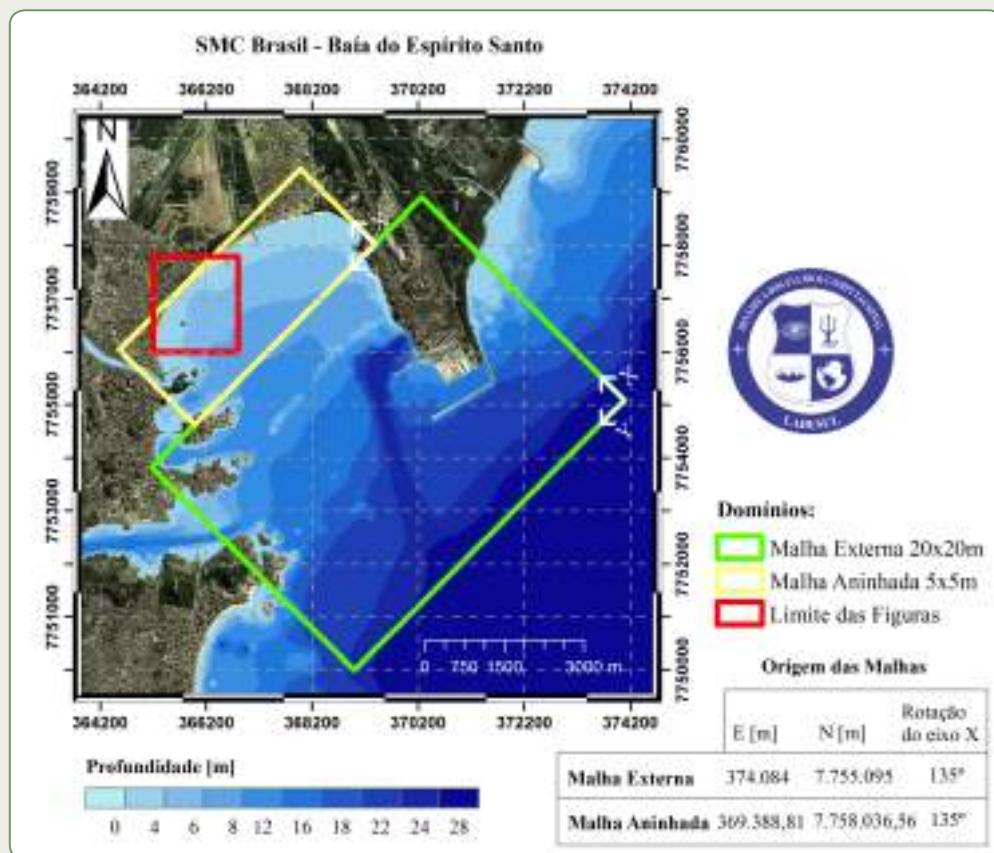
Fonte: Dos autores (2018).

DOMÍNIOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção serão abordadas as condições iniciais e de contorno para os cenários de simulação. Os dados batimétricos foram disponibilizados pelo Laboratório de Simulação de Escoamentos com Superfície Livre (LABESUL) da Universidade Federal do Espírito Santo. A batimetria foi interpolada a partir de dados levantados em campo e completada com auxílio de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação DHN (Marinha do Brasil). Os cenários de ondas simulados consideram

os casos de uma batimetria com a estrutura submersa (RAM) e sem a estrutura submersa, a fim de comparar o efeito da estrutura no comportamento da morfodinâmica costeira atual. Os dados de ondas foram adquiridos a partir do programa SMC-Tools, inserido no SMC-Brasil, o qual apresenta um banco de dados dos parâmetros da onda de reanálise em toda a costa brasileira. Na entrada da Baía do Espírito Santo, nas proximidades do Porto de Tubarão, os dados mostraram grande predominância das ondas de SE ($\sim 135^\circ$) e de E-SE ($\sim 112,5^\circ$) com probabilidades de ocorrência de 57,60 e 40,68%, respectivamente. Dessa forma, foram gerados cenários com a malha numérica orientada para SE (Figura 8.12) e para E-SE (Figura 8.13).

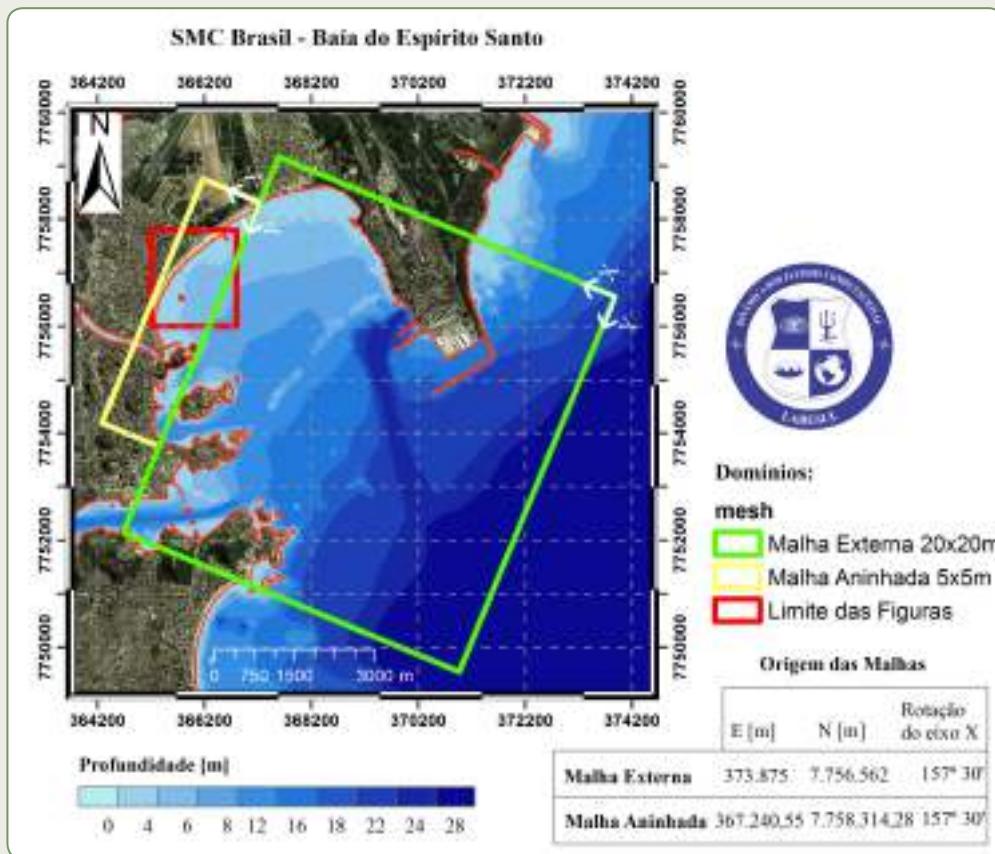
Figura 8.12 – Malhas numéricas orientadas para entrada de ondas de SE



Legenda: Para melhor visualização dos dados os resultados serão apresentados na região delimitada pelo retângulo vermelho

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 8.13 – Malhas numéricas orientadas para entrada de ondas de E-SE



Legenda: Para melhor visualização dos dados os resultados serão apresentados na região delimitada pelo retângulo vermelho

Fonte: Dos autores (2018).

O eixo x da malha de SE foi girado em 135° para que a incidência das ondas, ao longo do eixo y, seja de SE (~135°). E o eixo x da malha de E-SE foi rotacionado em 157,5° para que a entrada de onda ao longo do eixo y seja de E-SE (~112,5°). Foi necessária a utilização do método de submalha com refinamento próximo da costa para obter uma melhor representação das estruturas e dos processos costeiros. Assim, uma malha com espaçamentos regulares de 20 m é utilizada para iniciar a propagação das ondas para dentro da baía. Essa malha alimentará uma submalha com espaçamentos regulares de 5 m próxima da costa. O Quadro 8.1 mostra as informações das malhas numéricas utilizadas na simulação.

Quadro 8.1 – Informações das malhas numéricas

	Malhas	Origem		Rotação	Comprimento		Nº de pontos	
		E [m]	N [m]		X [m]	Y[m]	X	Y
SE	Malha Externa	374.084,00	7.755.095,00	135,0	5.400	7.140	271	358
	Malha Interna	369.388,81	7.758.036,56	135,0	2.000	4.760	401	953
E-SE	Malha Externa	373.875,00	7.756.562,00	157,5	6.800	7.600	341	381
	Malha Interna	367.240,55	7.758.314,28	157,5	1.160	4.940	233	989

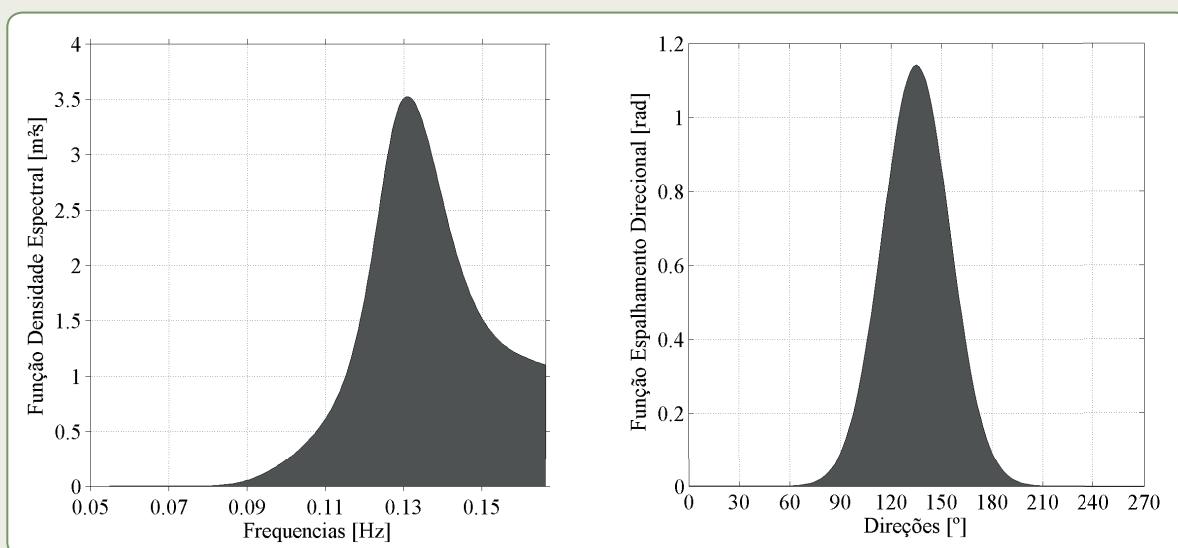
Fonte: Dos autores (2018).

Os valores modais de altura significativa e período significativo ($H_{S50\%}$ e $T_{m50\%}$) foram utilizados como valores típicos da onda incidente. Esses valores foram usados tanto para propagar ondas regulares quanto ondas irregulares para o interior da Baía do Espírito Santo. Para o caso de ondas regulares de SE, o valor utilizado para a altura é de $H_{S50\%} = 1,36$ m e para o período é de $T_{m50\%} = 7,73$ s. E, para as ondas de E-SE, foi usada uma altura de $H_{S50\%} = 1,27$ m e um período de $T_{m50\%} = 7,30$ s. Para o caso de ondas irregulares, o modelo calcula o espectro direcional das ondas a partir das informações da altura significativa da onda, período de pico e direção. Nas figuras 8.14 e 8.15 são mostrados os espectros de frequência e de espalhamento direcional usados nas simulações de ondas irregulares. Os espectros foram gerados usando como período de pico e altura significativa os valores de período e altura das ondas regulares de SE e de E-SE, respectivamente.

O módulo de transporte de sedimentos utilizou as formulações de Soulsby (1997) com aproximações de van Rijn (1993) e as características do sedimento foram utilizadas de acordo com dados sedimentológicos disponíveis na literatura (PRATA, 2005; SABAINI; ALBINO, 2006; BASTOS et al., 2007; SABAINI, 2008; DATALTO; ALBINO, 2009; MACHADO, 2010; BRANT, 2012).

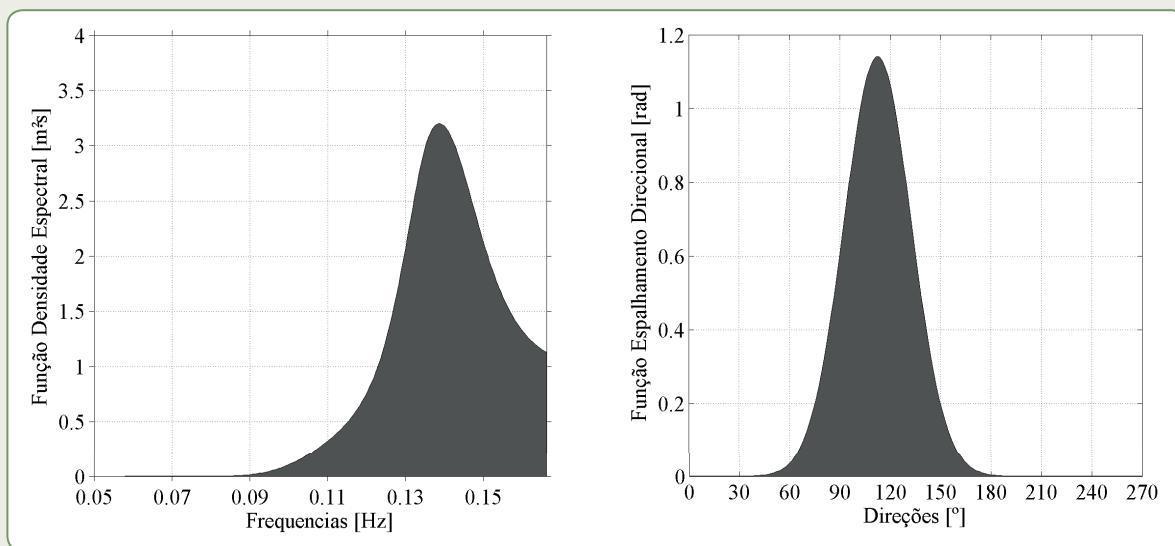
O modelo EROS considera o efeito da inclinação do fundo no fluxo de sedimento. Esse efeito depende da tensão crítica em um fundo plano e da tensão crítica em um fundo inclinado, ambos determinantes para iniciar o movimento do grão de sedimento. Esses parâmetros são calculados em função do ângulo de atrito interno (ϕ), massa específica da água (ρ_w) e do sedimento (ρ_s) e do diâmetro mediano do sedimento (D_{50}). O ângulo de atrito utilizado é o valor padrão dos sedimentos de praia com valor em torno de $\phi = 35^\circ$, $\rho_w = 1,025$ ton/m³, $\rho_s = 2,65$ ton/m³ e $D_{50} = 0,5$ mm. No entanto, as praias apresentam distribuições granulométricas muito distintas das homogêneas e, com isso, é importante utilizar o diâmetro equivalente ao invés de somente o diâmetro médio (D_{50}). Assim, o modelo necessita também do diâmetro do percentil D_{90} , que é de 1,5 mm. A duração do evento simulado no estudo da morfodinâmica é de 24 h com passo de tempo do modelo de transporte de sedimento de 1 s e atualização da batimetria a cada 3600 s.

Figura 8.14 – Espectro de frequência (esquerda) e espalhamento direcional (direita) das ondas para o cenário de SE a partir de $H_{S50\%}$ e $T_{m50\%}$



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 8.15 – Espectro de frequência (esquerda) e espalhamento direcional (direita) das ondas para o cenário de E-SE a partir de $H_{S50\%}$ e $T_{P50\%}$



Fonte: Dos autores (2018).

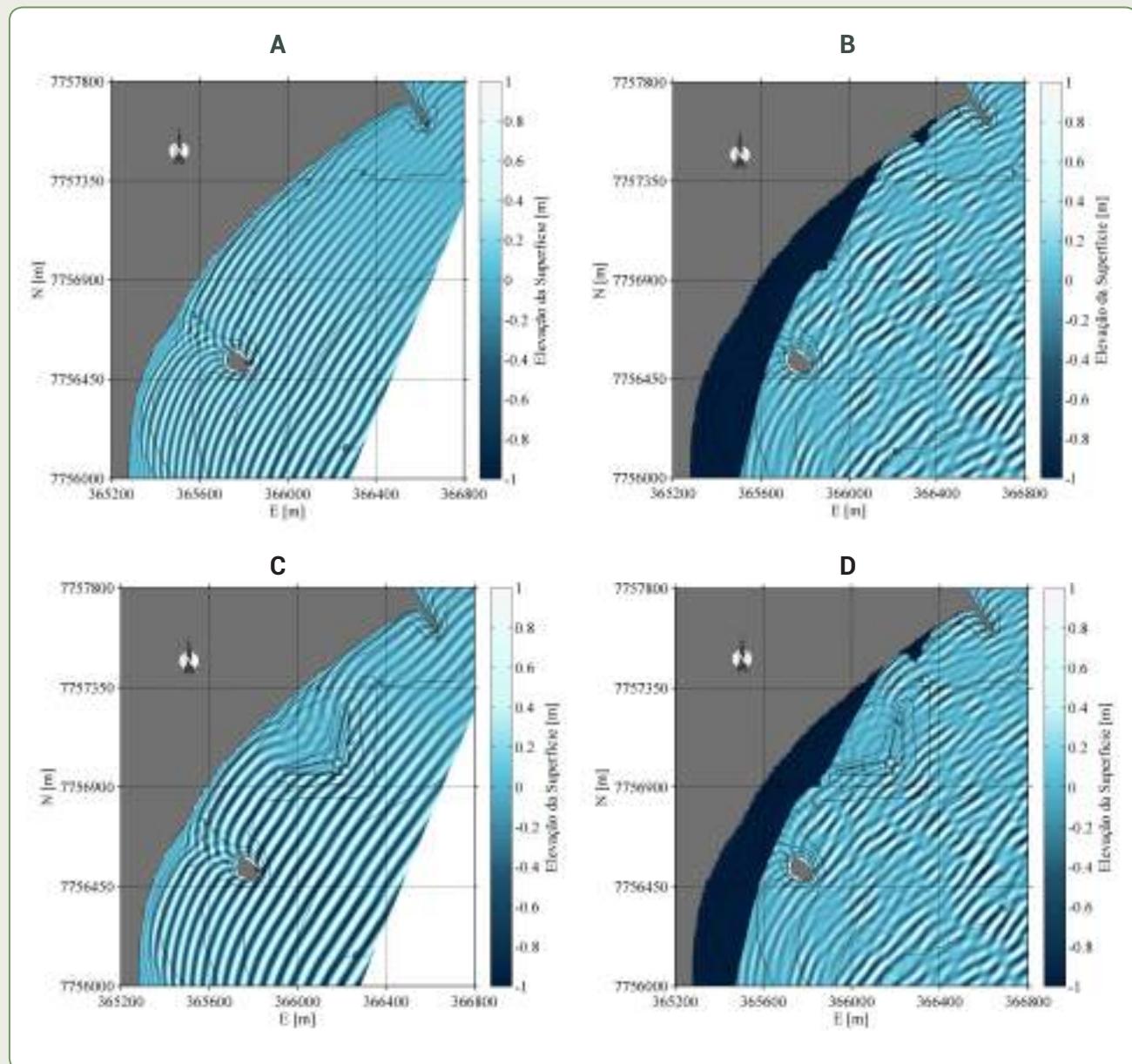
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados das simulações dos experimentos numéricos considerando ondas regulares e irregulares de E-SE e SE são apresentados nesta seção. Os resultados da propagação da onda regulares de E-SE em condições atuais (sem a presença do recife artificial) e após a implantação do recife artificial (com a presença do recife artificial) são mostrados respectivamente nas figuras 8.16a e 8.16c. Nas figuras 8.16b e 8.16d são mostrados os resultados para o caso da propagação de ondas irregulares de SE, respectivamente sem recife e com recife.

Os resultados mostraram que o modelo reproduziu bem os processos físicos de refração, difração e empinamento da onda quando estas interagem com o leito marinho e obstáculos, alterando a direção, altura e comprimento de onda na área de estudo. Como observado pelas figuras 8.16b e 8.16d, as ondas irregulares fornecem um resultado mais realista do comportamento da agitação da água, com ondas de diferentes direções interagindo com a linha de costa e com o recife artificial. Assim, somente resultados da propagação de ondas irregulares de E-SE e SE são mostrados nas figuras 8.17, 8.18 e 8.19, respectivamente, para a distribuição da altura, correntes residuais e transporte total de sedimentos.

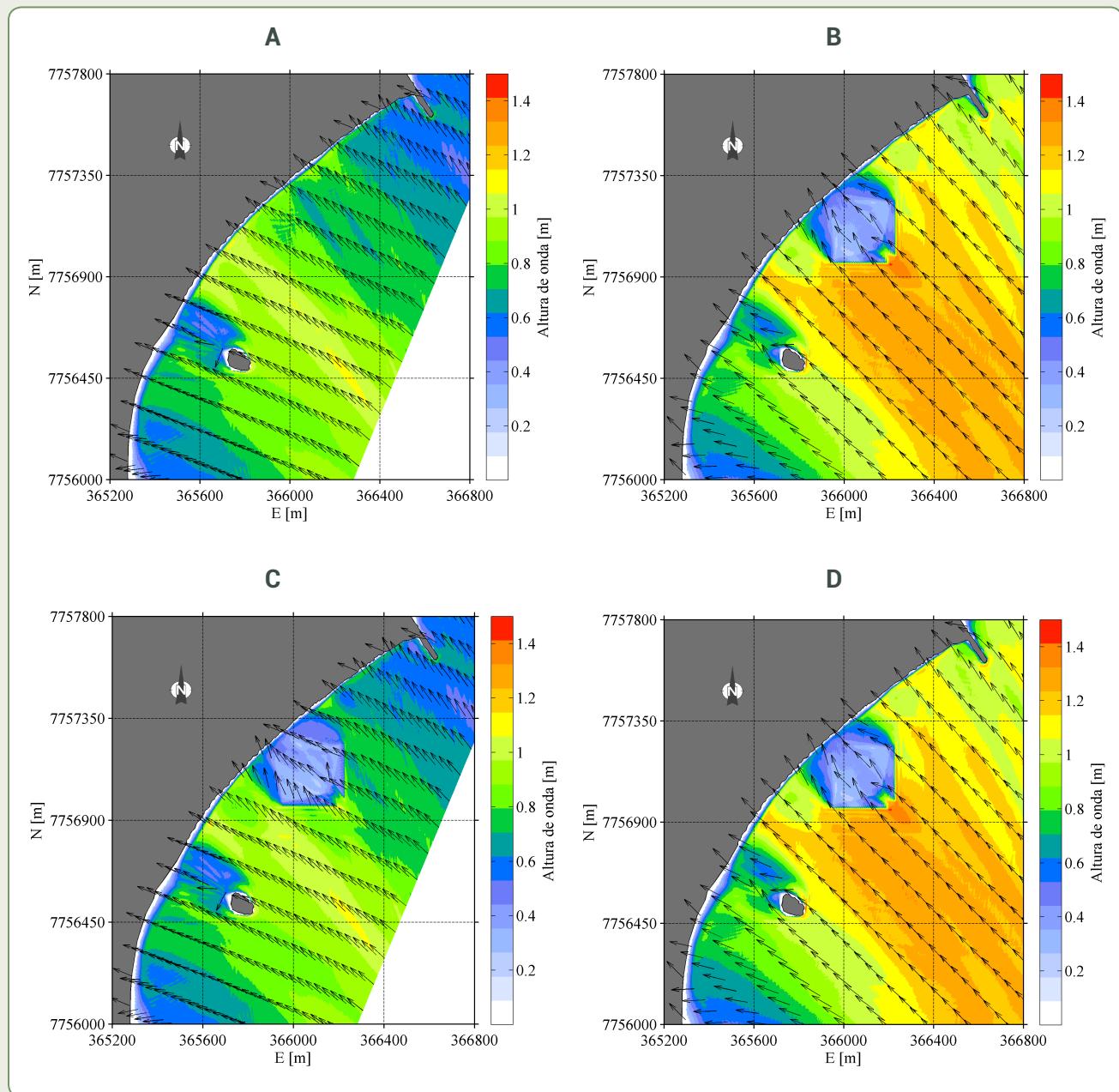
Pode ser observado na Figura 8.17 que a direção de propagação da onda, indicada pelos vetores, é alterada pelos efeitos de refração e difração devido ao gradiente batimétrico e pela presença de obstáculos (ilha, espião e RAM), respectivamente. A influência da profundidade na altura e direção da onda pode ser observada na Figura 8.17a, onde os vetores da onda incidente de E-SE apresentam valores de direção bem próximos aos da onda incidente de SE, Figura 8.17b. As figuras 8.17c e 8.17d mostram os efeitos da estrutura submersa no comportamento de propagação da onda. Quando a onda começa a interagir com as profundidades do RAM, esta tende a direcionar as cristas para a estrutura, ocorrendo uma concentração de energia, conhecida como processo de focalização da energia da onda. Assim, a onda aumenta sua altura até ocorrer a instabilidade, seguido da quebra da onda sobre a estrutura, reduzindo significativamente sua altura e, consequentemente, a energia em direção à praia.

Figura 8.16 – Mapa da elevação da superfície da água para uma onda regular de E-SE, a) sem recife artificial e c) com recife artificial, e para uma onda irregular de SE, b) sem recife artificial e d) com recife artificial



Fonte: Dos autores (2018).

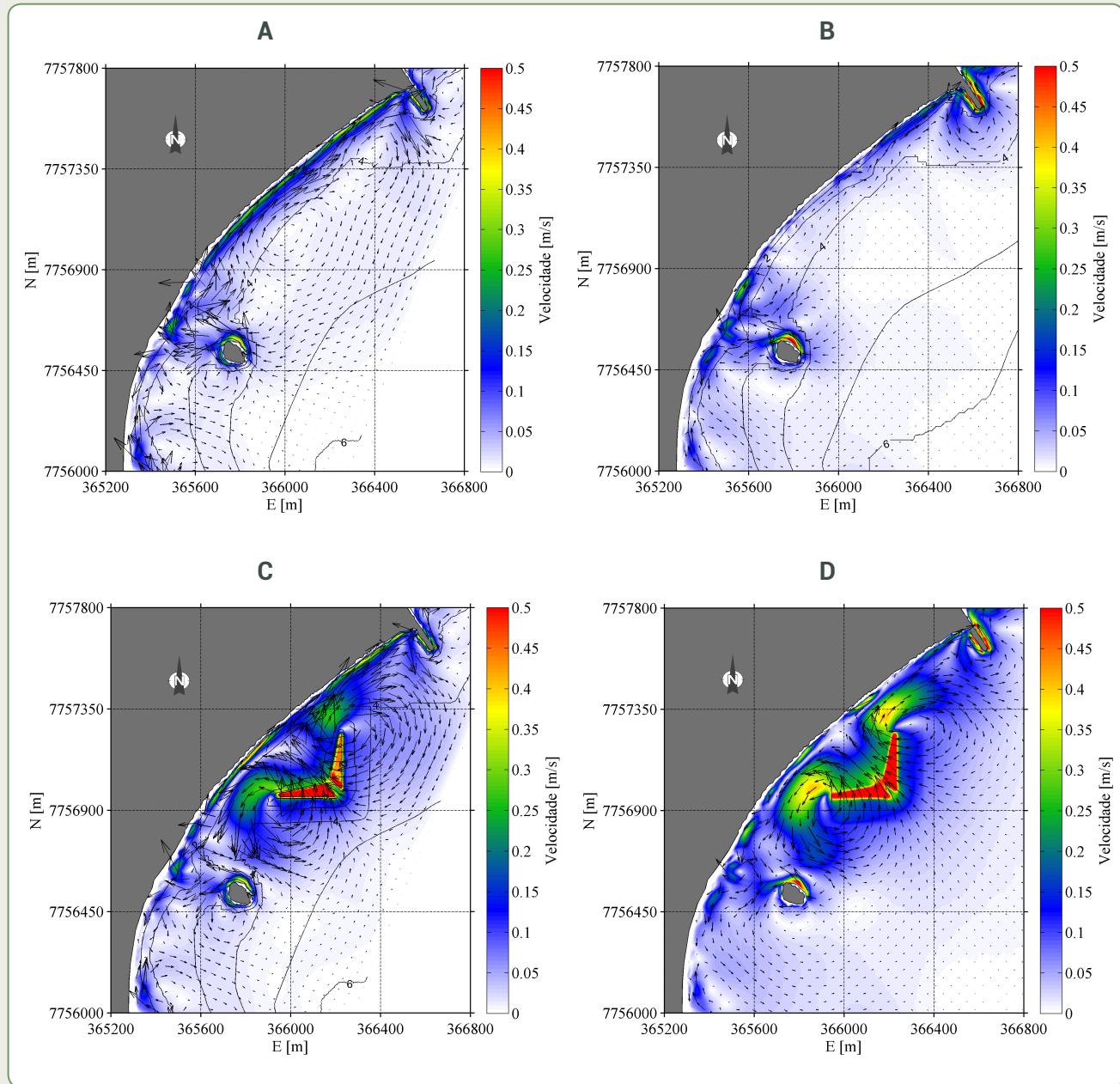
Figura 8.17 – Mapa de altura de ondas e direção de propagação de uma onda irregular de E-SE, a) sem recife artificial e c) com recife artificial, e de uma onda irregular de SE, b) sem recife artificial e d) com recife artificial



Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados da corrente gerada pela ação das ondas são mostrados na Figura 8.18. O padrão da corrente residual para as ondas de E-SE e SE se mostrou com diferentes comportamentos. As correntes geradas pelas ondas de E-SE, Figura 8.18a, apresentaram uma corrente longitudinal bem definida no sentido sul-norte a partir da Ilha do Socó para o espião. Esse comportamento pode ser explicado pelo gradiente da elevação da superfície da água, que é maior nas proximidades da Ilha do Socó (Figura 8.17a) gerando um escoamento da água em direção ao espião. Diferentemente, nas ondas de SE, Figura 8.18b, a elevação da superfície da água é maior e uniforme entre a ilha e o espião (Figura 8.17b), gerando correntes tanto para o sul quanto para o norte do domínio.

Figura 8.18 – Mapa da corrente residual de uma onda irregular de E-SE: a) sem recife artificial e c) com recife artificial, e de uma onda irregular de SE, b) sem recife artificial e d) com recife artificial

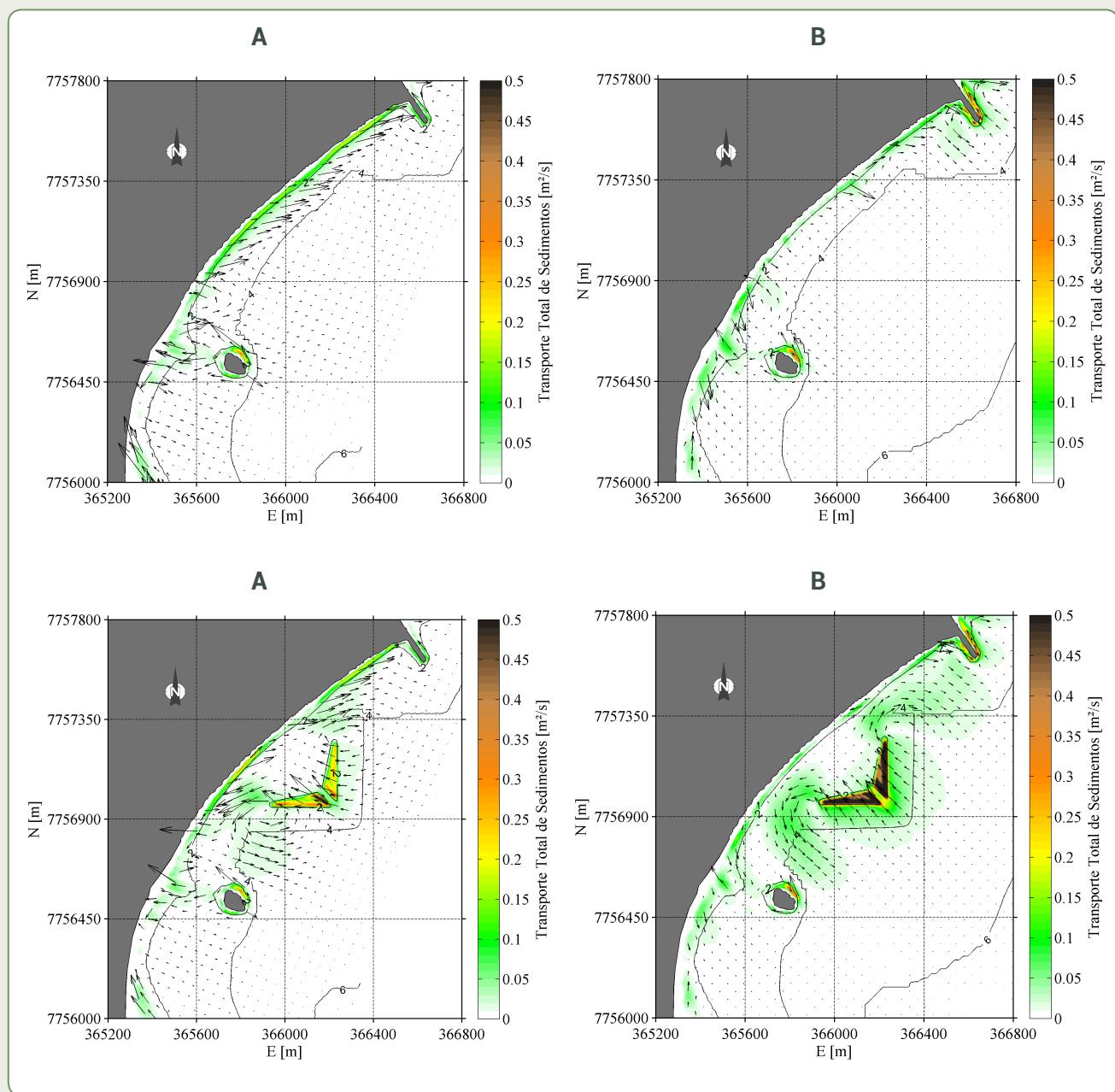


Fonte: Dos autores (2018).

A presença do RAM (figuras 8.18c e 8.18d) gerou correntes sobre a estrutura em direção à costa, com valores superiores a 0,5 m/s e circulações de retorno nas suas extremidades, cuja influência se estende até a Ilha do Socó (ao sul) e até o espião (ao norte). Para ondas de E-SE, a circulação induzida pelo RAM bloqueia a corrente longitudinal gerada sem a presença da estrutura. Essas correntes longitudinais são grandes responsáveis pela deriva litorânea dos sedimentos, que podem provocar erosão costeira. Resultados semelhantes foram encontrados por van Ettinger (2005) para a configuração de um recife artificial em um tanque de ondas.

A taxa de sedimentos transportados, no período de duração do evento em 24 h, pode ser observada na Figura 8.19. Na Figura 8.19a pode-se observar que o transporte de sedimentos das ondas de E-SE está correlacionado com a corrente longitudinal e apresenta uma distribuição mais uniforme da taxa de transporte de sedimentos que as ondas de SE, Figura 8.19b. Com a presença do RAM ocorre uma diminuição da taxa de transporte dos sedimentos na região de proteção do RAM, tanto para as ondas de E-SE (Figura 8.19c) quanto para as ondas de SE (Figura 8.19d). Possíveis mudanças no leito podem ocorrer entre a RAM e a Ilha do Socó e também entre a RAM e o espião, mais evidente para o caso das ondas de SE.

Figura 8.19 – Mapa da taxa de transporte de sedimentos ocasionado por uma onda irregular de E-SE: a) sem recife artificial e c) com recife artificial; e por uma onda irregular de SE: b) sem recife artificial e d) com recife artificial. Unidades em $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$



Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÃO

Neste trabalho, os resultados numéricos decorrentes da instalação do recife artificial próximo à Praia de Camburi, com o interesse de aumentar a qualidade da onda para o surfe e realizar a proteção à erosão costeira, mostraram um aumento na altura da onda sobre o recife artificial e anularam a corrente longitudinal responsável pelo transporte de sedimento, indicando que o SMC-Brasil pode ser usado, dentro das limitações do modelo de declividade suave, como uma ferramenta de apoio à gestão do ambiente marinho costeiro.

REFERÊNCIAS

ALBINO, J.; OLIVEIRA, R.; MAYA, L. P.; ALENCASTRE, K. **Processos atuais de sedimentação marinha e praial do litoral de Vitória, ES**. Vitória: Prefeitura Municipal de Vitória, FACITEC, 2001. Relatório nº 1982506/2000.

BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; DALMASCHIO, R. G.; CARMO, D. A.; SOUZA, P. M.; LIMA, B.; POZZI, F. Dinâmica sedimentar e morfologia de fundo do sistema estuarino de Vitória-ES. SIMPÓSIO BAÍAS, 2., **Anais...** Belém: Associação Brasileira de Estudos do Quaternário, 2007.

BLACK, K. P. **Reefs for coastal protection**: Are they just or a sustainable solution which meet modern shifts in social attitudes and policies? Scotland, UK: Littoral, Aberdeen, 2004.

BLACK, K. P.; ANDREWS, C. Sandy shoreline response to offshore obstacles part 1: salient and tombolo geometry and shape. **Journal of Coastal Research**, Special Issue 29, p. 82-93, 2001.

BOOIJ, N. A Note on the accuracy of the mild slope equation. **Coastal Engineering**, v. 7, p. 191-203, 1983.

BRANT, P. G. C. **Modelagem hidrodinâmica ambiental de dragagem no canal de acesso ao porto de Tubarão e na região de Bota Fora – ES**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

COURIEL, E. D.; COX, R. J. **International literature review artificial surfing**. New South Wales: Australian Water and Coastal Studies, Report 95/39, 1996.

DADALTO, T. P.; ALBINO, J. Morphotextural analysis and application of sediment transportation models in submerged area adjacent to an artificial beach in erosive process. **Quaternary and Environmental Geosciences**, n. 1, v. 1, p. 16-24, 2009.

FREDSØE, F.; DEIGAARD, R. **Mechanicals of coastal sediment transport**. Singapore, World Scientific, 1997. (Advanced series on Ocean Engineering, v. 3).

KIRBY, J. Higher-Order approximations in the parabolic equation method for water waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, c. 1, p. 933-952, 1986a.

KIRBY, J. Rational approximations in the parabolic equation method for water waves. **Coastal Engineering**, v. 10, p. 355-378, 1986b.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE R. A. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly varying topography. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 136, p. 453-466, 1983.

KIRBY, J.; DALRYMPLE R.A. **Modifications to a propagation model for the combined refraction-diffraction of stokes waves**: shallow water, large angle and breaking wave effects. Gainesville: Coastal and Oceanographic Engineering Department, University of Florida, 1985. Report UFL/COEL-85001.

LIN, P.; LIU, P. L.-F. A Numerical study of breaking waves in the surf zone. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 359, p. 239-264, 1998.

MACHADO, F. G. **Aspectos morfodinâmicos e vulnerabilidade erosiva da Praia de Carapebus, Serra-Espírito Santo**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

MEAD, S. Surfing Science. In: INTERNATIONAL SURFING REEF SYMPOSIUM, 3., **Proceedings...** Raglan, New Zealand, 2003, p. 1-36.

MEAD, S.; BLACK, K. Predicting the breaking intensity of surfing waves. **Journal of Coastal Research on Surfing**, Special Issue, 2001.

MUEHE, D. Geomorfologia costeira. In: CUNHA, S. B. da; GUERRA, A. J. T. **Geomorfologia: exercícios, técnicas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. cap. 6, p. 191-238.

OLIVEIRA, M. (Org.). **Diálogos Brasil-Espanha**: Sistema de Modelagem Costeira. Instituto Ambiental Brasil Sustentável – IABS / Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento – AECID / Ministério do Planejamento – MP / Ministério do Meio Ambiente – MMA / Brasília: IABS, 2013, 72 p. ISBN 978-85-64478-15-2

PICCOLI, F. P. **Estudo numérico de ondas monocromáticas em duas praias e sobre um recife artificial multifuncional na baía do Espírito Santo, Vitória, ES**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

PIUMBINI, P. P. **Clima de ondas de gravidade e estado de agitação marítima em ambientes marinhos no Espírito Santo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

PRASETYA, G.; BLACK, K. P. Sanur and Kuta Beaches in Bali: cases for removing of coastal protection to offshore Reef. In: INTERNATIONAL SURFING REEF SYMPOSIUM, 3. **Proceedings...** Raglan, New Zealand, 2003, p. 165-175.

PRATA, P. M. **Variação textural dos sedimentos da Praia de Camburi, Vitória-ES, após o engordamento artificial**. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal do Espírito Santo, 2005.

RANASINGHE, R.; HACKING, N.; EVANS, P. **Multi-functional artificial surf breaks: a review**. Parramatta, NSW, Australia: Dept. of Land and Water Conservation, 2001. Report n. CNR 2001.015.

SABAINI, R. S. **Determinação da taxa de transporte de sedimentos na zona de esparriamento de um trecho da Praia de Camburi, Vitória-ES**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.

SABAINI, R. S.; ALBINO, J. Morfodinâmica praial e segurança ao banho da Praia de Camburi, Vitória-ES. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA / REGIONAL CONFERENCE ON GEOMORPHOLOGY, 6. **Anais...** Goiania, 2006, p. 11.

SILVA, C. G.; PATCHINEETAM, S. M.; NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A. Ambientes de sedimentação costeira e processos morfodinâmicos atuantes na linha de costa. In: NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. (Org.). **Introdução à Geologia Marinha**. Rio de Janeiro: Interciências, 2004, cap. 8, p. 175-218.

SILVA, J. V. da; TEIXEIRA, P. R. de F.; CALLIARI, L. J. Numerical analyses of wave propagation over the inner shelf and shoreface of the Southern Brazilian Coast: from Torres to Mostardas. **Pesquisas em Geociências**, v. 41, n. 3, p. 273-285, 2014.

SILVESTER, R.; HSU, R. C. **Coastal stabilization**. Singapore: World Scientific, 1997. (Advanced Series on Ocean Engineering, v. 14).

SOARES, S. B.; CHACALTANA, J. T. Refração e difração de ondas na Baía do Espírito Santo. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., CONGRESSO DO

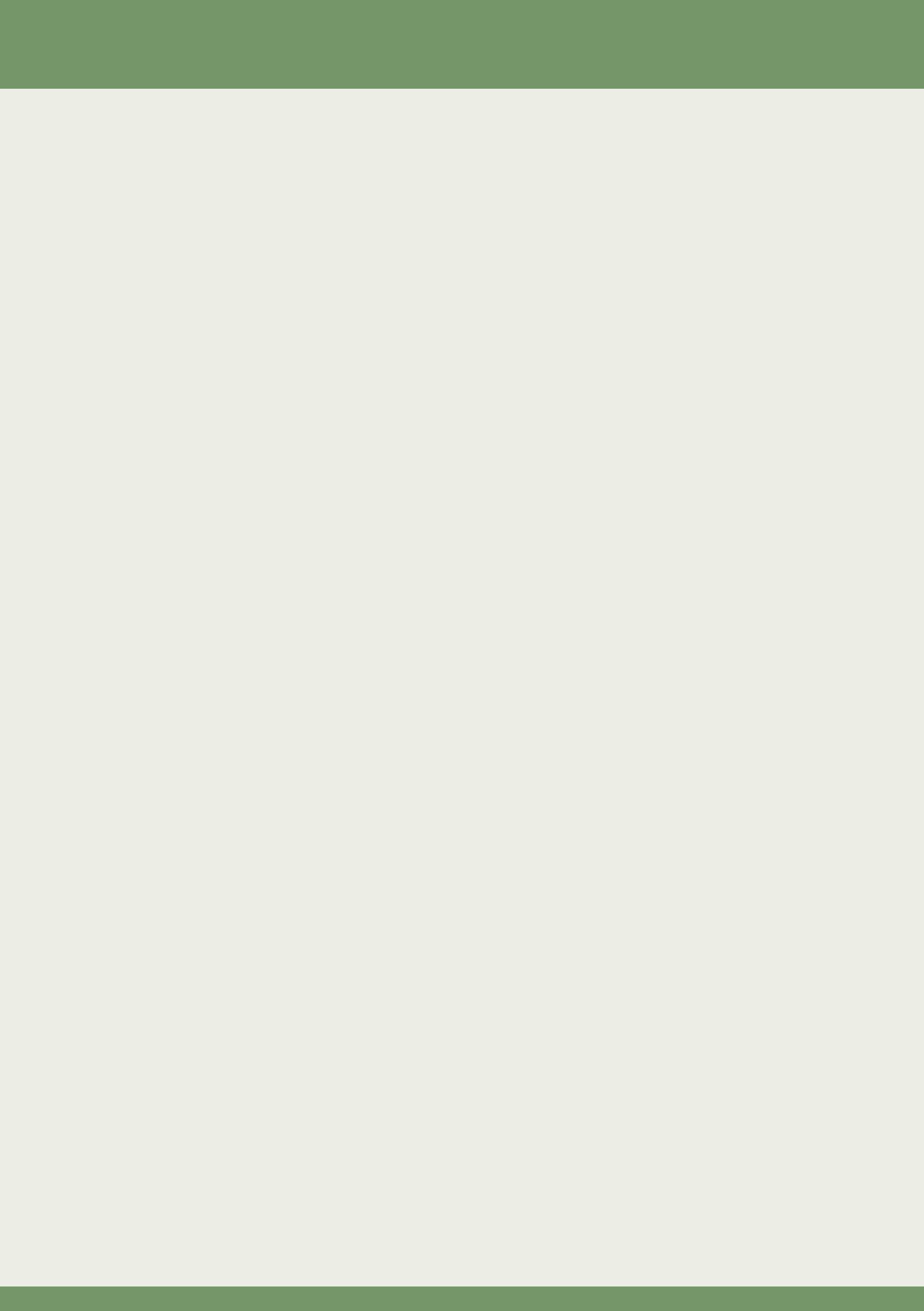
QUATERNÁRIO DE PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 2., e CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DA ZONA COSTEIRA DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2. *Anais...* Recife, 2003, p. 1-4.

SOULSBY, R. **Dynamics of marine sands.** Londres: Thomas Telford Publications, 1997.

VAN ETTINGER, H. D. **Artificial surf reef design:** Dutch swell conditions. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Geociências) – Delft University and Technology, Hydraulic Engineering, Civil Engineering, 2005.

VAN RIJN, L. C. **Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.** Amsterdam: Acqua Publications, 1993.

WEST, A. S.; COWELL, P.; BATTJES, J. A.; STIVE, M. J. F.; DOORN, N.; ROELVINK, J. A. Wave-focusing surfing reefs – a new concept. In: INTERNATIONAL SURFING REED SYMPOSIUM, 3., **Proceedings...** Raglan, New Zealand, 2003, p. 360-370.



MODELAGEM NUMÉRICA DA MORFODINÂMICA DE PRAIAS DO ESPÍRITO SANTO

Tiago Castro Alves Oliveira

Jacqueline Albino

Igor Domingues Venancio

Maria Eduarda Ferreira Mansur

Leandro Xavier Maia

RESUMO

As respostas morfodinâmicas das praias ao longo da costa do estado do Espírito Santo (ES) diante das alterações naturais e antrópicas são muito diversificadas já que são encontradas praias expostas, protegidas por terraços de abrasão ou lajes e em forma de baías. Acredita-se que a modelagem numérica de processos hidrodinâmicos e de transporte sedimentar bem como o uso de séries longas de ondas e marés se apresentem como uma ferramenta fundamental para compreender a evolução e o impacto nas praias ocupadas e naturais ao longo da costa capixaba. No presente trabalho são apresentados três estudos de caso, tendo como objetivos: i) avaliar a performance do SMC-Brasil na modelagem da morfodinâmica de praias do Espírito Santo; e ii) utilizar a base de dados de ondas do SMC-Brasil para verificar potenciais impactos na erosão costeira devido a mudanças de longo prazo no clima de ondas. No primeiro caso de estudo é calculado o transporte longitudinal de sedimentos para uma zona de praias expostas, pouco urbanizadas na região adjacente à foz do Rio Doce localizada na região norte do estado. No segundo caso de estudo são avaliadas as alterações nos padrões de erosão das dunas costeiras devido a mudanças de longo prazo no clima de tempestades marítimas em uma planície costeira de Vilha Velha, onde se situa o Parque Estadual Paulo César Vinha. No terceiro caso de estudo é caracterizada a hidrodinâmica na praia de terraços de laje rochosa de Meaípe-Maimbá, Guarapari. Essa praia localiza-se ao sul do estado, a 70 km da capital, Vitória, tem presença portuária

e infraestruturas urbanas. O SMC-Brasil, com a sua base de dados e os seus modelos de propagação de ondas e transporte de sedimentos, mostrou ser uma ferramenta útil para compreender os processos hidro e morfodinâmicos nas praias estudadas.

Palavras-chave: Foz do Rio Doce. Guarapari. Variações climáticas. Parque Estadual Paulo César Vinha. Transporte longitudinal.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas verifica-se uma intensa ocupação da zona costeira do estado do Espírito Santo devida, principalmente, ao desenvolvimento dos setores portuário, turístico e das atividades em águas profundas. A intensa ocupação desencadeia alterações no equilíbrio sedimentar e na morfodinâmica das praias, que ainda são alteradas pelas variações de longo prazo no clima local de ondas.

A costa do estado do Espírito Santo possui 450 km de extensão voltada para o Oceano Atlântico. Ao longo da costa são identificadas três províncias geomorfológicas:

- a) colinas, promontórios e ilhas cristalinas do Pré-Cambriano;
- b) os tabuleiros sedimentares da Formação Barreiras do Neógeno, que se apresentam levemente inclinados rumo ao mar; e
- c) os terraços arenosos flúvio-marinhos do Quaternário (MARTIN et al., 1996, 1997; ALBINO et al., 2006).

Os terraços quaternários se encontram limitados ora pelas falésias da Formação Barreiras ora pelos afloramentos cristalinos (ALBINO; NETO; OLIVEIRA, 2016). Sua evolução e grau de desenvolvimento estão associados às variações do nível do mar que ocorreram ao longo do Quaternário e à disponibilidade de sedimentos fluviais. A maior extensão dos terraços é verificada nas proximidades de desembocaduras fluviais. A descida relativa do nível do mar ocorrida após o máximo da última transgressão ocorrida em 5100 anos AP resultou na formação dos terraços marinhos, na progradação da linha de costa e no preenchimento por lama e areias e desenvolvimento de manguezais nas baías estuarinas.

O grau de desenvolvimento dos terraços arenosos distribuídos entre os promontórios cristalinos e as falésias sedimentares da Formação Barreiras é responsável pela diversidade na tipologia morfodinâmica das praias, devida às condições de desenvolvimento e/ou acomodação e ao grau de exposição às ondas incidentes (ALBINO et al., 2006).

Dessa forma, as respostas morfodinâmicas das praias ao longo da costa do estado às alterações naturais e antrópicas são muito diversificadas já que são encontradas praias expostas, protegidas por terraços de abrasão ou lajes e embaiadas.

Acredita-se que a modelagem numérica de processos hidrodinâmicos e de transporte sedimentar bem como o uso de séries longas de ondas e marés se apresentam como ferramentas fundamentais para compreender a evolução e o impacto nas praias ocupadas e naturais ao longo da costa.

O presente trabalho apresenta os resultados de três casos de estudo (Figura 9.1), que objetivaram: i) avaliar a performance do SMC-Brasil na modelagem da morfodinâmica de praias do Espírito Santo; e ii) utilizar a base de dados de ondas do SMC-Brasil para verificar potenciais impactos na erosão costeira devidos a mudanças de longo prazo no clima de ondas.

No primeiro caso de estudo é calculado o transporte longitudinal de sedimentos para uma zona de praias abertas, pouco urbanizadas na região adjacente à foz do Rio Doce, localizada na região norte do estado.

No segundo caso de estudo, são avaliadas as alterações nos padrões de erosão das dunas costeiras devidas a mudanças de longo prazo no clima de tempestades marítimas em uma planície costeira de Vila Velha, onde se situa o Parque Estadual Paulo César Vinha.

No terceiro caso de estudo é caracterizada a hidrodinâmica na praia de terraços de laje rochosa de Meaípe-Maimbá, Guarapari. Essa praia localiza-se ao sul do estado, tem presença portuária e de infraestruturas urbanas. Na sua extremidade sul há o porto de Ubu e na porção central, uma importante rodovia estadual que vem sofrendo processos erosivos.

O presente trabalho divide-se da seguinte forma: primeiramente é apresentado o caso de estudo da planície deltaica do Rio Doce. Em seguida é apresentado o caso de estudo do Parque Estadual Paulo César Vinha e então o caso de estudo da Praia de Meaípe-Maimbá. Finalmente, no último item, são apresentadas as conclusões referentes à aplicação do SMC-Brasil aos três casos de estudo.

Figura 9.1 – Localização das praias estudadas: Área de estudo 1 – Planície deltaica do Rio Doce; Área de estudo 2 – Planície costeira do Parque Estadual Paulo César Vinha e Área de Estudo 3 – Praial de Meaípe-Maimbá



Fonte: Dos autores (2018).

PLANÍCIE DELTAICA DO RIO DOCE

A planície deltaica do Rio Doce, com largura máxima de 40 km e extensão em torno de 160 km, corresponde ao maior registro de depósitos sedimentares quaternários ao longo do estado do Espírito Santo. Evidências morfoestratigráficas destacam a atuação da deriva litorânea de sedimentos, da carga e descarga fluvial e das variações do nível do mar na sua evolução (DOMINGUEZ; BITTENCOURT; MARTIN, 1981, 1983; MARTIN et al., 1996, 1997).

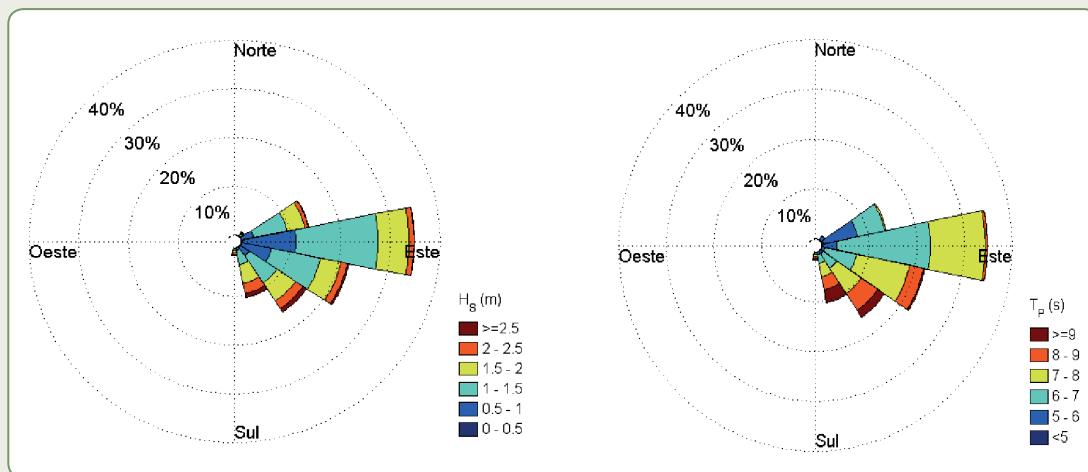
A metodologia deste estudo consistiu numa análise do clima de ondas a aproximadamente 24 m de profundidade, propagação das ondas até a costa e consequente cálculo do potencial de transporte de sedimentos.

Dados de ondas para o período entre 1948 e 2008, correspondendo ao período dos dados analisados, foram obtidos da base de dados de ondas do SMC-Brasil (IH-Data, ondas). Essa base de dados foi obtida do modelo *Global Ocean Wave* (GOW), que consiste numa reanálise de ondas global (REGUERO et al., 2012). As séries temporais dos diferentes parâmetros estatísticos da onda e da energia espectral podem ser obtidas pelo GOW numa malha global com resolução de 1,5° em longitude e 1,0° em latitude e para uma resolução temporal horária. O modelo GOW foi calibrado e validado globalmente utilizando medições instrumentais de 21 boias e por altimetria extraída de imagens de satélites (REGUERO et al., 2012). O processamento da observação pela altimetria incluiu a identificação e eliminação das alterações associadas às perturbações meteorológicas. Neste trabalho foram utilizados os dados de ondas para o ponto de coordenadas 19°30'25,20"S e 39°36'50,40"O.

Na Figura 9.2 apresenta-se a rosa de alturas de onda significativa (H_s) e período de pico (T_p). Verifica-se que 97,3% das ondas têm direção compreendida entre 56,25°N e 168,75°N. O quadrante leste é o que registra mais ondas, seguido dos quadrantes leste-sudeste e sudeste com respectivamente 34,8, 22,1 e 16,1% do total de ondas. Em relação às alturas de ondas significativas 89,4% assumem valores entre 0,5 e 2,0 m sendo que 43,9% encontram-se no intervalo de 1,0 a 1,5 m. Alturas de onda significativas superiores a 2,5 m representam apenas 2,4% sendo que a maioria dessas ondas (70%) pertencem aos quadrantes sudeste e sul-sudeste. A máxima altura significativa nos 60 anos de dados é de 4,2 m.

Em relação aos períodos de pico, 98,3% assumem valores entre 4 e 10 s, sendo que 70,5% encontram-se no intervalo de 6,0 a 8,0 s. Períodos de pico maiores que 10 s representam apenas 1,6%, sendo que a maioria dessas ondas (87%) pertencem aos quadrantes sudeste e sul-sudeste. O máximo período de pico dos 60 anos de dados é de 13,9 s.

Figura 9.2 – Rosa de altura de onda significativa (H_s) e período de pico (T_p) na planície deltaica do Rio Doce



Fonte: Dos autores (2018).

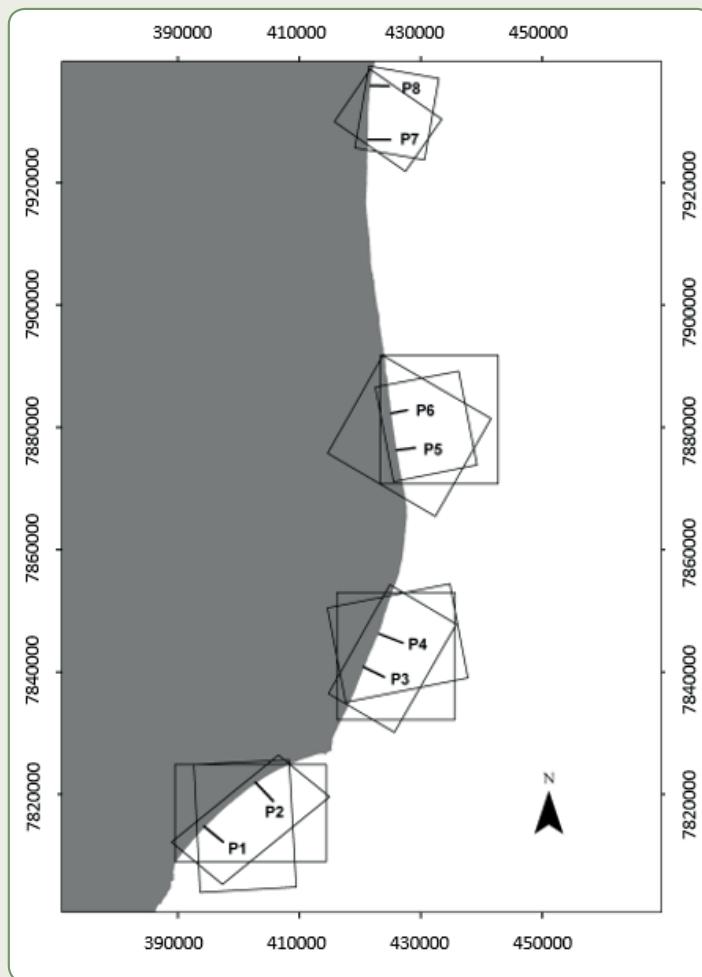
Propagação de ondas até a costa

A propagação das ondas foi feita com o modelo OLUCA-SP, que faz parte do SMC-Brasil. O OLUCA-SP é um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase. O modelo requer como entrada no contorno exterior um estado de mar direcional representado por um espectro bidimensional discretizado em componentes freqüenciais e direcionais, as quais são propagadas de maneira simultânea. O modelo OLUCA-SP considera a refração-difração com interação onda-corrente e as perdas de energia devidas à quebra de ondas.

Na Figura 9.3 apresentam-se as malhas de cálculo usadas para propagar as ondas até a costa na zona adjacente aos perfis onde se calculou o potencial de transporte de sedimento. Devido à existência de ondas provenientes de diferentes direções é necessário o uso de malhas de cálculo com diferentes orientações (entre duas e três malhas diferentes).

A propagação das ondas foi feita partindo de uma batimetria construída a partir de cartas náuticas disponíveis na base de dados do SMC-Brasil para a zona de estudo. Foram propagados 90 casos de ondas representativos que foram escolhidos usando a ferramenta de suporte do SMC-Brasil IH-AMEVA. A propagação das ondas foi feita considerando o nível médio de água do mar.

Figura 9.3 – Localização das malhas de cálculo usadas na propagação das ondas na área de estudo 1: Planície deltaica do Rio Doce. Ver Figura 9.1 para localização da área de estudo 1



Fonte: Dos autores (2018).

Cálculo do transporte de sedimentos

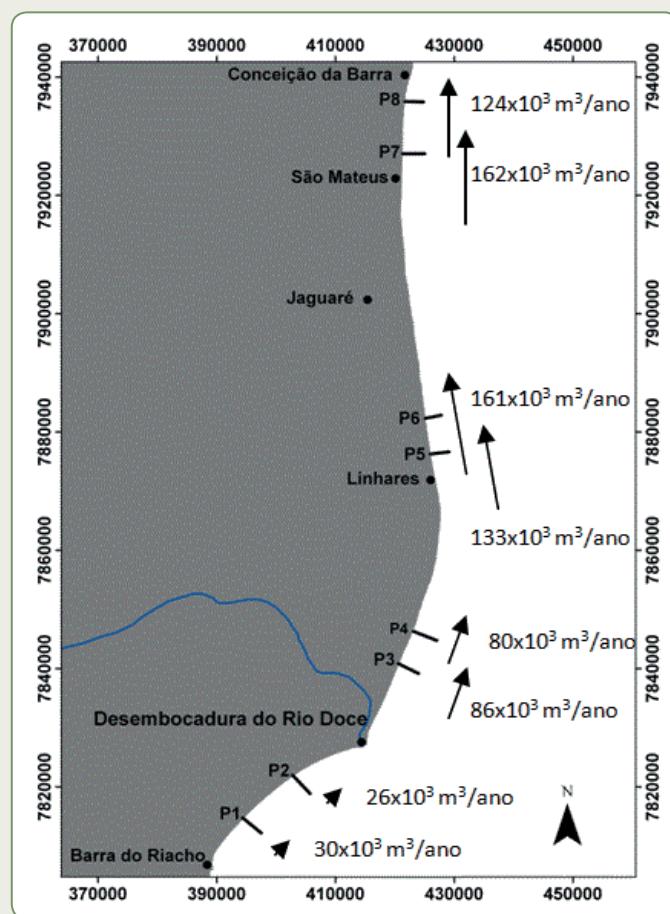
O transporte longitudinal de sedimentos foi calculado para oito perfis na zona de estudo (P1 a P8 na Figura 9.3) usando a fórmula de CERC (1984). Para esse efeito foi usado o IH-DYNAMIC do SMC-Brasil. Essa ferramenta do SMC-Brasil permite a avaliação do ponto de quebra das ondas com base nos resultados da propagação, a avaliação do transporte de sedimentos na costa e a avaliação da

direção média de fluxo de energia. O valor empírico de proporcionalidade (K) da fórmula de CERC foi calculado de acordo com o proposto por Mil-Homens et al. (2013).

Na Figura 9.4 apresentam-se os vetores e a magnitude do transporte longitudinal resultante na planície deltaica do Rio Doce. O transporte longitudinal resultante corresponde à diferença numérica entre o transporte para norte e o transporte para sul, calculado com o clima anual representativo das ondas entre 1948 e 2008. O transporte resultante ao longo de toda a costa é para norte, assumindo maiores valores ao norte da atual desembocadura do Rio Doce.

Bittencourt et al. (2007), estimando o transporte de sedimentos ao longo da planície deltaica do Rio Doce a partir de dados de vento e refração das ondas, reconheceram o potencial de inversão nas direções das correntes longitudinais, estando os processos de acordo com os interpretados a partir das evidências morfoestratigráficas nos terraços arenosos depositados ao longo do Quaternário.

Figura 9.4 – Direção e magnitude do transporte longitudinal líquido de sedimentos no período de 1948-2008



Fonte: Oliveira, Albino e Venancio (2015).

PARQUE ESTADUAL PAULO CÉSAR VINHA

Mudanças nas condições atmosféricas podem alterar as características de onda de gravidade, uma vez que essas são geradas pela transferência de energia do vento para a superfície do oceano. O clima de onda oceânico é altamente variável e essas mudanças temporais e de padrão de ondas extremas afetam desde ecossistemas costeiros até a morfodinâmica de praias.

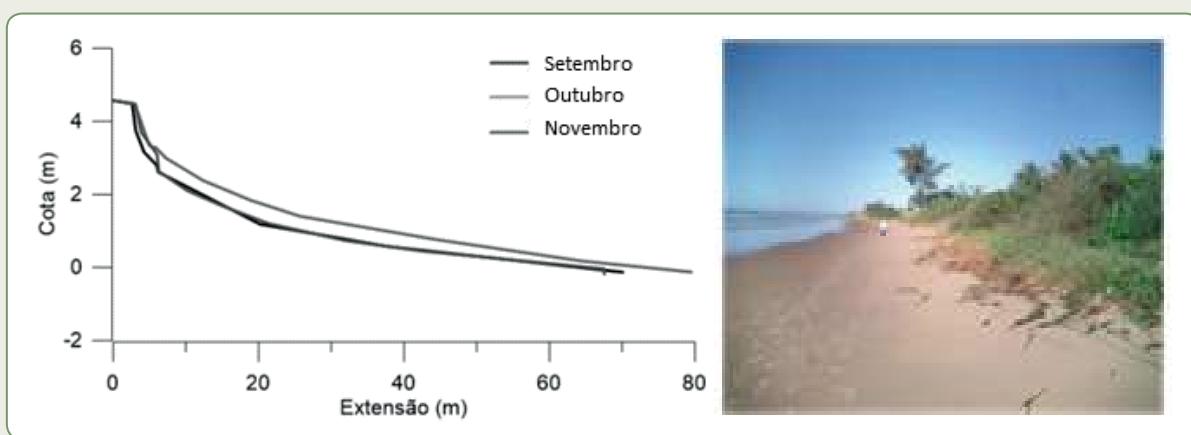
O Parque Estadual Paulo César Vinha consiste numa planície costeira de aproximadamente 1500 ha e localiza-se entre as coordenadas geográficas 20°33'20°38'S e 40°23'40°26'W. O clima regional é tropical e a temperatura anual média é 23,3 °C. A média anual de precipitação é 1307 mm e a média anual da umidade relativa, 80% (FABRIS, 1995). É o parque mais austral de seis áreas de proteção costeira entre Vitória e Guarapari.

Esse parque apresenta conflitos de uso da terra que podem ser agravados por um aumento de eventos de erosão costeira locais. Esse fato ressalta a importância da estimativa das variações de longo prazo na erosão induzidas por ondas de tempestade nesse tipo de ambiente.

O principal objetivo desse caso é estimar a variação de longo prazo da erosão costeira no Parque Estadual Paulo César Vinha devida às variações de longo prazo no clima de ondas local extremo.

Dados de campo morfológicos foram obtidos a partir de perfis de praia em três campanhas realizadas em setembro, outubro e novembro de 2007 (Figura 9.5). Amostras de areia foram coletadas no nível da superfície da face da praia em três campanhas realizadas nas mesmas datas e localização de perfis morfológicos.

Figura 9.5 – Perfis de praia medidos em setembro, outubro e novembro de 2007

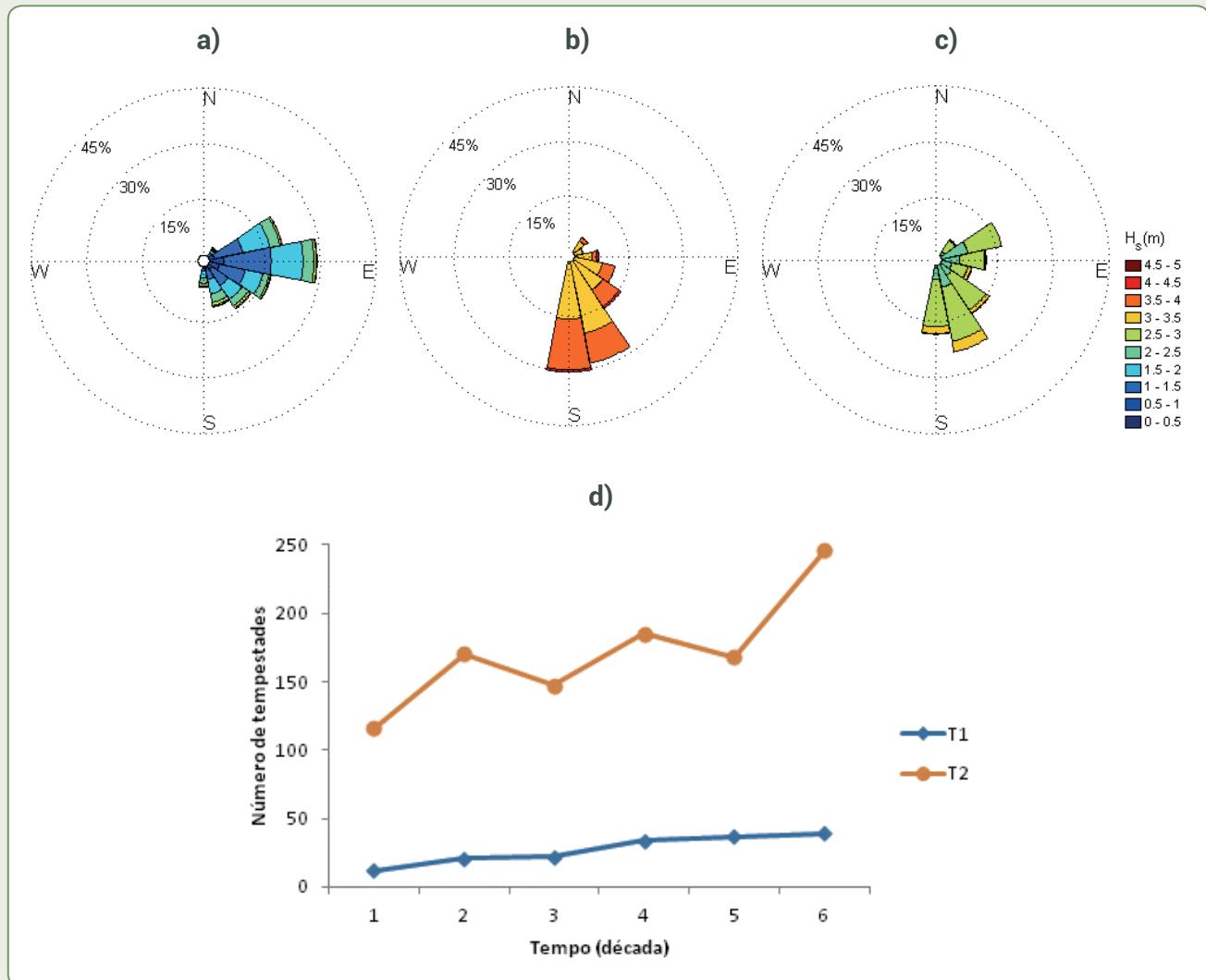


Fonte: Dos autores (2018).

Clima de ondas

Em geral, existem poucos conjuntos de dados de onda de longo prazo do hemisfério sul e, particularmente, ao longo da costa da América do Sul. Como consequência da falta de dados visuais e instrumentais na área de estudo, usou-se a base de dados de ondas do SMC-Brasil para um ponto em águas profundas (1.000 m de profundidade) com coordenadas 20,50°S e 39,75°O.

Dois conjuntos diferentes de tempestades foram analisados. O limite de altura de onda da tempestade do tipo 1 (T1) é $H_s > 2xH_{S(\text{médio})}$ e da tempestade do tipo 2 (T2) é $H_s > 1,5xH_{S(\text{médio})}$. Ambos os tipos de tempestades têm uma duração mínima de seis horas. Para o clima médio a direção de onda dominante é leste (Figura 9.6a), enquanto para tempestade T1 e T2 a direção dominante foi sul e sudeste (Figura 9.6b e 9.6c). No entanto T2 apresentou tempestades de direção nordeste. Os resultados indicam uma tendência para um aumento no número de tempestades T1 e T2, com uma taxa média de crescimento na ordem de 0,6 e 1,5 tempestades/ano, respectivamente (Figura 9.6d).

Figura 9.6 – Rosas de altura de onda significativa média (H_s)

Legenda: a) clima de onda médio; b) tempestades de onda do tipo 1; c) tempestades de onda do tipo 2; d) Evolução do número de tempestades por década

Fonte: Mansur et al. (2015).

Erosão da duna frontal

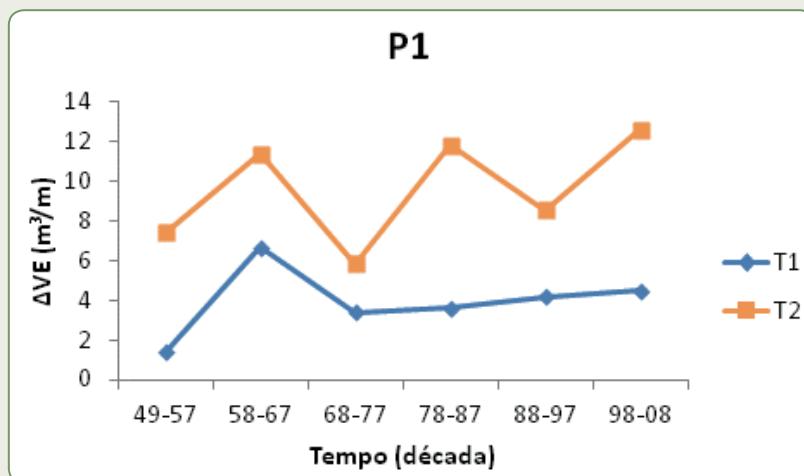
A metodologia que foi utilizada para estimar o volume da erosão da duna (ΔVE em m^3/m de praia) induzida por cada evento de tempestades de onda foi um modelo simplificado proposto por Larson, Erikson e Hanson (2004):

$$\Delta VE = 4Cs(R - z_0)^2 \frac{t}{T} \quad (\text{Eq. 9.1})$$

onde C_s é o coeficiente empírico de transporte, R a altura de espraiamento (*runup*) (m), t é a duração da ação da onda (s) e T é o período (s) de onda.

A evolução por década do volume potencial de erosão da duna frontal entre 1949-2008 pode ser observada na Figura 9.7. Os resultados correspondem à aplicação da fórmula 9.1, considerando os valores médios dos perfis e sedimentos recolhidos nas três campanhas de campo e as tempestades T1 e T2 obtidas da análise dos dados de onda da base de dados do SMC-Brasil.

Figura 9.7 – Evolução do volume potencial por década da erosão da duna frontal entre 1949-2008



Fonte: Dos autores (2018).

Observando a Figura 9.7, é possível identificar uma tendência positiva significativa nas últimas quatro décadas. Considerando T2 para o período 1968-2008, observa-se um aumento de $0,19 \text{ m}^3/\text{m/década}$ para ΔVE . Essa tendência positiva está relacionada com o aumento verificado no número de tempestades nas últimas quatro décadas (Figura 9.6d). Em geral, pode-se observar que o padrão de evolução do potencial de erosão de duna frontal está relacionado com o padrão de evolução do número de tempestades.

Em geral verifica-se que como consequência das mudanças climáticas, os resultados indicaram uma tendência positiva para o número de eventos extremos de onda entre 1949-2008. Essa variação foi maior nas últimas três décadas. O crescimento verificado no número de tempestades foi a causa para um aumento do potencial de erosão de dunas na área de estudo.

PRAIA DE MEAÍPE-MAIMBÁ

A Praia de Meaípe-Maimbá está localizada a 70 km ao sul de Vitória, a capital do estado, nos municípios de Guarapari e Anchieta. Colinas de rochas cristalinas, pré-cambrianas e planícies sedimentares do Neógeno se alternam ao longo desse litoral, formando praias e planícies descontínuas. A praia tem aproximadamente 10 km de extensão, delimitada ao norte e ao sul pelos promontórios cristalinos Ponta de Meaípe e Ponta de Ubu, respectivamente. Falésias e terraços de abrasão desenvolvem pequenos arcos praiais ao longo da praia (Figura 9.8), e ilhas estão presentes na porção central do arco. A estreita faixa de areia limitada pelas falésias não protege a costa e as estruturas urbanas contra a ação erosiva do mar (ALBINO; JIMENEZ; OLIVEIRA, 2016). Processos de erosão são observados ao longo da rodovia ES 010 (Figura 9.8c). Em 1977, a construção de um porto na porção sul dividiu a enseada em duas praias embaiadas distintas, sendo que do porto ao promontório norte a praia apresenta 7,7 km de extensão.

A composição das areias é predominantemente siliciclástica, contudo a concentração de minerais pesados pode alcançar 45%, devido à remoção da fração leve em eventos erosivos (Figura 9.8b e 9.8c). A composição de minerais pesados assim como os aspectos morfológicos e superficiais dos grãos de quartzo, como alta percentagem de grãos angulosos e foscos, indicam a alta contribuição dos sedimentos erodidos nas falésias da Formação Barreiras (PIROLA et al., 2014).

A orientação da costa é aproximadamente NE-SW e se encontra exposta ao sistema atmosférico do Atlântico. Os ventos mais frequentes são os de E e SE, associados ao ventos alísios e aos incidentes durante a passagem de frentes frias, respectivamente.

Figura 9.8 – a) Falésias ativas no setor central da Praia de Meaípe-Maimbá; b) Terraços de abrasão e alta concentração de minerais pesados; c) Processos de erosão ao longo da rodovia ES 010; e d) Enrocamento de proteção



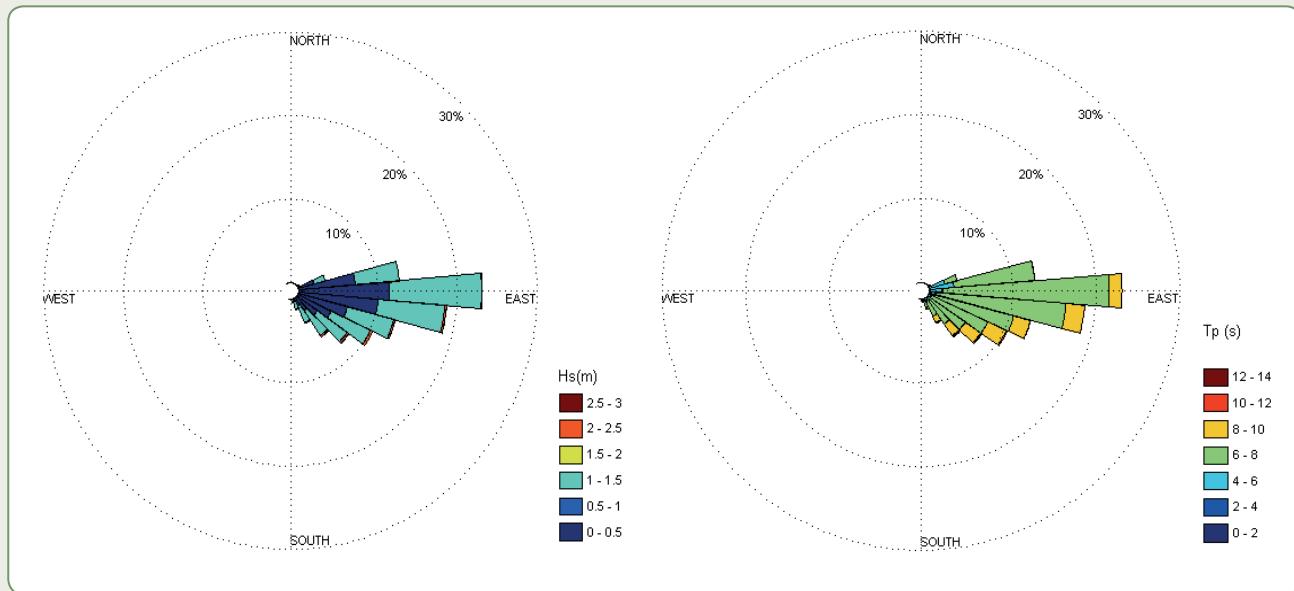
Fonte: a, b e c) dos autores (2007); d) dos autores (2012).

Clima de ondas

Foram usados os dados de onda do modelo GOW para o ponto de coordenadas 20°50'S e 40°25'W (30 m de profundidade) entre 1970 e 2008. A Figura 9.9 apresenta a distribuição de H_s e T_p para o período de 38 anos. As ondas, na maioria, provêm de direções entre sudeste e leste (63%) e entre nordeste e leste (25%). Os intervalos de ondas mais comuns são 0,5 a 1,0 m (47%) e 1,0 a 1,5 m (42%),

enquanto ondas de 2,0 m de altura ou superiores têm uma probabilidade de ocorrência de 1,5%. Em relação ao período das ondas, 76,42% estão entre os 6,0 e os 8,0 s.

Figura 9.9 – Rosa de altura de onda significativa (H_s) e período de pico (T_p) a 30 m de profundidade na Praia de Meaípe-Maimbá



Fonte: Dos autores (2018).

Propagação de ondas para a praia

Na Figura 9.10 são apresentados resultados de propagação feita com o modelo OLUCA-SP, que faz parte do SMC-Brasil previamente apresentado. São apresentados resultados para três casos representativos das condições locais de ondas:

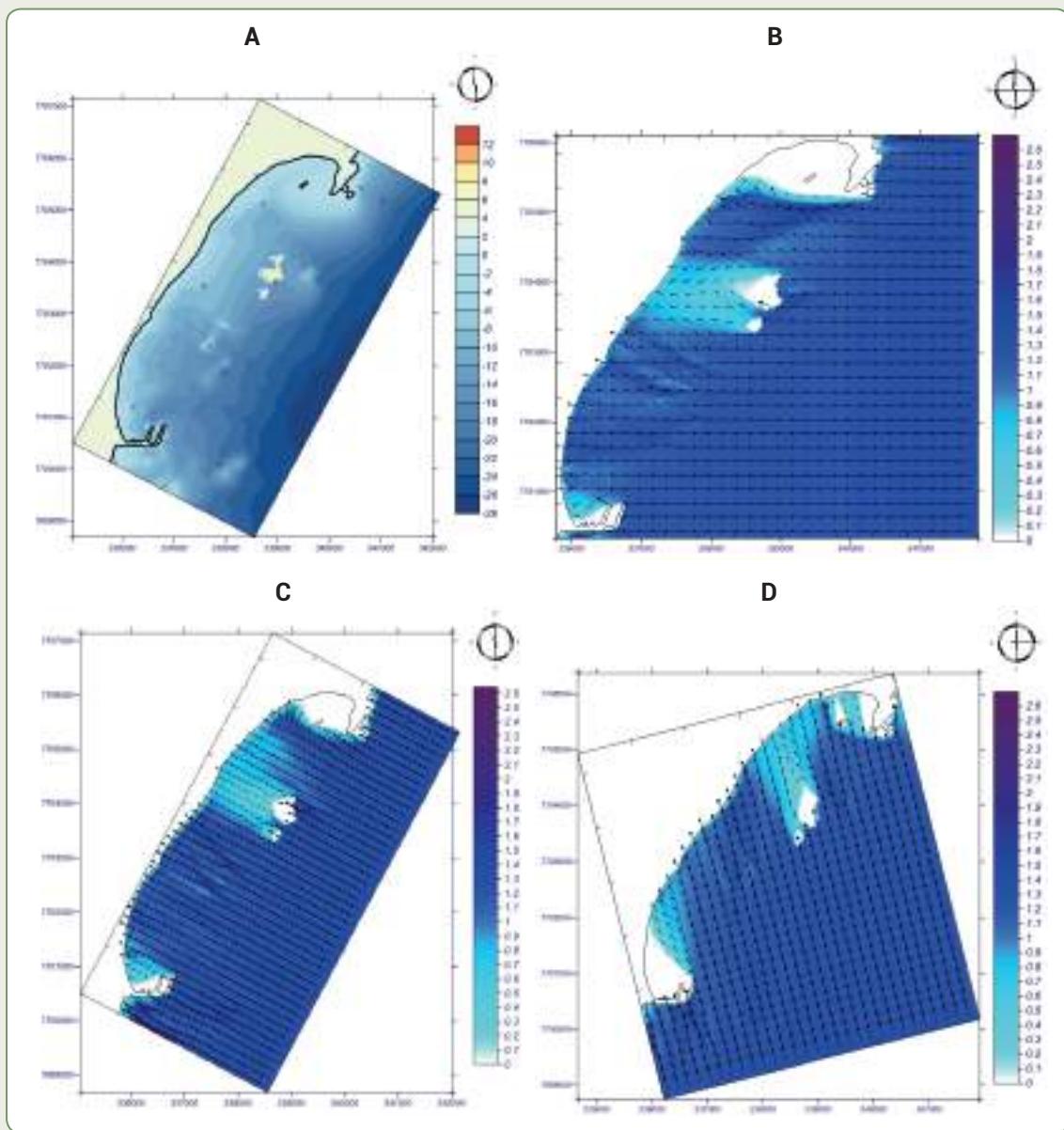
- 1) $H_s = 1,3 \text{ m}$, $T_p = 7,3 \text{ s}$ e $Dr = 90^\circ$
- 2) $H_s = 1 \text{ m}$, $T_p = 7,3 \text{ s}$ e $Dr = 136^\circ$
- 3) $H_s = 1,3 \text{ m}$, $T_p = 7,3 \text{ s}$ e $Dr = 165^\circ$.

Da observação dessas figuras é possível observar o efeito de sombra exercido pelas ilhas que estão presentes na porção central da praia.

Para as ondas 2 e 3, a zona central da praia recebe uma concentração da energia das ondas. Esse fato pode justificar a erosão das falésias ativas que se encontram nessa parte da praia.

Apesar dos mapas de propagação de ondas indicarem uma alta incidência de ondas na parte sul, nessa parte a praia é mais extensa e as falésias são mais preservadas do que no restante da praia.

Figura 9.10 – a) Mapa batimétrico da área de estudo; b) Propagação de onda característica da zona de estudo em m ($H_s = 1,3$ m, $T_p = 7,3$ s e $Dr = 90^\circ$); c) Propagação de onda característica da zona de estudo em m ($H_s = 1$ m, $T_p = 7,3$ s e $Dr = 136^\circ$); d) Propagação de onda característica da zona de estudo em m ($H_s = 1,3$ m, $T_p = 7,3$ s e $Dr = 165^\circ$)



Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÕES

A diversidade das praias do Espírito Santo obriga a utilização de uma ampla gama de modelos numéricos para compreender os processos morfodinâmicos costeiros.

O SMC-Brasil, com a sua base de dados e os seus modelos de propagação de ondas e transporte de sedimentos, mostrou-se uma ferramenta útil para compreender os processos hidro e morfodinâmicos nas praias com diferentes tipologias (praias abertas, praias com lajes e praias de baía) ao longo do litoral

do estado do Espírito Santo. Devido à ausência de séries de dados de longa duração medidos na costa do Espírito Santo, a base de dados de ondas do SMC-Brasil mostrou-se uma ferramenta de extrema importância para verificar os potenciais impactos na erosão costeira no ES devidos a mudanças de longo prazo no clima de ondas.

No entanto verificou-se a dificuldade de obtenção de batimetria detalhada em águas rasas para todas as praias. Em especial as praias com terraços de abrasão ou lajes rochosas presentes no ES apresentam limitante adicional pela dificuldade de execução de levantamentos batimétricos nessas zonas.

No primeiro caso de estudo foi calculado o transporte longitudinal de sedimentos para uma zona de praias abertas, pouco urbanizadas, na região adjacente à foz do Rio Doce localizada na região norte do estado. Os resultados estão de acordo com o conhecimento adquirido em trabalhos pretéritos e indicam que o transporte longitudinal pela ação das ondas ocorre essencialmente de sul para norte. Devido à existência de diferentes alinhamentos da linha de costa a magnitude do transporte total anual de sedimentos varia espacialmente (entre 26×10^3 e 162×10^3 m³/ano), assumindo maiores valores ao norte da atual desembocadura do Rio Doce.

Em relação ao Parque Estadual Paulo César Vinha, verifica-se uma tendência de crescimento do número de eventos extremos como consequência na mudança de longo prazo (1949-2008) no clima de ondas. Esse aumento, com uma taxa média de crescimento na ordem de 0,6 tempestades/ano para as tempestades mais severas, é a causa para um aumento do potencial de erosão das dunas frontais desse parque (calculado em 0,19 m³/m/década). Da análise do clima de tempestades ao largo do Parque Estadual Paulo César Vinha verifica-se que as direções principais das ondas de tempestades diferem das direções mais prováveis do clima médio. Enquanto para o clima médio a direção de onda dominante é leste, para tempestades a direção dominante foi sul e sudeste. No entanto, quando considerado um limite mais baixo de altura de onda para início de tempestade ($H_s > 1,5 \times H_{S(\text{médio})}$), são encontradas também tempestades de nordeste.

Os resultados obtidos para a Praia de Meaípe-Maimbá evidenciam o papel das lajes rochosas e de pequenas ilhas na variabilidade das condições de ondas ao longo da praia. Evidências geomorfológicas mostram que na parte norte ocorre processo erosivo com queda da falésia e da rodovia adjacente, a Rodosol, devido à deriva litorânea. Na parte sul também deveria ocorrer um processo erosivo. Entretanto, há a presença de uma armadilha representada pelo espião do Porto de Ubu, que faz com que o sedimento fique retido a barlamar do porto, e a praia apresente uma largura aproximada de 200 m. Assim, corrobora-se a hipótese de que a dinâmica sedimentar apresenta padrões diferentes de potencial de transporte ao longo da praia, mostrando a existência de zonas com maior potencial erosivo com deriva de norte para sul.

REFERÊNCIAS

- ALBINO, J.; CONTI NETO, N.; OLIVEIRA, T. C. A. The beaches of Espírito Santo. In: SHORT, A. D.; KLEIN, A. H. F. (Ed.). **Brazilian beach systems**. [S.l.]: Springer, 2016. Springer's Coastal Research Series. ISBN 978-3-319-30392-5.
- ALBINO, J.; GIRARDI, G.; NASCIMENTO, K. A. Espírito Santo. In: MUEHE, D. **Progradação e erosão do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério de Meio Ambiente MMA, 2006. p. 227-264.
- ALBINO J.; JIMENEZ, J. A.; OLIVEIRA, T. C. A. Planform and mobility in the Meaípe-Maimbá embayed beach on the South East coast of Brazil. **Geomorphology**, v. 253, p. 110-122, 2016.

BITTENCOURT, A. C. S. P.; DOMINGUEZ, J. M.; MARTIN, L.; SILVA, I. R.; DE-MEDEIROS, K. O. Past and current sediment dispersion pattern estimates through numerical modeling of wave climate: an example of the Holocene delta of the Doce River, Espírito Santo, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciência*, v. 79, n. 2, p. 333-341, 2007.

COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (CERC). *Shore Protection Manual*. Vicksburg, Mississippi: USACE, 1984. (v. 1 e 2).

DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P.; MARTIN, L. Esquema evolutivo da sedimentação quaternária nas feições deltaicas dos Rios São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, n. 4, p. 227-237, 1981.

DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. S. P., MARTIN, L. O papel da deriva litorânea de sedimentos arenosos na construção das planícies costeiras associadas a desembocaduras dos Rios São Francisco (SE/AL), Jequitinhonha (BA), Doce (ES) e Paraíba do Sul (RJ). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 13, n. 4, p. 93-105, 1983.

FABRIS, L. C. *Composição florística e fitossociológica de uma faixa de floresta arenosa litorânea do Parque Estadual de Setiba, município de Guarapari, ES*. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1995. 195 p.

LARSON, M.; ERIKSON, L.; HANSON, H. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, v. 51, p. 675-696, 2004.

MANSUR, M. E. F.; OLIVEIRA, T. C. A.; RIGO, D.; ALBINO, J. Effects of climate change on the extreme wave climate in Espírito Santo (Brazil). Implications to erosion in coastal protected areas. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON THE WORLD'S OCEANS, 3., 2015. *Proceedings...*, Santos, Brazil, 2015, v. 1, p. 257.

MARTIN, L.; SUGUIO, K.; DOMINGUEZ, J. M. L; FLEXOR, J. M. *Geologia do quaternário costeiro do litoral norte do Rio de Janeiro e do Espírito Santo*. São Paulo: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP), 1997, 112 p.

MARTIN, L.; SUGUIO, K; FLEXOR, J. M.; ARCHANJO, J. D. Coastal quaternary formations of the southern part of the state of Espírito Santo (Brazil). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n. 3, p. 389-404, 1996.

MIL-HOMENS, J.; RANASINGHE, R.; VAN THIEL DE VRIES, J. S. M.; STIVE, M. J. F. Re-evaluation and improvement of three commonly used bulk longshore sediment transport formulas. *Coastal Engineering*, v. 75, p. 29-39, 2013.

OLIVEIRA, T. C. A.; ALBINO, J.; VENANCIO, I. D. Transporte longitudinal de sedimentos no litoral da planície deltaica do Rio Doce. *Quaternary and Environmental Geosciences*, v. 6, n. 1, p. 1-6, 2015.

PIROLA, F. B.; KASHIMOTO, J. S.; SANTOS, V. M.; ROSA, M.; ALBINO, J. Formação Barreiras como aporte de sedimento recente a Praia de Meaípe-Maimbá, ES. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRÁFIA, 4., 2014. *Anais...* Itajaí: Univali, 2014. v. 1. p. 1556-1557.

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

VARIABILIDADE PRAIAL NAS PRAIAS DO LÁZARO, DOMINGAS DIAS E SUNUNGA, LITORAL NORTE DE SÃO PAULO, RELACIONADA À PASSAGEM DOS SISTEMAS FRONTAIS – UBATUBA (SP)

Daniele Gentile Cardoso
Moyses Gonzalez Tessler

RESUMO

O presente trabalho propõe caracterizar a variabilidade espacotemporal dos prismas praiais das praias do Lázaro, Domingas Dias e Sununga em relação às variáveis meteorológicas e oceanográficas, condicionadas pela passagem dos sistemas frontais, proporcionando a compreensão da evolução morfológica desse segmento costeiro da Enseada da Fortaleza. Para a caracterização morfodinâmica da face praial das praias da Sununga, Lázaro e Domingas Dias, no município de Ubatuba (SP), foi utilizado o método de caminhamento com o uso de equipamento de precisão em posicionamento geográfico (DGPS), análises meteorológicas e o sistema de modelagem costeira (SMC) para entender o padrão de incidência de ondas. Os principais resultados encontrados colaboraram para concluir que as praias do Lázaro, Domingas Dias e Sununga, embora estejam inseridas na mesma enseada e possuam as mesmas características geológicas, meteorológicas e oceanográficas, se comportam de maneiras distintas diante dos processos dinâmicos de ondas geradas nos sistemas frontais, e nos sistemas de “tempo bom”, devido ao nível de exposição a que ficam submetidos seus arcos praiais. O acompanhamento espacotemporal

das três praias da Enseada da Fortaleza, todas com suas faces praiais voltadas rumo aos quadrantes a sul, sob as mesmas condicionantes de origem climática, geológica, oceanográfica e antrópica, evidenciou que a intensidade dos processos de perda e recuperação sedimentar dessas praias não depende apenas do grau de proteção ou de exposição desses ambientes à ação mais direta das ondas mais esbeltas, mais energéticas, mas também da possibilidade de remobilização de sedimentos dentro do próprio prisma praial.

Palavras-chave: Sistema de Modelagem Costeira (SMC). Morfodinâmica costeira. Litoral norte do estado de São Paulo. Ubatuba. DGPS.

INTRODUÇÃO

Os diferentes graus de exposição das praias aos fatores hidrodinâmicos, responsáveis pela alteração no perfil praial, são função, principalmente, da orientação da linha de costa (PUGH, 1986). Essa diferença de graus de modificação entre as praias deve-se à localização dos segmentos praiais em relação ao comprimento total da pista de vento ao longo do oceano. Assim, praias localizadas próximas ou distantes da pista sofrerão respectivamente menor e maior alteração. Fatores adicionais relacionados a diferentes orientações da linha de costa, ao estágio praial e à morfologia da antepraia contribuem para acentuar diferenças espaciais nos volumes acrescidos ou retirados do prisma praial.

As características granulométricas e morfológicas das praias variam em função de fatores geológicos, geomorfológicos e oceanográficos. A morfologia de uma praia em um determinado tempo é função das características dos sedimentos, das ondas imediatas e antecedentes, das condições de maré e de vento, e do estágio de praia antecedente.

Klein et al. (1997), estudando a variabilidade temporal da praia semiprotegida de Camboriú, notaram que as variações de volume de sedimentos na face praial foram condicionadas por variações nas direções dos trens de ondas, sendo cíclicas e menos bruscas que aquelas verificadas em praias expostas ou oceânicas.

Martins (2006) aplicou pela primeira vez estudos de reduzida variabilidade temporal e espacial, com a utilização de um DGPS na Praia da Sununga em Ubatuba, São Paulo. Sabendo-se que esse segmento não possuía influência atual de dinâmica fluvial, foi possível avaliar a dinâmica local relacionada unicamente aos agentes oceanográficos, tendo como fonte de sedimento a antepraia adjacente e os costões rochosos. O trabalho classificou a dinâmica desse setor praial como intensa, concluindo que essa praia é controlada pela dinâmica de ondas que resultam em um processo de rotação praial.

Em decorrência da ausência de trabalhos que correlacionem processos morfodinâmicos com eventos climáticos nessa região, o principal objetivo desse estudo é caracterizar a variabilidade espaço-temporal dos prismas praiais das Praias do Lázaro, Domingas Dias e Sununga em relação às variáveis meteorológicas e oceanográficas, condicionadas pela passagem dos sistemas frontais, proporcionando a compreensão da evolução morfológica desse segmento costeiro da Enseada da Fortaleza, usando como comparativo o estudo realizado por Martins (2006) na Praia da Sununga.

Estudos morfodinâmicos relacionados a processos meteorológicos são muito importantes nessa região, por permitir correlacionar de forma direta os eventos climáticos extremos e os diferentes níveis de modificação dos prismas praiais do litoral norte paulista.

CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA

O litoral norte de São Paulo é formado por pequenas enseadas e praias de bolso formadas por depósitos continentais na sua porção interna e marinha na porção externa (FÚLFARO et al., 1974).

O município de Ubatuba está localizado no estado de São Paulo, no setor litorâneo em que as escarpas da Serra do Mar mais se avizinharam do oceano e, em decorrência disso, caracteriza-se por apresentar uma linha de costa recortada, composta por várias enseadas semiconfinadas, limitadas por pontões do embasamento cristalino que avançam em direção ao mar (ANDRADE, 2002).

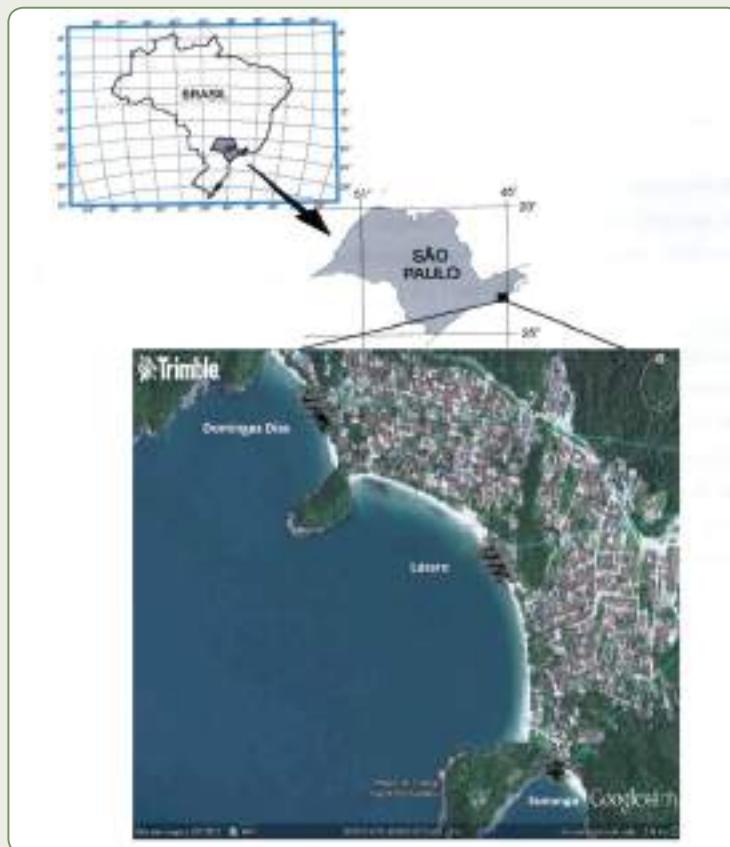
A Enseada da Fortaleza é composta basicamente de praias de enseada, de diferentes orientações e graus de exposição, e fortemente exposta às ondulações durante a passagem de sistemas frontais.

A Enseada da Fortaleza apresenta desembocadura voltada para sudeste, o que determina a forte influência dos trens de ondas vindos de S-SE, que se formam em situações de passagem de sistemas de frentes frias.

Nesse segmento costeiro os sistemas frontais, após se deslocarem para áreas mais a norte do litoral paulista, geram sistemas de ondas incidentes provenientes dos quadrantes a NE.

O trabalho se desenvolveu em três praias da Enseada da Fortaleza, sendo elas, Praia do Lázaro, cujos extremos são representados pelas coordenadas ($23^{\circ}30'01,50''S$ e $23^{\circ}30'29,53''S$, $45^{\circ}08'34,38''$ e $45^{\circ}08'05,92''W$) com aproximadamente 1,5 km de extensão, Domingas Dias, cujos extremos são representados pelas coordenadas ($23^{\circ}29'59,64''S$ e $23^{\circ}29'47,46''S$, $45^{\circ}08'36,90''$ e $45^{\circ}08'48,16''W$) com 500 m de extensão, e Sununga, cujos extremos são representados pelas coordenadas ($23^{\circ}29'30''S$ e $23^{\circ}32'30''S$, $45^{\circ}06'30''W$ e $45^{\circ}10'30''W$) com 250 m de extensão (Figura 10.1).

Figura 10.1 – Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Adaptado de Andrade (2002).

A Praia da Sununga é uma praia de bolso, margeada por dois costões rochosos de pequena extensão (250 m), apresentando característica refletiva, com alto retrabalhamento sedimentar e rotação praial (MARTINS, 2006) (Figura 10.1).

A Praia do Lázaro, margeada em seu lado esquerdo pela Praia da Sununga e em seu lado direito pela Praia da Domingas Dias, é uma praia mais extensa (1,5 km), em relação as que a margeiam, apresentando tendências intermediárias a dissipativas (Figura 10.1).

A Praia da Domingas Dias apresenta-se com as águas mais calmas dentre as três, ou seja, com uma menor hidrodinâmica, e possui uma pequena extensão de aproximadamente 500 m e predominantemente um perfil praial de intermediário a refletivo (Figura 10.1).

O litoral paulista sofre influência de duas massas de ar, uma de origem tropical marítima e outra polar marítima. Em escala regional, os anticiclones migratórios do sul ou anticlones polares móveis (APM), antecedidos pelas frentes frias, são os responsáveis pelas frontogêneses no sul do país (MARTINS, 2006).

Durante os meses de inverno, no litoral sudeste do Brasil, a ocorrência de sistemas frontais é maior (SUGAHARA, 2000; SILVA; DIAS, 2002) e a pluviometria média anual é de cerca de 803 mm, com as intensidades máximas sendo observadas em fevereiro (OLIVEIRA et al., 2005).

Duas direções predominantes das ondas atingem o litoral norte paulista: as ondas provenientes dos quadrantes a S (S; SE; SW), que estão associadas à passagem de frentes frias, e as ondas provenientes dos quadrantes a E-NE, associadas aos centros de geração semipermanentes do Atlântico Sul e também aos eventos pós-frontais. A interação dessas ondas com a orientação e dimensão das bocas das enseadas, além da presença de ilhas na plataforma interna, conferem características distintas na dinâmica e, consequentemente na evolução morfodinâmica das praias de enseada (OLIVEIRA et al., 2005).

A dinâmica da praia é fortemente influenciada pela incidência dos trens de ondas, que na costa de São Paulo não apresentam associação direta com os ventos locais e sim com os ventos gerados no oceano. Esses trens de ondas são associados aos eventos climáticos de frente fria e tempo bom que ocorrem na região, como estudado por Martins (2006) na Praia da Sununga.

Ao analisar a variabilidade do prisma praial, podem ser interessantes também as características dos eventos extremos, já que estes resultam nas maiores e mais rápidas modificações na praia.

MÉTODOS

Os levantamentos praiais foram realizados durante o ano de 2012 e correspondem aos dias 19, 20, 21, 22 e 23 de junho, 08, 09, 10, 11, 12 e 13 de julho e 28, 29, 30 e 31 de agosto, resultando em um período total amostrado de dois meses e meio (18 de junho a 31 de agosto).

Durante as etapas de campo foram coletados dados topográficos da face praial, amostras de sedimento do setor emerso e parâmetros climáticos e hidrodinâmicos.

Para a caracterização morfodinâmica da face praial das praias da Sununga, Lázaro e Domingas Dias, no município de Ubatuba, São Paulo, foi utilizado o método de caminhamento com o uso de equipamento de precisão em posicionamento geográfico (DGPS).

Os parâmetros oceanográficos auxiliares para análise das alterações observadas foram obtidos durante as fases de levantamentos em campo, a partir de informações obtidas pela base norte do Instituto Oceanográfico (IO) da USP, cartas sinóticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DNH) e boletins Climanálise do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Dados meteorológicos e oceanográficos

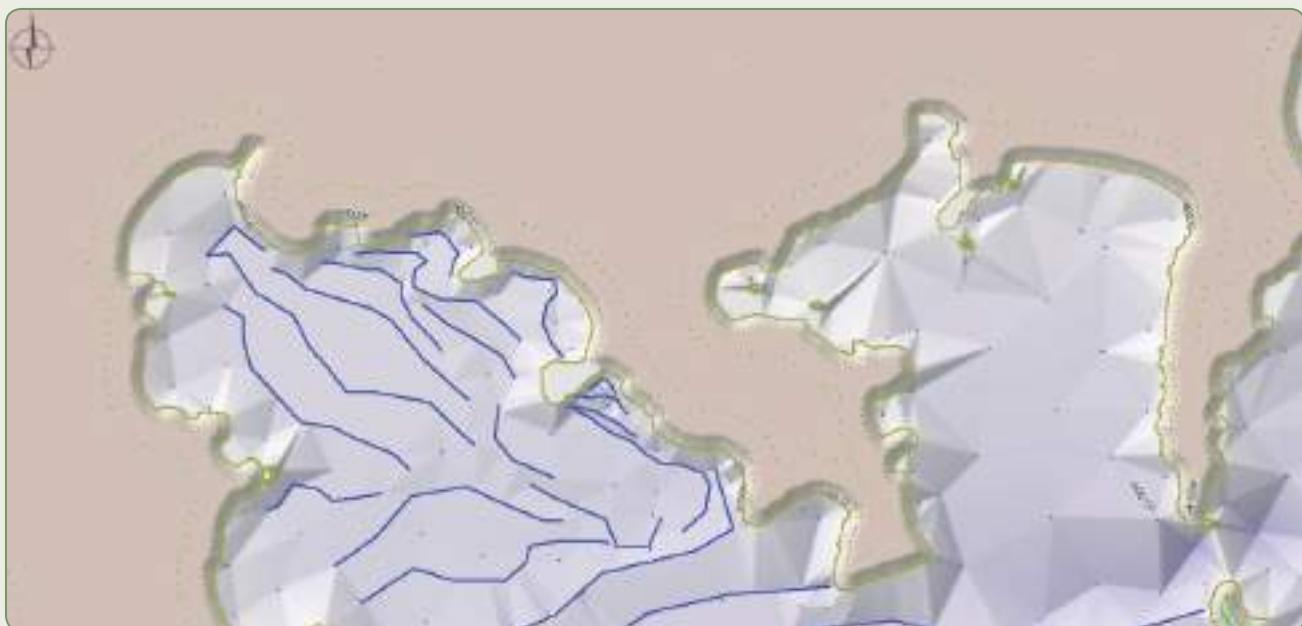
Foram utilizados dados de observação de precipitação e temperatura registrados na estação meteorológica localizada na base norte do IOUSP, em Ubatuba, e das informações contidas nas cartas sinóticas disponibilizadas pelo Serviço Meteorológico Marinho da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, para a identificação do número de sistemas frontais que atuaram junto à costa do estado de São Paulo no período estudado, e dados de ventos associados a esses sistemas.

A variação da maré em Ubatuba corresponde a um regime de micromaré. Os dados de maré foram obtidos através do marégrafo da base norte do Instituto Oceanográfico da USP localizado em Ubatuba.

Propagação de ondas

Para a obtenção dos dados de onda, foi utilizado o Sistema de Modelagem Costeira (SMC). Os dados de batimetria foram retirados das cartas náuticas referentes à costa do Brasil disponíveis na base de dados desse sistema de modelagem representadas pela Figura 10.2.

Figura 10.2 – Imagem da batimetria utilizada no estudo



Fonte: Dos autores (2018).

Na construção da base de dados de reanálise das séries de maré meteorológica e de ondas, que foram utilizados neste estudo, o IH Cantábria utilizou dados de pressão e vento. Os dados foram obtidos do Projeto de Reanálises NCEP/NCAR da Physical Sciences Division (NOAA/ESRL) devido a sua cobertura global, a sua resolução espacial e ao alcance temporal que esses dados atmosféricos proporcionam. Os dados cobrem o período de 1948 a 2008, sendo periodicamente atualizados (LUCA, 2011).

A propagação realizada utilizou os modelos SWAN (*Simulating Waves Nearshore*, desenvolvido por Delft University of Technology) e OLUCA-SP (modelo parabólico de propagação de ondas espectrais do Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas da Universidade de Cantabria, que será chamado neste trabalho como OLUCA), através da aplicação S2O (*Swan to OLUCA*), também desenvolvido pelo Grupo de Engenharia Oceanográfica e de Costas da Universidade de Cantabria (LUCA, 2011).

Levantamento topográfico

Os levantamentos topográficos foram realizados com equipamento de posicionamento geográfico em modo diferencial (DGPS) da marca Trimble, sendo a base fixa constituída pelo receptor L200 e antena Zephir e a estação móvel constituída pelo receptor R3 e antena A3 entre junho e agosto de 2012. Nesse período foram monitorados três setores praiais, um em cada praia estudada, com malhas de caminhamento, como apresentado na Figura 10.3.

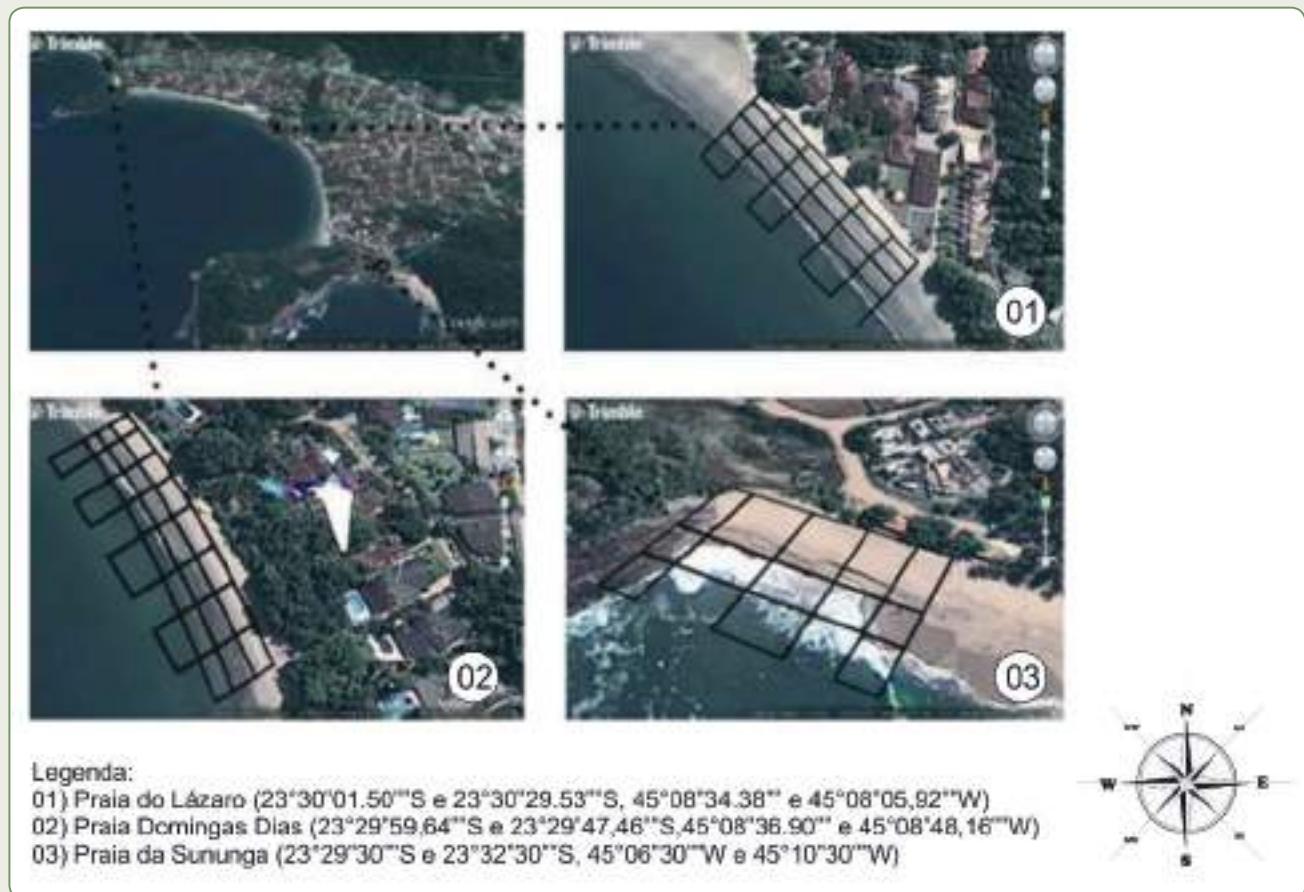
Durante os levantamentos foi utilizada a configuração PPK (*Pos Processed Kinematic*) do aparelho, na qual os dados de ambas as estações são coletados de forma independente e são processados posteriormente.

A estação fixa foi localizada no condomínio Pedra Verde, localizado na Praia do Lázaro, em frente à praia, com coordenadas $23^{\circ} 30'02,14961''S$ e $45^{\circ} 08'20,41346''W$.

Os dados foram coletados por meio de um caminhamento contínuo, em perfis transversais separados por distâncias de 18 m (condicionadas em função das variações morfológicas da praia), do pós-praia até a área submersa de -0,5 m de profundidade, de maneira que não colocasse em risco o equipamento utilizado, cortados por um perfil contínuo longitudinal que acompanhou a interface entre a areia seca, a areia molhada e a zona de surfe. Foram também executados caminhamentos nas áreas de presença de cúspides praiais, quando existentes, e um caminhamento junto ao limite do pós-praia.

Os dados do levantamento topográfico (DGPS) gerados em campo foram referenciados para o datum WGS 84 global e tratados com o programa Trimble Business Center, que gerou coordenadas geográficas (latitude, longitude e altura altimétrica) processadas com a tolerância vertical de 0,020 m e horizontal de 0,050 m.

Figura 10.3 – Foto aérea das praias estudadas e dos caminhamentos utilizados para amostragem



Fonte: Dos autores (2018). Imagem do Google Earth® (2012) utilizando o software Trimble.

Mudanças de volume na superfície da praia foram calculadas utilizando o interpolador de “vizinho natural”. O software utilizado para esse cálculo foi o Surfer, versão 8 (Golden Software®), gerando um Modelo Digital do Terreno. A área utilizada para o cálculo correspondeu a todo o prisma praial (prisma total) levantado até aproximadamente a profundidade de 0,5 m.

RESULTADOS

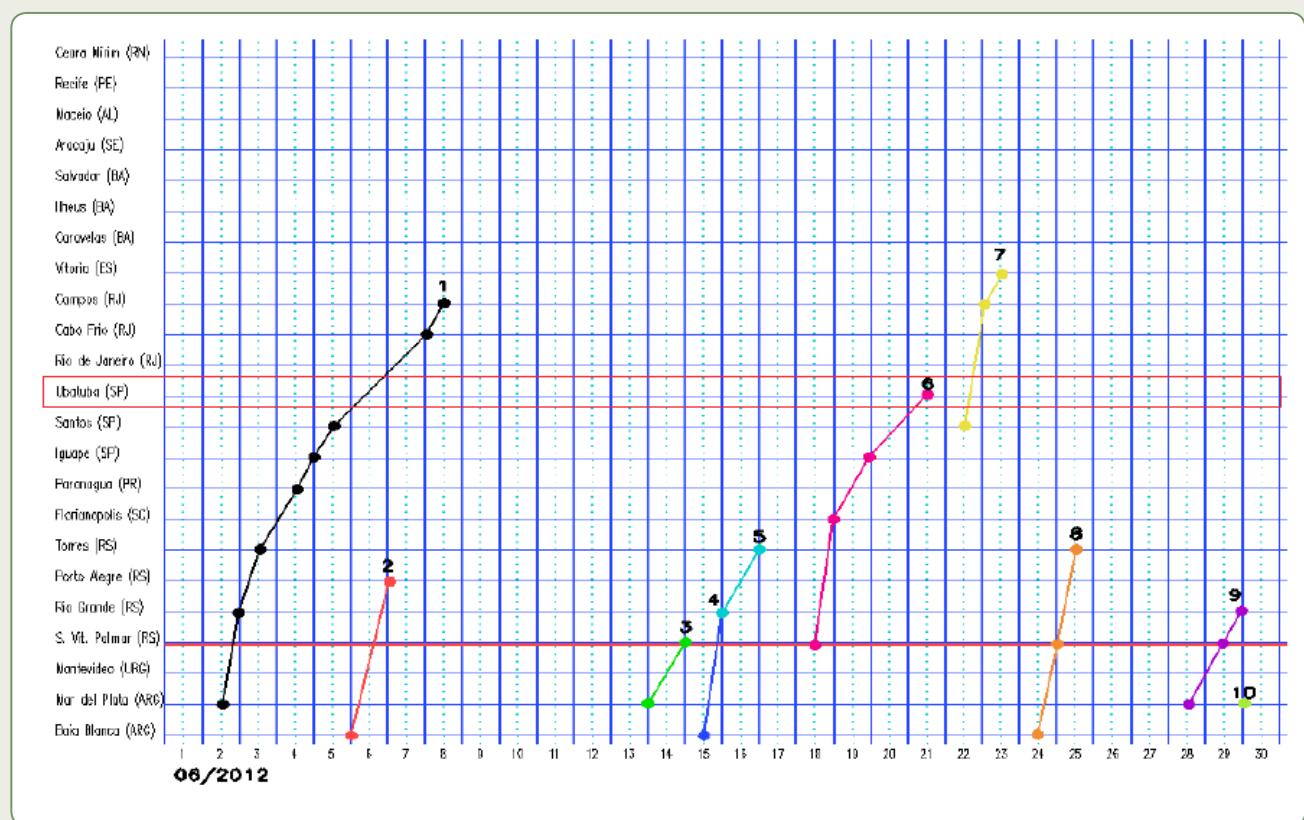
Condições climáticas ao longo do período amostrado

De acordo com as análises obtidas do INPE/CPTEC (2013), o ano de 2012 correspondeu a um período de predomínio do episódio El Niño/Oscilação Sul (ENOS). Esse processo tem como característica a geração de um comportamento anômalo para os sistemas atmosféricos que atuam sobre o Brasil, criando um bloqueio à entrada de frentes frias.

As cartas sinóticas dos dias 18 a 23 de junho de 2012 foram a base para a identificação dos sistemas frontais que atuaram na região durante o período estudado (Figura 10.4).

Durante o mês de junho de 2012, uma frente fria começou a se estabelecer, deixando a região Charlie, região que compreende a área costeira entre o cabo de Santa Marta e Cabo Frio, no dia 18 de junho às 12 horas, com forte influência de três centros de baixa pressão (1000, 1006 e 1006 HPA) caracterizando um período pré-frontal. A frente avançou e se estabilizou na região, com pressão local de 1002 HPA, no dia 19 de junho com um núcleo de baixa pressão de 996 HPA e ondulação de S. A frente avançava lentamente sobre a região, sofrendo uma forte influência de três núcleos de alta pressão (1016, 1030, 1034 HPA), o que a caracteriza como uma frente quase estacionária. Esse tipo de instabilidade costuma ser mais frequente em meses de primavera-verão (NIMER, 1989). No dia 21, a frente começou a se afastar deixando condições de pós-frontal (1016 HPA), com ondulação de E e NE. Durante os dias 22 e 23 de junho predominou tempo bom, com influência do centro de alta pressão (1022 HPA) (DHN, 2012).

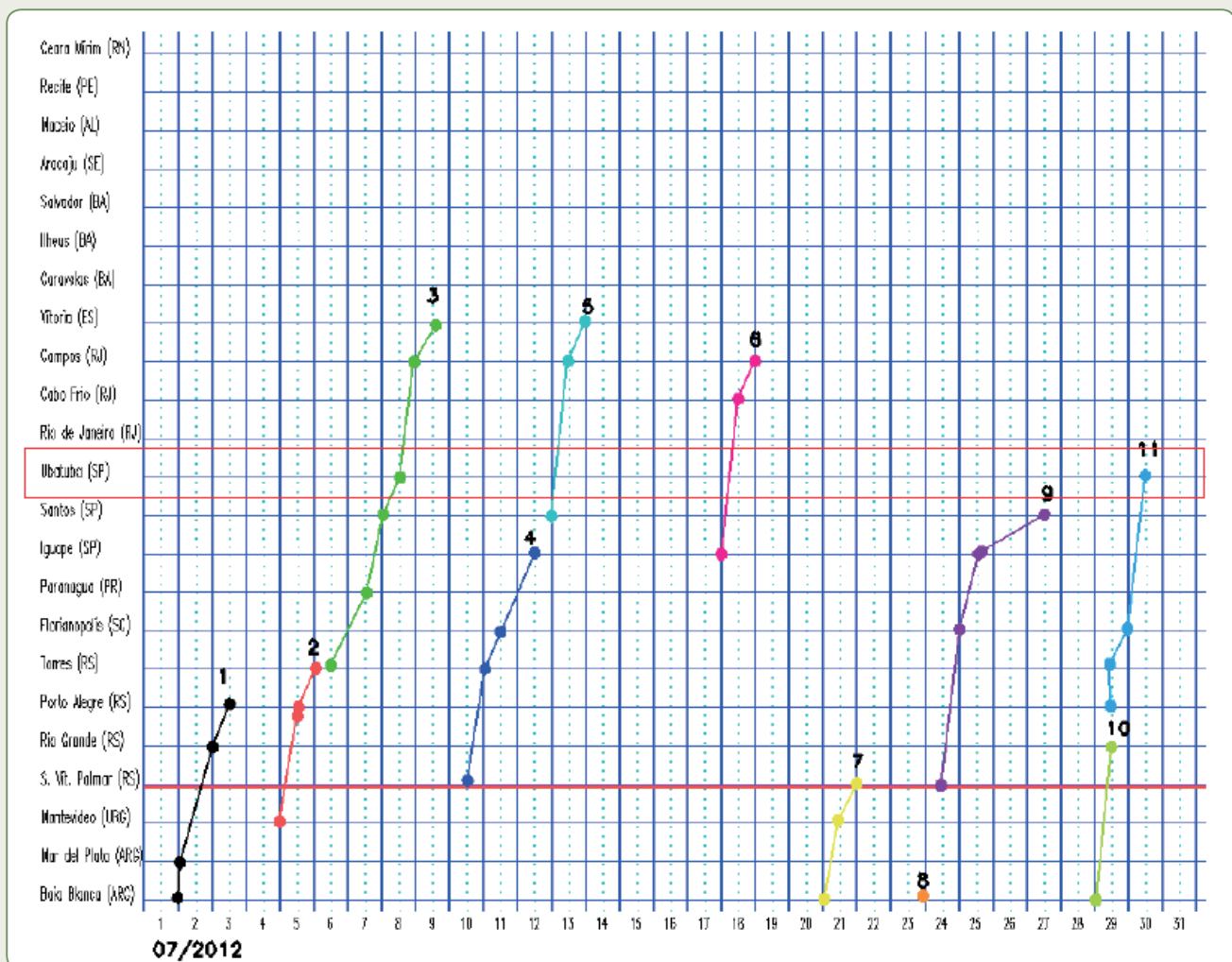
Figura 10.4 – Acompanhamento da localização das frentes frias em Ubatuba (SP) ao longo do mês de junho de 2012



Fonte: INPE/CPTEC (2013).

No período de 8 a 13 de julho, ocorreu a passagem de dois sistemas frontais, sendo um de baixa intensidade, ou seja, pouca capacidade de mobilização sedimentar, e o segundo, de maior intensidade, alta capacidade de mobilização sedimentar, que perdeu força não atingindo a região (Figura 10.5).

Figura 10.5 – Acompanhamento da localização das frentes frias em Ubatuba (SP) ao longo do mês de julho de 2012

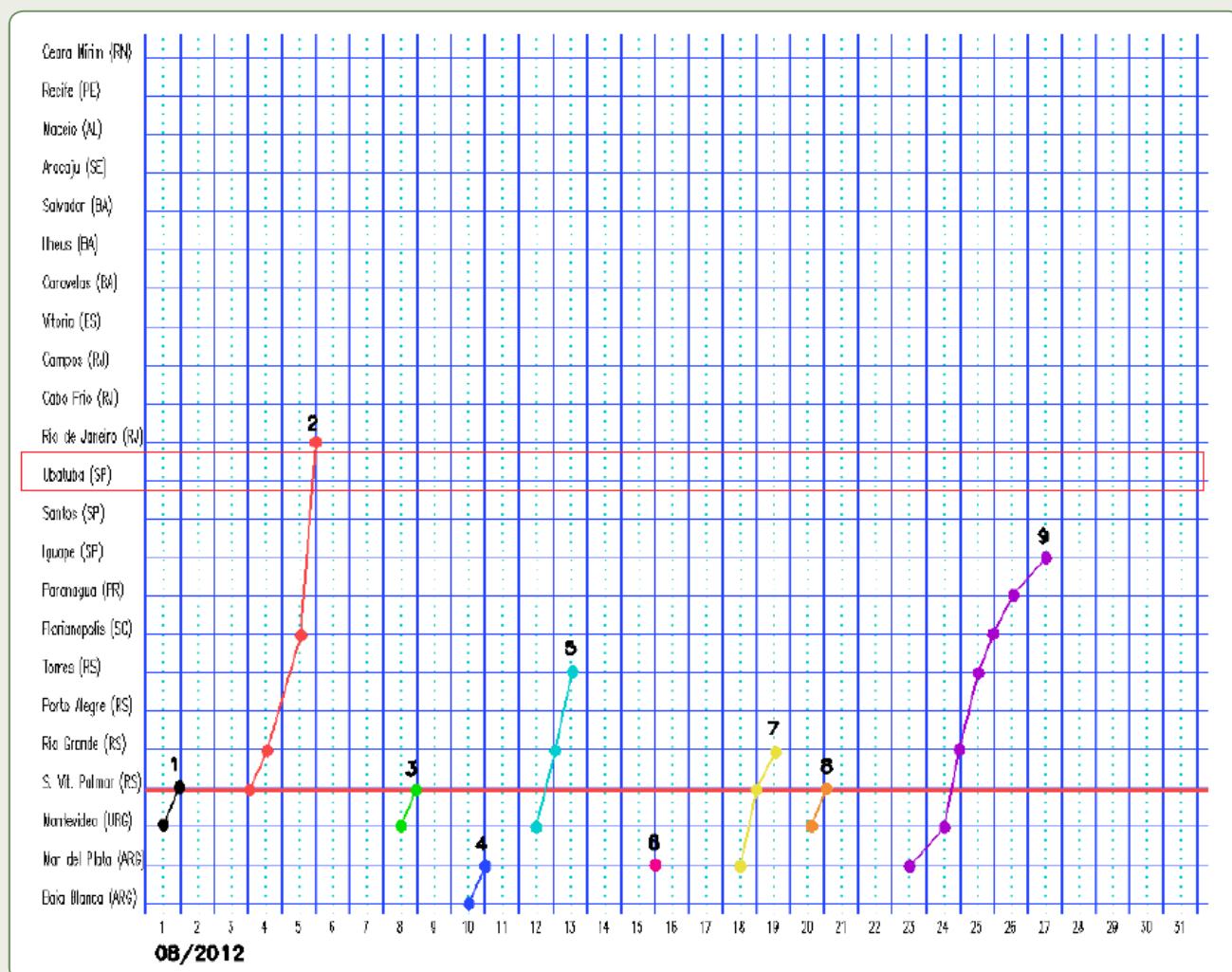


Fonte: INPE/CPTEC (2013).

No primeiro dia de campo, 8 de julho, as condições apresentadas na região Charlie da carta sinótica das 12 horas eram típicas de pós-frontal com forte influência de um centro de alta pressão (1028 HPa) e ondulação de E. Esse centro de alta pressão continuou mantendo a região com tempo estável (tempo bom) até o dia 11 de junho, quando um sistema frontal, com um núcleo de baixa pressão (998 HPa) com ondulação de S começou a se aproximar, deixando a região com características de pré-frontal. No dia 12 de julho, na carta sinótica da 0 (zero) hora, estabeleceu-se uma frente fria com pressão de 994 HPa, sendo uma frente consideravelmente forte, com ondulação de S, que perdeu força, não atingindo a região. Na carta de 12 horas do mesmo dia, a região novamente já apresentava características de pré-frontal. No dia 13 de julho, notava-se o avanço de um novo sistema frontal, porém de baixa intensidade (1002 HPa), que passou rapidamente, pois a carta sinótica das 12 horas do mesmo dia já apresentava novamente tendência a tempo bom (DHN, 2012).

Para as cartas sinóticas de 27 a 31 de agosto não ocorreu passagem de nenhum sistema frontal (Figura 10.6).

Figura 10.6 – Acompanhamento da localização das frentes frias em Ubatuba (SP) ao longo do mês de agosto de 2012



Fonte: INPE/CPTEC (2013).

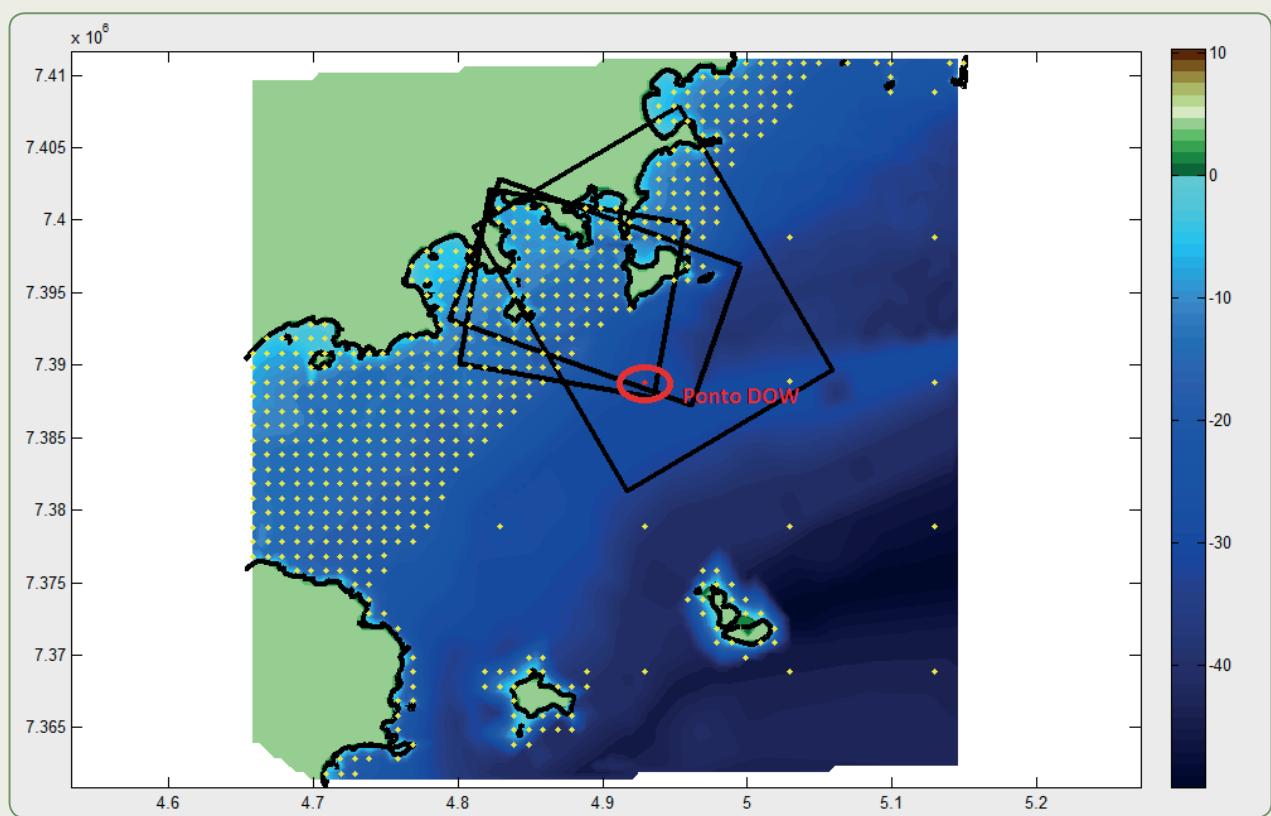
Condições oceanográficas ao longo do período amostrado

O valor máximo de amplitude de maré encontrado durante os períodos de monitoramento foi de 3,13 m no dia 8 de julho e o mínimo, 1,51 m, no dia 30 de agosto.

Dados de ondas do Sistema de Modelagem Costeira (SMC)

Os dados de ondas do projeto na costa das praias estudadas foram definidos a partir de 60 anos de dados de um ponto DOW escolhido, conhecido por Enseada da Fortaleza. Esse ponto estava a 30 m de profundidade e mostrou as principais incidências de ondas para a região e suas frequências (Figura 10.7).

Figura 10.7 – Localização e profundidade do ponto DOW e representação das malhas utilizadas para propagação das ondas

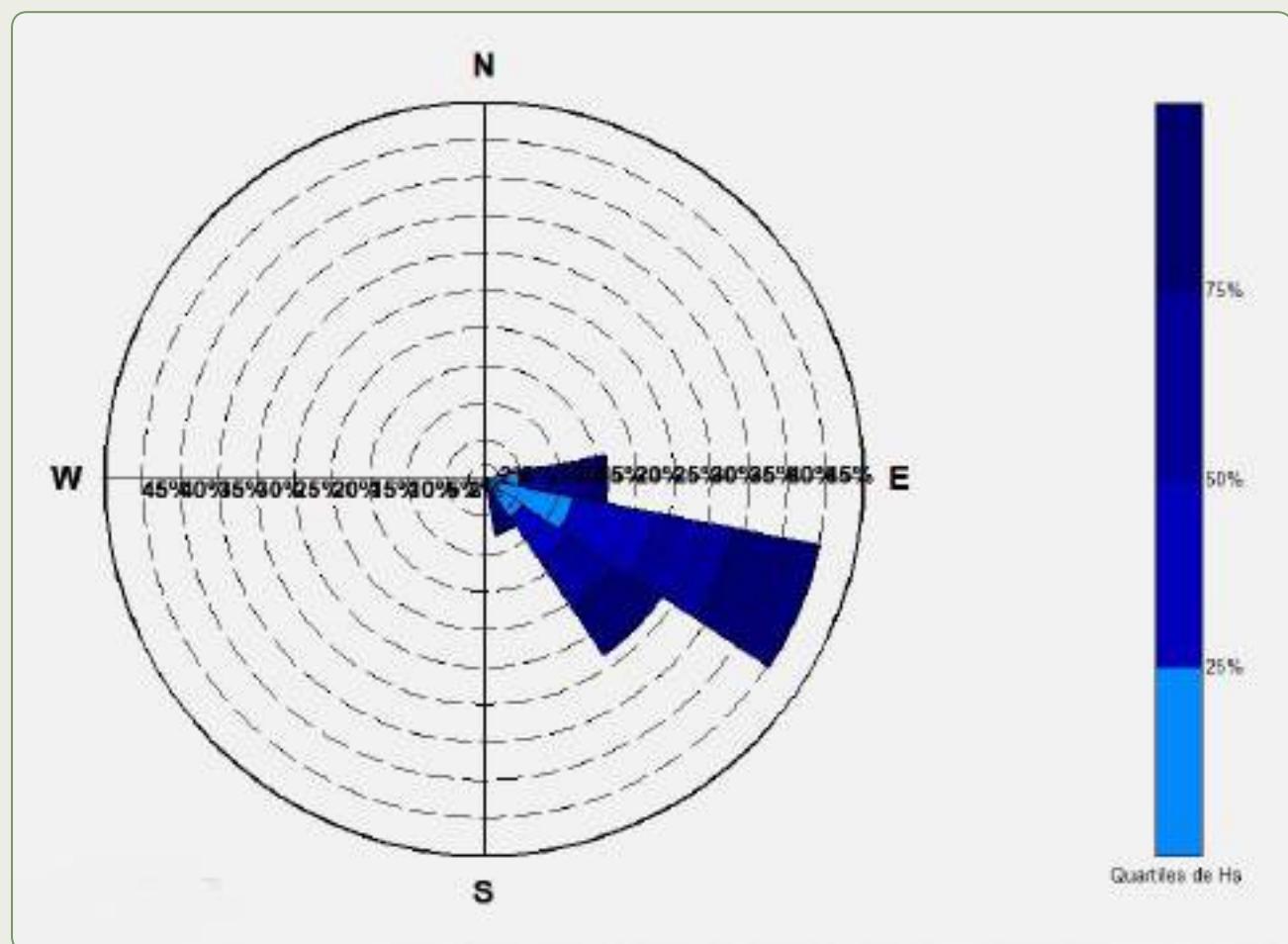


Fonte: Dos autores (2018).

Para a execução das modelagens numéricas foram elaboradas três malhas englobando a Enseada da Fortaleza (Figura 10.7).

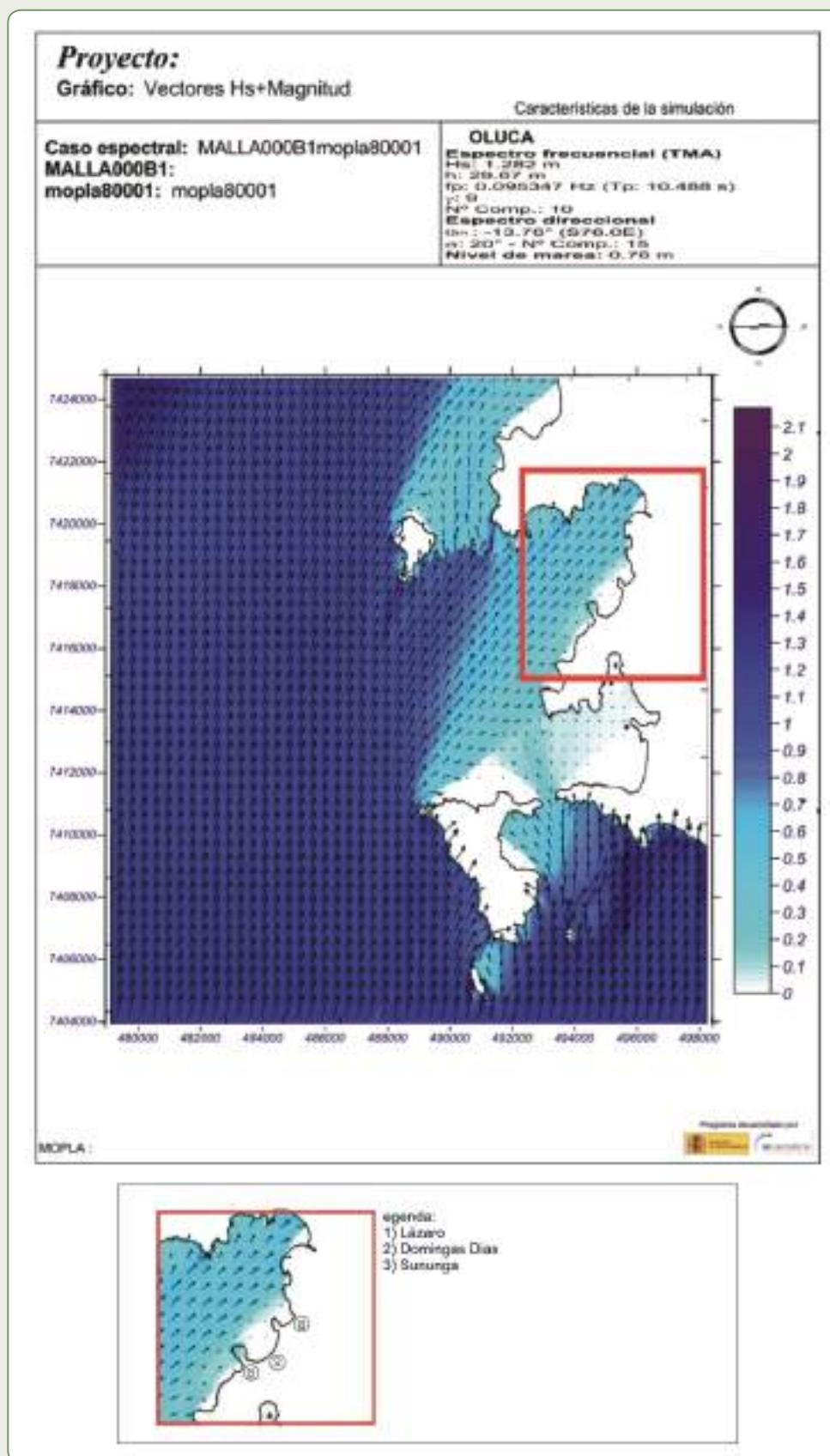
A Figura 10.8 apresenta a rosa de ondas para a Enseada da Fortaleza. A rosa mostra que as ondas com maior significância para essa região são as ondas dos quadrantes sul e leste, sendo as de leste menos frequentes. Dessa forma, foi escolhida para as simulações do SMC uma altura média de 1 m para as ondas de leste (Figura 10.9), sendo a Praia da Sununga a mais influenciada por essas ondas dentre as praias estudadas. Para as ondas de sul, já que apresentam uma maior influência na mobilização de sedimentos em todos os prismas praiais estudados foram escolhidas duas alturas de ondas significativas, sendo a altura média de 1 m (Figura 10.10) e a altura de 3,85 m (Figura 10.11), que representa a altura máxima durante a passagem de sistema frontal.

Figura 10.8 – Incidências de ondas para a Enseada da Fortaleza com relação à direção e frequência



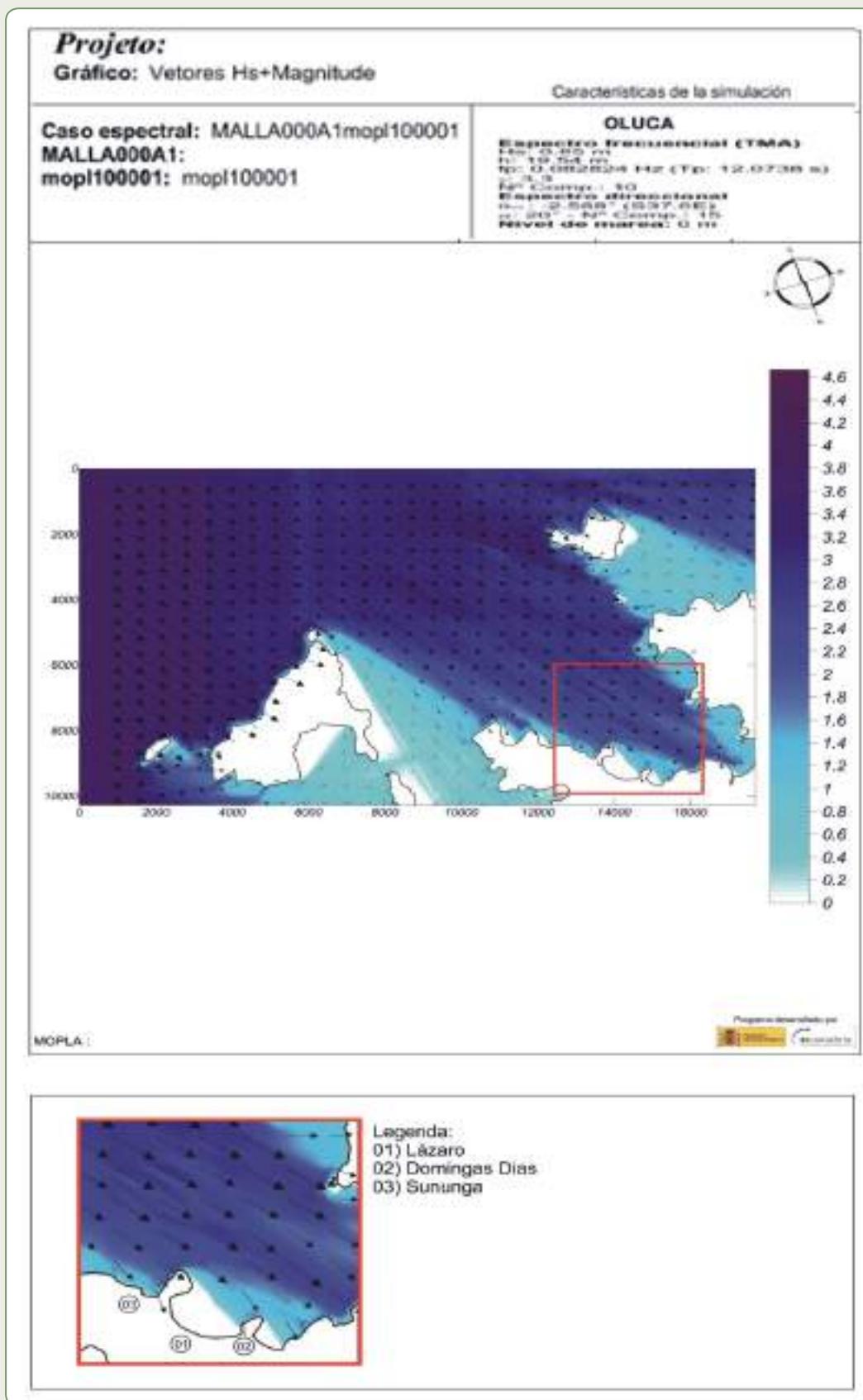
Fonte: Dos autores (2018).

Figura 10.9 – Simulação realizada pelo Sistema de Modelagem Costeira para ondas do quadrante leste com altura média de onda de 1,00 m



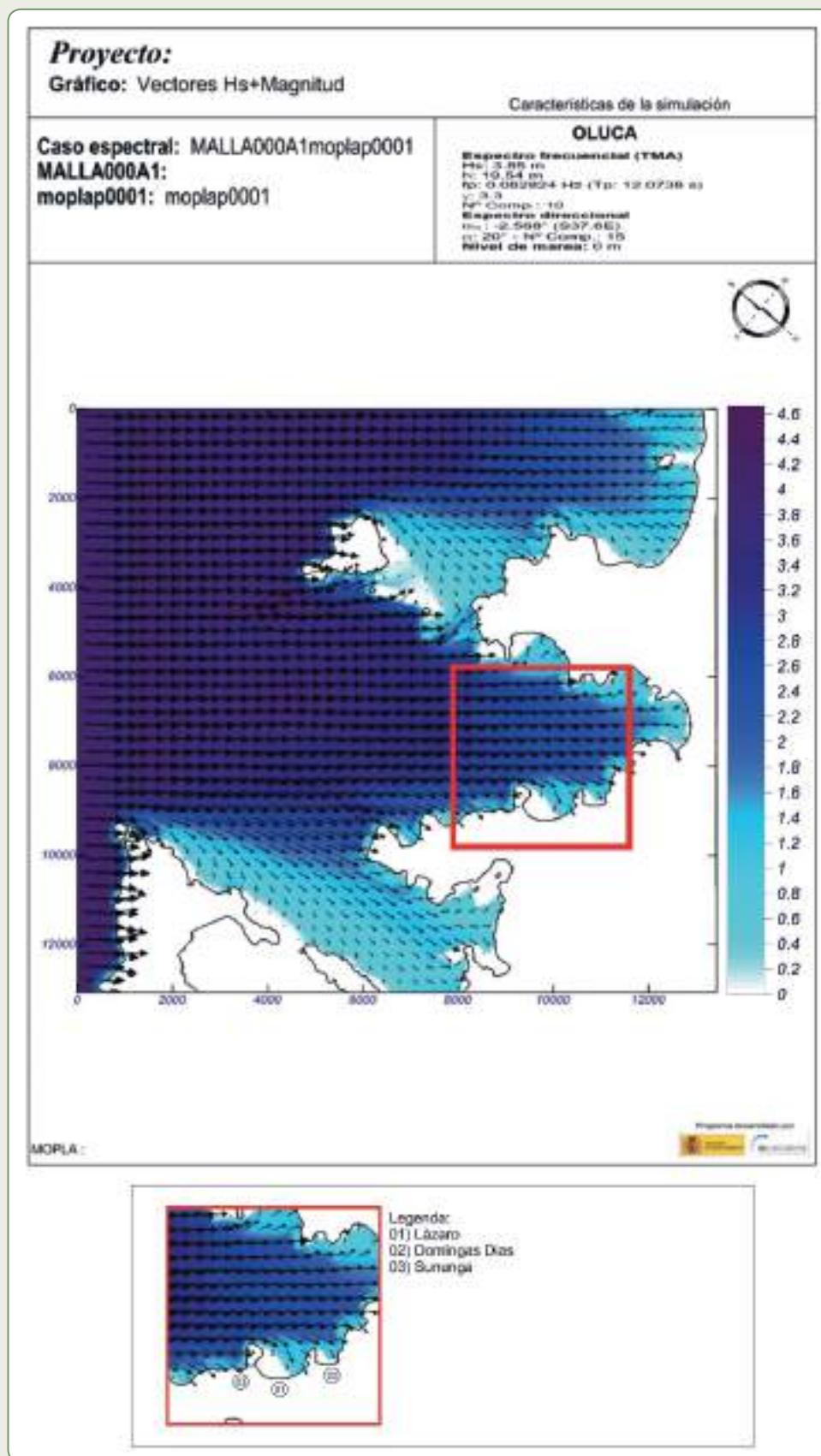
Fonte: Dos autores (2018).

Figura 10.10 – Simulação realizada pelo Sistema de Modelagem Costeira para ondas do quadrante sul com altura média de onda de 1,00 m



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 10.11 – Simulação realizada pelo Sistema de Modelagem Costeira para ondas do quadrante sul com altura máxima de onda de 3,85 m



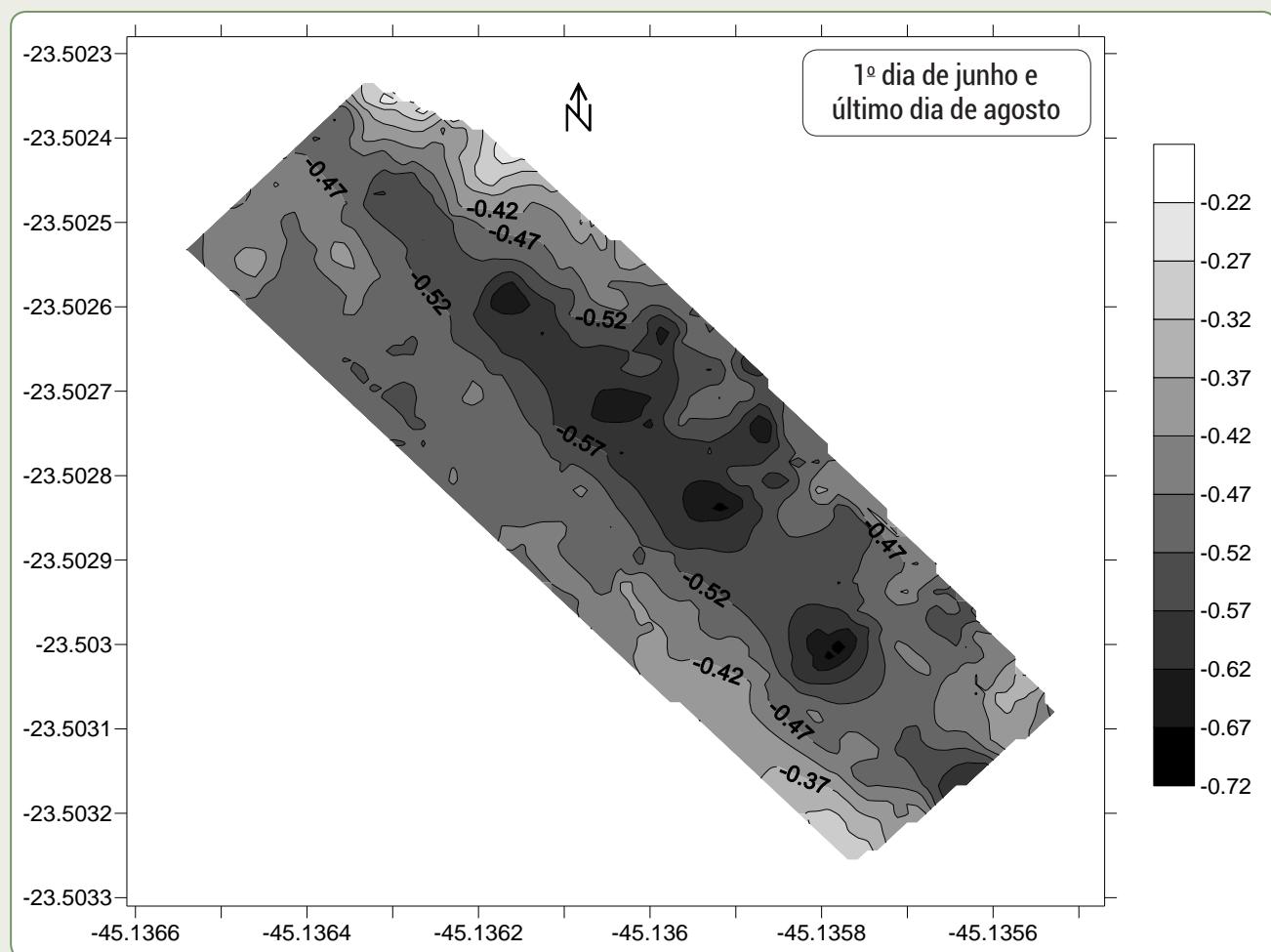
Fonte: Dos autores (2018).

Variações topográficas dos períodos monitorados

Praia do Lázaro

Na Praia do Lázaro a variação sedimentar do trecho foi negativa para todos os meses amostrados (Figura 10.12). A maior perda sedimentar (-0,96 m) apresentou-se entre os dias 29 e 30 de agosto, e o maior ganho sedimentar (0,8 m), entre 10 e 12 de julho. Durante o mês de agosto, não foi possível processar a maioria dos dados obtidos, por falha de sinal GPS.

Figura 10.12 – Gráfico de variação topográfica entre o primeiro dia de junho e o último dia de agosto de 2012 para a Praia do Lázaro



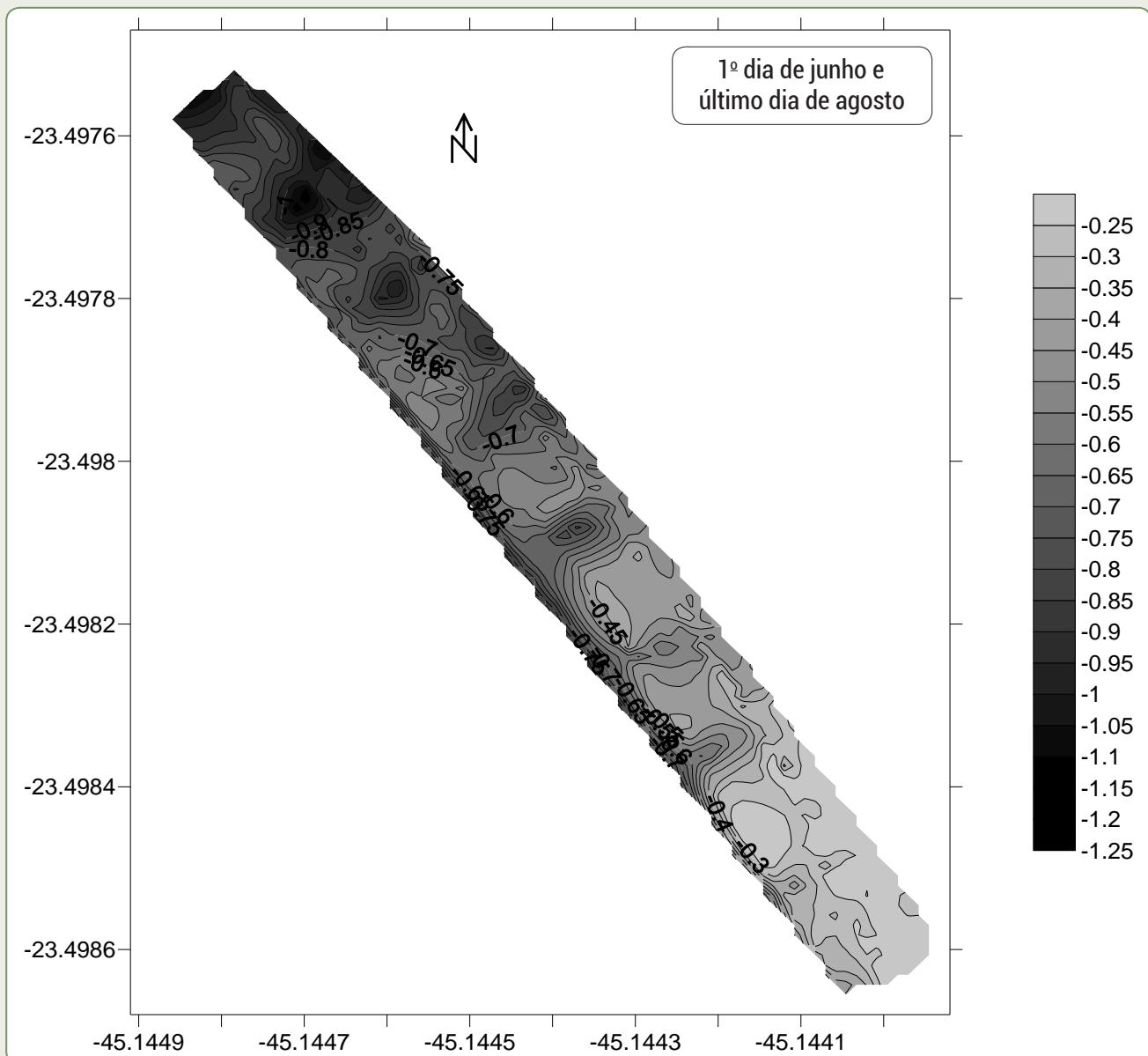
Fonte: Dos autores (2018).

Praia da Domingas Dias

A Praia da Domingas Dias, ao longo de todo o período de levantamento, apresentou perda sedimentar (Figura 10.13). A maior perda (-0,95 m) foi identificada no setor mais leste da área, entre os dias 8 e 9, e o maior ganho (1,2 m), entre os dias 10 e 12, no mesmo setor, ambos durante o mês de julho.

A posição da linha d'água se apresentou espacialmente de maneira estável na maioria das campanhas, com uma maior variabilidade na área a oeste e menor a leste da praia. Em todas as campanhas foi observada a presença de cúspides praiais.

Figura 10.13 – Gráfico de variação topográfica para a Praia da Domingas Dias entre o primeiro dia de junho e o último dia de agosto de 2012



Fonte: Dos autores (2018).

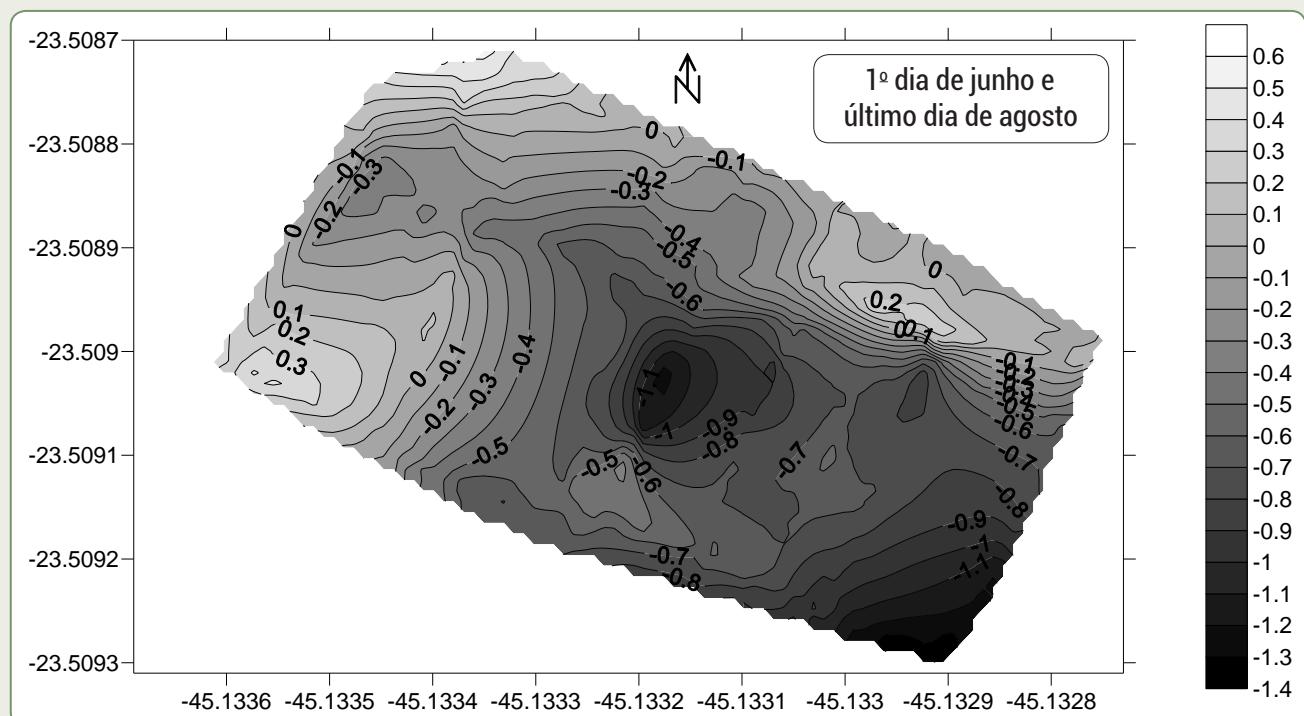
Praia da Sununga

Por conta da grande variação da posição espacial da linha d'água na Praia da Sununga durante as campanhas, foi impossível estimar com precisão a variação do volume sedimentar. Esse fato ocorreu em função de encontrarmos uma limitação metodológica da amostragem utilizada e do programa utilizado para processamento. Dessa forma, não foi possível obter uma área conhecida de igual dimensão em todos os dias amostrados, pois a alta agitação da hidrodinâmica das praias impediu de sempre efetuar as medições da zona de surfe, na mesma profundidade, por questões de segurança em campo. Portanto as medições foram realizadas na parte seca da praia e na parte molhada até uma profundidade segura não padronizada ao longo das campanhas.

Ao longo do período foi possível identificar a migração de dois bancos para a área a leste. A maior variação topográfica de perda sedimentar encontrada durante o período foi de (-2,10 m) entre os dias 29 e 31 do mês de agosto, e a maior variação de ganho sedimentar foi de (1,5 m) entre os dias 10 e 12 de julho.

Na Praia da Sununga foi observada uma grande variação topográfica do arco praial, predominando uma tendência de decréscimo altimétrico. De maneira geral, no período amostrado, o setor oeste apresentou predomínio deposicional, enquanto no setor oposto do arco praial (leste) a tendência predominante foi de perda (erosão). Porém, quando considerado todo o período monitorado, observou-se uma perda em todo o arco praial com maior destaque no setor leste da praia, comparativamente a uma maior estabilidade temporal no setor mais a oeste (Figura 10.14).

Figura 10.14 – Gráfico de variação topográfica entre o primeiro dia de junho e o último dia de agosto de 2012 para a Praia da Sununga



Fonte: Dos autores (2018).

DISCUSSÃO

Como consequência do El Niño, foi observado no período do estudo, como padrão geral, um inverno com pouca variação morfodinâmica, com características deposicionais e de estabilidade morfológica das praias estudadas. Em algumas ocasiões foram observados eventos erosivos associados a sistemas frontais leves, com baixas perdas volumétricas, nas faces arenosas das praias da Enseada da Fortaleza.

As simulações realizadas pelo Sistema de Modelagem Costeira (SMC) mostraram o nível de exposição à entrada de ondas dos quadrantes sul e leste em cada praia. Corroborando o trabalho de Martins (2006), a Praia da Sununga com sua face praial voltada para S-SSW é a praia mais exposta às ondas dos quadrantes a sul, e também a única dentre as três que sofre influência direta das ondas

incidentes de leste. A Praia da Domingas Dias, com sua face praial orientada para S-SSW, é parcialmente exposta às ondas do quadrante sul, principalmente em seu setor localizado mais a oeste. A Praia do Lázaro é relativamente abrigada das incidências das ondas do quadrante sul, com seu setor oeste correspondendo ao segmento mais exposto a essa ondulação, pois a configuração em curva de seu arco praial voltado para S-SSW está orientada para NE.

A análise temporal executada evidenciou que as praias se comportaram de maneira distinta, sendo que a Praia do Lázaro, abrigada pelos sistemas incidentes de ondas dos quadrantes a S-SE, não respondeu diretamente, de forma mais efetiva, à passagem dos sistemas frontais. Durante esse evento, a Praia da Domingas Dias, semiexposta ao mesmo padrão de incidência, perdia sedimento principalmente no seu segmento praial localizado a oeste, enquanto a Praia da Sununga sofreu rotação no sentido horário de oeste para leste sob influência dos sistemas frontais.

Entre o primeiro dia do mês de junho e o último dia do mês de agosto, o levantamento topográfico da face praial em todas as praias amostradas apresentou uma variação total negativa, comportamento esperado para o litoral norte paulista durante o período do inverno, onde a ação de sistemas de ondas incidentes de maior energia vinculadas aos frontais é mais pronunciada.

Segundo Benavente et al. (2002), a possibilidade das praias se recuperarem após a passagem de uma tempestade depende da disponibilidade de sedimento existentes na recuperação das características morfodinâmicas de “tempo bom” como também de adaptar os perfis a novos eventos de condições de alta energia de ondas. Foi esse conjunto de condições que esteve presente durante o mês de agosto para o arco praial da Praia da Sununga.

No litoral sul e sudeste do Brasil, os sistemas de ondas provenientes do quadrante a sudeste e sul têm grande influência sobre o perfil das praias, como descrito previamente por Klein e Menezes (2001). Consequentemente, o maior impacto das variações morfodinâmicas da praia e mobilidade do perfil ocorre em direção ao setor predominante da deriva gerada pelos sistemas predominantes de ondas incidentes. Tal fato foi observado em todas as praias estudadas da Enseada da Fortaleza, apresentando as maiores variações verticais negativas (erosão) sempre na porção das praias a oeste e as menores variações verticais nas porções mais a leste.

Durante o evento frontal atuante durante o mês de junho, a Praia do Lázaro, que é relativamente abrigada das ondulações do quadrante sul, não sofreu alterações significativas. Nesse período a Praia da Domingas Dias, que é semiexposta às ondas incidentes de sul, durante a passagem dos sistemas frontais apresentou perda sedimentar vertical na maior parte do segmento praial. A Praia da Sununga apresentou migração de seus bancos rumo a leste, com perda de volume de sedimentos (erosão) nos setores localizados a oeste do arco praial. Durante esse mês foram observados os maiores valores de remobilização de volume de sedimentos ao longo da praia (Quadro 10.1).

Quadro 10.1 – Quadro-síntese dos sistemas frontais correlacionados com as características de cada praia

	Praia	Direção geral face praial	Nº de frentes no período	Dias transcorridos desde a última frente	Direção de incidência de ondas	Granulometria predominante
Junho	Lázaro	S-SSW	1	13	E	Muito fina
	Domingas Dias	S-SSW	1	13	SE	Fina
	Sununga	S-SSW	1	13	S	Média
Julho	Lázaro	S-SSW	2	18/5	E	Muito fina
	Domingas Dias	S-SSW	2	18/5	SE	Fina
	Sununga	S-SSW	2	18/5	S	Média
Agosto	Lázaro	S-SSW	0	22	E	Muito fina
	Domingas Dias	S-SSW	0	22	SE	Fina
	Sununga	S-SSW	0	22	S	Média

Fonte: Dos autores (2018).

Para o mês de agosto, quando não foi observada a passagem de sistema frontal sobre o litoral norte paulista, torna-se clara a influência das ondas do quadrante sul na remobilização sedimentar das praias expostas (Sununga) e semiexpostas (Domingas Dias). Também ficou evidente que a Praia do Lázaro, abrigada das ondas desse mesmo quadrante, não responde morfologicamente de forma direta à passagem dos eventos atmosféricos mais energéticos. Por outro lado, ficou bem estabelecida a influência das ondas incidentes dos quadrantes a leste e nordeste (tempo bom e pós-frontal) na reconstrução dos perfis.

A partir do estudo granulométrico, foi observado que essas praias não possuem troca sedimentar entre elas e cada praia possui seu próprio estoque sedimentar em possíveis bancos arenosos submersos, possuindo características granulométricas distintas.

Na Praia da Sununga, durante o período de levantamento, foi observada uma grande variação topográfica do arco praial, predominando uma tendência geral de perda sedimentar. De maneira geral, o setor oeste apresentou predomínio erosivo, enquanto no setor oposto do arco praial (leste) a tendência predominante foi deposicional.

Esse comportamento reforça a percepção da existência de um processo de rotação praial conforme descrito por Martins (2006), quando consideradas essas modificações morfológicas dentro de uma escala temporal curta, respondendo à alternância na direção de incidência das ondas de tempestades geradas com a passagem de ciclones tropicais sobre a região, e as ondas de “tempo bom”, com sua ação predominante, em tempo, ao longo do litoral norte paulista e com a passagem de ciclones tropicais sobre a região (SHORT; TREMBANIS; TURNER, 2000; KLEIN; BENEDET FILHO; SCHUMACHER, 2002; MARTINS, 2006).

Para a Praia da Sununga, o acompanhamento da variabilidade dos perfis entre os meses amostrados indicou a capacidade de restabelecimento dos níveis de acreção e perda sedimentar, mostrando a importância dos sistemas frontais no transporte longitudinal de sedimento na área e em seu processo de rotação praial, que permite a existência do restabelecimento da face praial visto que não existe perda sedimentar entre o arco praial da Sununga e as áreas das praias contíguas.

Klein, Benedet Filho e Schumacher (2002) e Klein e Menezes (2006) observaram que igualmente à mobilidade do perfil em curto prazo, os processos de rotação de praia podem diferir significativamente entre praias dissipativas, refletivas e intermediárias, e assim entre as praias com diferentes graus de

curvatura e exposição às ondas incidentes. Neste trabalho, os processos de rotação de praia foram mais facilmente detectados em praias refletivas e expostas à incidência de sistemas de ondas geradas em eventos de alta energia como, por exemplo, as praias de Taquaras e Taquarinhas, que possuem as mesmas características morfológicas que a Praia da Sununga. Nesse caso, com a ausência de barras submersas, a energia das ondas colapsa diretamente sobre a inclinação da praia, levando a uma maior mobilidade do perfil e à remoção de grandes quantidades de sedimento na praia emersa. Como resultado, a ocorrência de ondas oblíquas sobre esses tipos de sistemas de praia provoca troca de sedimento entre as suas extremidades. O processo de rotação de praia é influenciado diretamente por mudança na direção predominante de ondas incidentes, transportando o sedimento de leste para oeste quando ocorrem ondas do quadrante leste e de oeste para leste quando ocorrem ondas do quadrante sul.

As praias estudadas pertencem à mesma enseada e possuem as mesmas características geológicas, meteorológicas e oceanográficas. Porém, cada praia tem seu arco praial orientado para S-SW de maneira distinta, diferentes graus de exposição (expostas, abrigadas), o que permite que as ondulações entrem na enseada de diferentes sentidos e intensidades, resultando consequentemente, em padrões morfológicos distintos.

CONCLUSÃO

O estudo comparativo entre o comportamento de três segmentos praiais localizados na Enseada da Fortaleza, em Ubatuba (SP), foi realizado em ano de El Niño, processo que tem como característica a geração de um comportamento anômalo para os sistemas atmosféricos, caracterizados pela diminuição da ocorrência de frentes frias na costa brasileira (INPE/CPTEC, 2013). Como consequência desse episódio climático, foi observado no período do estudo, como padrão geral, um inverno com pouca variação morfodinâmica, com características deposicionais e de estabilidade morfológica das praias estudadas. Em algumas ocasiões foram observados eventos erosivos associados a sistemas frontais leves, com baixas perdas volumétricas, nas faces arenosas das praias da Enseada da Fortaleza.

As praias do Lázaro, Domingas Dias e Sununga, embora estejam inseridas na mesma enseada e possuam as mesmas características geológicas, meteorológicas e oceanográficas, comportam-se de maneiras distintas frente aos processos dinâmicos de ondas geradas nos sistemas frontais, e nos sistemas de “tempo bom”, devido ao nível de exposição a que ficam submetidos seus arcos praiais à incidência de ondas provenientes de distintas direções.

As praias que possuem suas faces voltadas rumo aos quadrantes a sul, e não apresentam impedimento físico à incidência direta das ondas (Sununga, desabrigada), possuem suas porções localizadas mais a oeste do arco praial sujeitas a significativas alterações nos volumes de areia depositados sobre a face da praia, particularmente sob influência de ondas associadas às fases de pré-frontal e frontal. Sob a ação efetiva desses eventos, a remobilização sedimentar é mais intensa quando comparada com a fase de predomínio do sistema pós-frontal.

O acompanhamento espacotemporal das três praias da Enseada da Fortaleza, todas com suas faces praiais voltadas rumo aos quadrantes a sul, sob as mesmas condicionantes de origem climática, geológica, oceanográfica e antrópica, evidenciaram que a intensidade dos processos de perda e recuperação sedimentar dessas praias não dependem apenas do grau de proteção, ou de exposição, desses ambientes à ação mais direta das ondas mais esbeltas, mais energéticas, mas também da possibilidade de remobilização de sedimentos dentro do próprio prisma praial.

Dessa forma, para o estabelecimento de programas de gerenciamento costeiro mais adequado ao padrão de dinâmica sedimentar das praias de enseada do litoral norte paulista, deve-se considerar como elementos de análise não apenas a orientação da face de cada praia e o grau de proteção, natural ou não, desses segmentos costeiros em relação à direção principal dos quadrantes de incidência das ondas, mas, principalmente, a possibilidade de retenção e estoque de sedimentos remobilizados durante os eventos de tempestade.

Necessita-se um estudo que avalie não apenas a possibilidade de remobilização dos sedimentos entre as porções emersa e submersa do perfil, mas também as possibilidades e impedimentos da livre transferência de areias entre as áreas espacialmente opostas às praias.

Seria interessante a realização de um estudo semelhante em um ano, com condições climáticas normais, por um período de tempo maior, em que fosse possível observar frentes frias variadas e de intensidade maior para complementar o presente estudo e obter maior conhecimento a respeito da resposta das praias estudadas aos eventos climáticos de alta intensidade.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, A. T. L. **Análise dos processos hidrodinâmicos e sedimentares da enseada da Fortaleza, Ubatuba/São Paulo.** 2002, 87 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.
- BENAVENTE, J.; DEL RIO, L.; ANFUSO, G.; GRACIA, F.; REYES, J. Utility of morphodynamic characterisation in the prediction of beach damage by storms. *Journal of Coastal Research*, n. 36, p. 56-64, 2002. Special issue.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Cartas sinóticas.** Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>>. Acesso em: jun. 2012.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS/CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (INPE/CPTEC). **Climanalise:** boletim de monitoramento e análise climática. São José dos Campos, SP, Brasil, 2013. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>>. Acesso em: 9 maio 2013.
- FÚLFARO, V. J.; SUGUIO, K.; PONÇANO, W. L. A gênese das planícies costeiras paulistas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., 1974. Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: CBG, 1974, v. 3, p. 37-42.
- KLEIN, A. H. F.; MENEZES, J. T. Beach Morphodynamics and Profile Sequence for a Headland Bay Coast. *Journal of Coastal Research*, v. 17, n. 4, p. 812-835, 2001.
- KLEIN, A. H. F.; BENEDET FILHO, L.; SCHUMACHER, D. Short-term beach rotation processes in distinct headland bay beach systems. *Journal of Coastal Research*, v. 18, n. 3, p. 442-458, 2002.
- KLEIN, A. H. F.; TEMME, B.; CARVALHO, J. L. B.; JABOR, P. M.; DIEHL, F. L. Comportamento morfológico de uma praia semi-protégida: Praia de Balneário Camboriú, Santa Catarina. In: CONGRESSO DA ABEQUA, 6., 1997, Curitiba. **Resumos...** Curitiba, 1997. p. 82-84.
- KLEIN, A. H. F.; MENEZES, J. T. Coastal erosion vulnerability analysis methodology. *Journal of Coastal Research*, v. 39, p. 1811-1813, 2006.
- LUCA, C. B de. **Implementación de herramientas numéricas y bases de datos en el SMC-Brasil y su aplicación en el caso piloto de la playa de Massaguaçu-Brasil.** 201 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica Ambiental) – Universidad de Cantabria, Santander, 2011.
- MARTINS, C. C. **Morfodinâmica de praia refletiva:** estudo de caso na Praia da Sununga, litoral norte do Estado de São Paulo. 209 f. 2006. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1989.

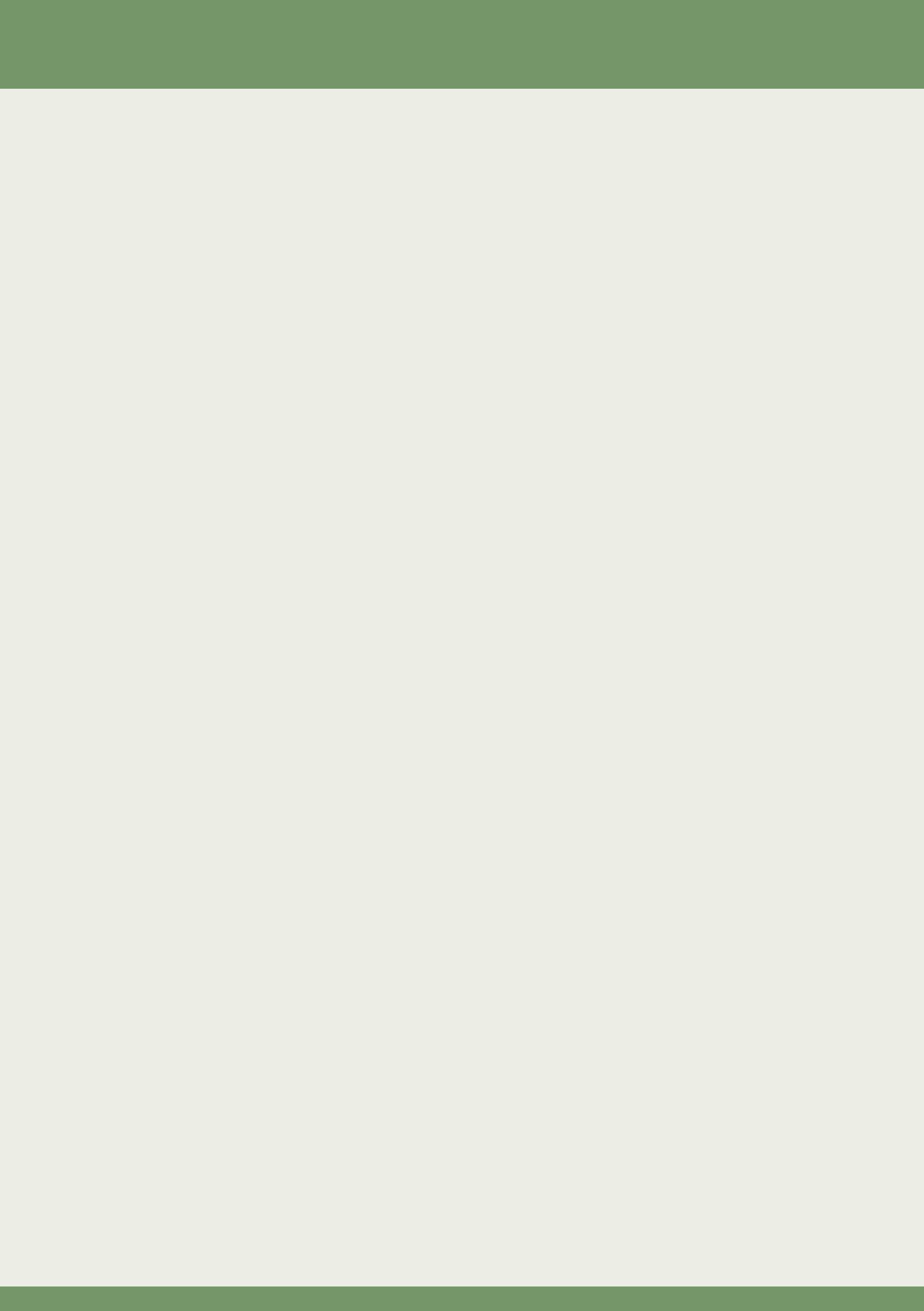
OLIVEIRA, J.; LOPES, C. P.; BRAGA, S. E.; CHIOZZINI, G. V. Estudo da variação sazonal das concentrações de ^{222}Rn em amostras de água do mar nas enseadas de Ubatuba, para a estimativa da descarga de águas subterrâneas. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2005, Santos. INAC 2005. [S.l.: s.n.], 2005. 1 CD-ROM.

PUGH, D. T. **Tides, surges and mean sea level**. Chichester: Jonh Wiley & Sons, 1986. 472 p.

SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. 1 CD-ROM.

SHORT, A. D.; TREMBANIS, A. C.; TURNER, I. L. Beach oscillation, rotation, and the southern oscilation, Narraben Beach, Australia. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 27., 2000, Sydney. **Proceedings...** Reston: American Society of Civil Engineers, 2001. p. 2439-2452.

SUGAHARA, S. Variação anual da frequência de ciclones no Atlântico Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2000. v. 1, p. 2607-2611.



POTENCIALIDADES DA UTILIZAÇÃO DA FERRAMENTA SISTEMA DE MODELAGEM COSTEIRA (SMC-BRASIL) NO ÓRGÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA

Bianca Alves Dias Martins Parizotto
Anderson Atkinson da Cunha
Carlos Eduardo Junqueira de Azevedo Tibiriçá

RESUMO

A Lei nº 17.354, de 20 de dezembro de 2017, criou o Instituto do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (IMA) e extinguiu a Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA). Como ainda não está publicado o regimento interno do instituto, a análise das potencialidades foi realizada na estrutura antiga do Órgão Estadual de Meio Ambiente de Santa Catarina. A FATMA era o órgão ambiental da esfera estadual do governo de Santa Catarina que tinha como missão maior garantir a proteção do meio ambiente e a melhoria da qualidade ambiental do estado. Em decorrência da extinção da FATMA, a estrutura funcional, o quadro de pessoal, o patrimônio, as receitas, o acervo técnico, os direitos e as obrigações dessa fundação serão absorvidos pelo instituto recém-criado (SANTA CATARINA, 2017a). A FATMA atuava no licenciamento e fiscalização ambiental, proteção dos ecossistemas, gestão de unidades de conservação, geoprocessamento e monitoramento da balneabilidade de praias. Tendo em vista as peculiaridades dos ecossistemas costeiros, ferramentas de análises que contribuem para o entendimento desse ambiente são essenciais para a proteção e a melhoria da qualidade ambiental. Nesse contexto se insere o Sistema de Modelagem Costeira do

Brasil (SMC-Brasil), ferramenta para apoio à gestão da costa brasileira, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), que realizou em 2011 o Seminário Internacional Brasil-Espanha de Apoio à Gestão da Costa Brasileira. Consoante às problemáticas costeiras e ao apoio da ferramenta pelo governo federal, o objetivo deste trabalho foi analisar as potencialidades dessa ferramenta no âmbito da FATMA nas suas diferentes atividades. Para nortear essa análise, foram seguidos os temas do seminário: Pesquisa e monitoramento; Obras costeiras e Instrumentos de gestão ambiental de acordo com a estrutura de gestão da fundação. Considerando as linhas de pesquisa abordadas no Seminário Internacional Brasil-Espanha, avalia-se que a ferramenta tem potencial de aprimorar e aperfeiçoar muitas das atividades realizadas na FATMA em todas as temáticas avaliadas, tais como: 1) licenciamento ambiental de empreendimentos costeiros (estruturas de apoio náutico, dragagens, alimentação artificial de praias, molhes, guia de correntes e similares); 2) seleção de informações pertinentes para integrar as instruções normativas da fundação e os termos de referência dos estudos ambientais em ambientes costeiros; 3) obtenção de dados para fiscalização em obras costeiras e processos erosivos; 4) elaboração de convênios de capacitação e transferência de dados com os municípios; 5) integração aos dados de monitoramento da balneabilidade; 6) pesquisas em unidades de conservação que integram ambientes de praia; 7) divulgação das aplicações do SMC na FATMA em ações de Educação Ambiental; e 8) integração com os outros sistemas existentes na fundação. Em síntese, a ferramenta SMC-Brasil, pode incrementar as ações do **órgão ambiental estadual** e contribuir para a gestão integrada da costa brasileira, produzindo informações importantes para atividades de licenciamento, fiscalização, pesquisa e monitoramento, normativas, gestão das unidades de conservação aliadas a questões de planejamento, educação ambiental, e qualificação da tomada de decisão.

Palavras-chave: Licenciamento ambiental. Fiscalização ambiental. Proteção dos ecossistemas. Balneabilidade. Geoprocessamento. Fundação do Meio Ambiente (FATMA). Órgão estadual de meio ambiente.

INTRODUÇÃO

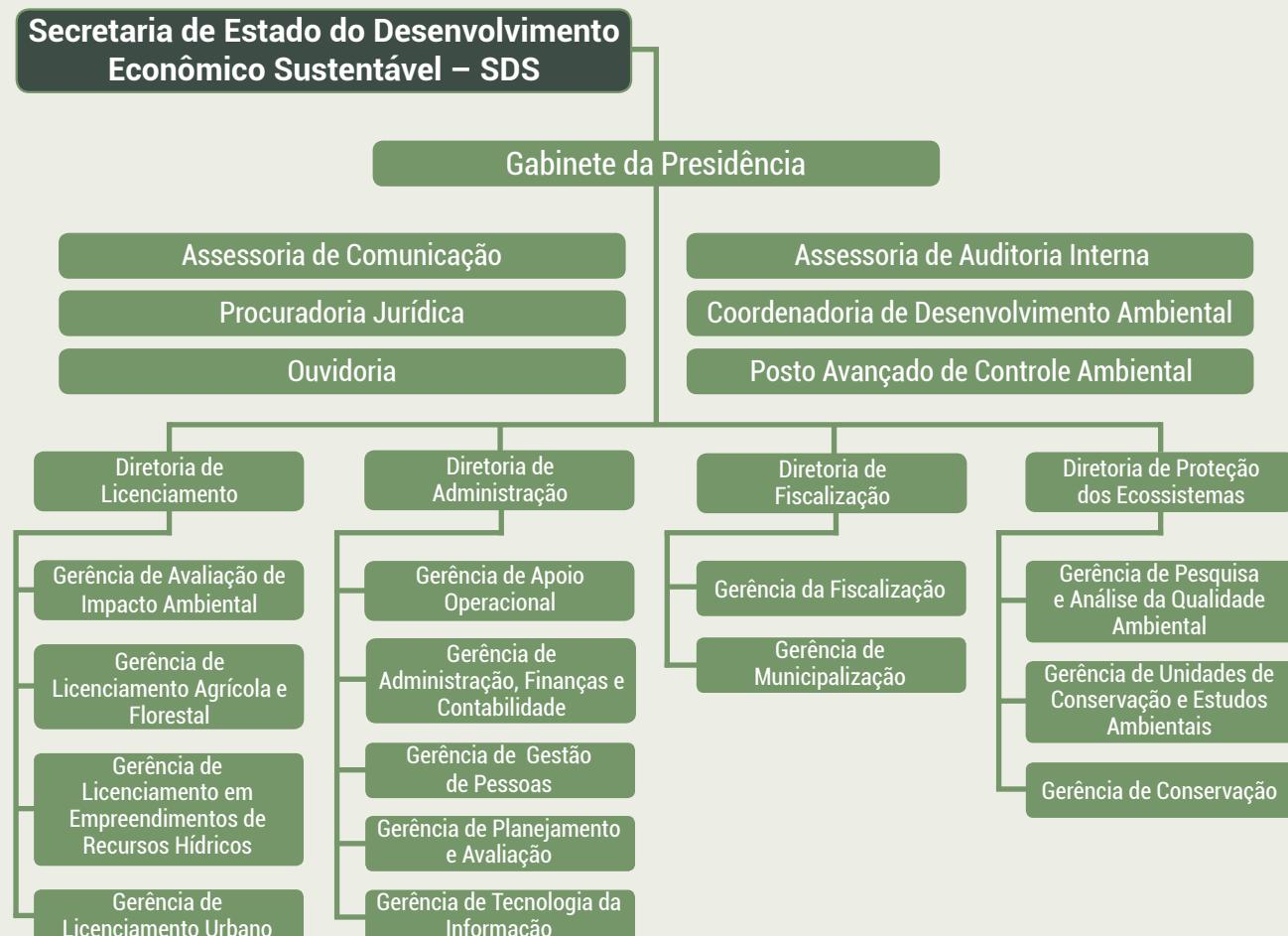
A Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA/SC) era o órgão executor ambiental da esfera estadual do governo de Santa Catarina com missão de proteção e de melhoria da qualidade ambiental, segundo a Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009 (SANTA CATARINA, 2009). Foi extinta, por meio da Lei nº 17.354/2017, porém suas obrigações foram incorporadas pelo então criado Instituto do Meio Ambiente do estado de Santa Catarina (IMA), autarquia vinculada à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS). Atuava no licenciamento e fiscalização ambiental, proteção dos ecossistemas através da gestão de unidades de conservação, geoprocessamento e análise de balneabilidade de praias. Foi institucionalizada pelo Decreto nº 662, de 30 de julho de 1975, com denominação, àquela época, de Fundação de Amparo à Tecnologia e ao Meio Ambiente (SANTA CATARINA, 1975). Mais tarde com o advento da Lei nº 8.245, de 18 de abril de 1991, essa denominação foi alterada, em seu artigo 102, para Fundação do Meio Ambiente (FATMA) (SANTA CATARINA, 1991).

As competências dos diferentes entes federativos estão discriminadas na Lei Complementar nº 140/2011, cabendo ao estado, entre outras atribuições, o licenciamento das atividades não licenciadas pela União ou pelos municípios, incluindo diversas obras costeiras (BRASIL, 2011). O código ambiental catarinense, conforme Lei Estadual nº 14.675/2009, define, em seu artigo 14, as competências da

FATMA, que vão desde a elaboração de manuais e instruções normativas relativas às atividades de licenciamento, autorização e fiscalização ambientais, implementação de sistemas informatizados de controle ambiental, licenciamento ou autorização das atividades públicas ou privadas consideradas potencialmente causadoras de degradação ambiental, fiscalização, elaboração, execução e controle das ações, projetos, programas e pesquisas relacionados à proteção de ecossistemas e ao uso sustentável dos recursos naturais, proposição de convênios com órgãos da administração federal e municipal buscando eficiência no que se refere à fiscalização e ao licenciamento ambientais e à elaboração e execução de acordos internacionais relacionados à proteção de ecossistemas ambientais (SANTA CATARINA, 2009).

A FATMA, vinculada à Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável, atuava em todo o estado de Santa Catarina, tendo, até 20 de dezembro de 2017, o organograma apresentado na Figura 11.1:

Figura 11.1 – Organograma da Fundação do Meio Ambiente (FATMA)



Fonte: Adaptado de FATMA. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/organograma_fatma.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.

Conforme a Lei nº 17.354/2017, o IMA terá a seguinte estrutura básica:

- 1) Gabinete do Presidente;
- 2) Procuradoria Jurídica;
- 3) Diretoria de Administração;
- 4) Diretoria de Engenharia e Qualidade Ambiental;

- 5) Diretoria de Regularização Ambiental; e
- 6) Diretoria de Biodiversidades e Florestas (SANTA CATARINA, 2017a).

O detalhamento das atribuições e da estrutura organizacional do IMA será estabelecido em regimento interno, que será submetido à aprovação do Chefe do Poder Executivo mediante decreto (SANTA CATARINA, 2017a).

Segundo a Lei nº 7.661/1988, em seu artigo 10, as praias são bens públicos de uso comum, e nas regiões costeiras são encontrados diversos tipos de vetores de desenvolvimento e pressão como, por exemplo, obras costeiras, maricultura, pesca, pecuária, agricultura, turismo, atividades portuárias, desenvolvimento urbano, entre outros, que, associados ao crescimento demográfico, ocasionam impactos ambientais significativos (BRASIL, 1988). Dentre eles pode-se citar os processos de erosão, poluição das águas e destruição de ecossistemas. Tais problemas se ampliam quando se consideram os efeitos das mudanças climáticas, a exemplo da elevação do nível do mar e do aumento da ocorrência de eventos extremos ao longo do litoral.

Tendo em vista que os ecossistemas costeiros caracterizam-se pela sua sensibilidade, diversidade e uso compartilhado por diversos atores, ferramentas de análises que contribuem para o entendimento desse ambiente especial e complexo são essenciais para a proteção e melhoria da qualidade ambiental, consoante uma gestão costeira adequada.

Nesse contexto se insere o Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil), ferramenta para apoio à gestão da costa brasileira, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA). Segundo o Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão e o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2011), a proposta de utilização da ferramenta surgiu da cooperação entre Brasil e Espanha que visa promover a transferência de metodologias e ferramentas de apoio à gestão da costa brasileira e que tem como objetivo disponibilizar a todos os atores envolvidos ferramentas e metodologias que permitam maior rapidez, precisão e confiabilidade à tomada de decisão por parte de gestores e administradores das três esferas de governo, auxiliando nos processos de licenciamento, zoneamento, ordenamento de atividades na zona costeira brasileira, bem como na autorização e permissão de uso de bens e imóveis da União. Além da Espanha, outros países utilizam essa ferramenta como Colômbia, Tunísia, El Salvador, Chile e Taiwan. Entre os objetivos da cooperação pode-se destacar a difusão da ferramenta a técnicos e gestores governamentais e o apoio às análises costeiras.

O SMC-Brasil consiste em um conjunto de modelos, metodologias, ferramentas e bases de dados integrados em um sistema que permite analisar e estudar as condições atuais da costa, assim como suas respostas frente a diferentes intervenções. É uma ferramenta numérica para o desenvolvimento de análises de dinâmica no âmbito costeiro, que combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas, ondas e nível, e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas na zona costeira, conforme Manual SMC 3.0 (BRASIL, no prelo) (Figura 11.2).

As ferramentas do SMC-Brasil podem ser divididas em duas:

- 1) O SMC-Tools, que inclui uma base de dados de batimetria, ondas e nível do mar (IH-DATA). Além disso, possui duas ferramentas de processamento de dados integradas, uma para realizar a análise estatística das variáveis ambientais (IH-AMEVA) e outra que permite realizar a transferência de uma série de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa (IH-DYNAMICS);
- 2) O Sistema de Modelagem Costeira (SMC) propriamente dito, que integra uma série de modelos numéricos, que permitem dar um suporte prático à correta aplicação da metodologia de trabalho proposta nos Documentos Temáticos (BRASIL, no prelo).

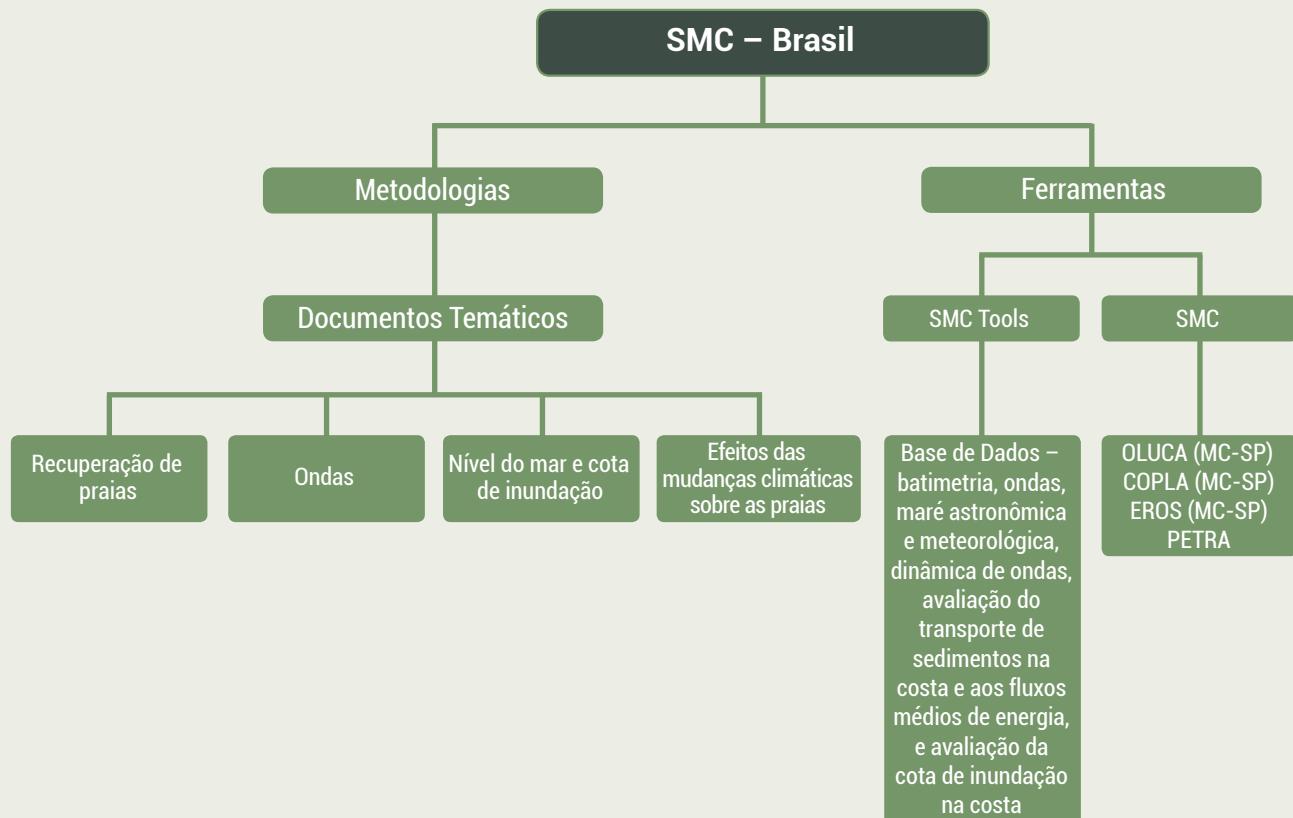
A Figura 11.2 resume a estrutura do SMC-Brasil (BRASIL, no prelo). O módulo de Análise de Praias em curto prazo (até 96 horas) consiste nos modelos de evolução morfodinâmica em perfil e em planta. O Programa de Evolução do Perfil Transversal de Praias (PETRA) permite calcular a evolução do perfil vertical de praias no tempo. O Programa de Morfodinâmica de Praia (MOPLA) modela a praia em planta, na horizontal, por meio dos modelos numéricos:

- 1) Propagação de Ondas (OLUCA);
- 2) Correntes devidas à Quebra da Onda em Praias (COPLA);
- 3) Erosão/Sedimentação (EROS).

Esses modelos são divididos em dois grupos:

- 1) MC, modelagem dos processos associados à propagação de um trem de ondas monocromáticas; e
- 2) SP, modelagem de propagação de um estado do mar representado por um espectro de energia de ondas. O SMC possui também o módulo de análise em escala espacial e temporal longa, que calcula o perfil praial de equilíbrio e a forma em planta da praia.

Figura 11.2 – Estrutura do SMC-Brasil



Fonte: Adaptado de BRASIL (no prelo).

Entre os problemas costeiros analisados pelo modelo, pode-se destacar a erosão. É um processo que afeta uma parcela expressiva das praias arenosas de todo o mundo, visto que diferentes locais no mundo apresentam recuo da linha de costa, acarretando sérios prejuízos para a comunidade litorânea (BIRD, 1985, 1993; CALLIARI et al., 2003; MUEHE, 2006; BIRD, 2008; SCHMIDT,

GOMES; PRISTA, 2015). De forma geral, ela é resultante do aumento do nível do mar e/ou do balanço negativo do estoque de sedimentos. As mudanças da linha de costa refletem padrões de acreção e de erosão causados pela complexa interação entre processos naturais que atuam em uma variedade de escalas temporais e espaciais. As praias arenosas estão sujeitas à ação erosiva durante eventos de alta energia e à ação acreativa durante períodos de menor energia. Estudos apontam que a erosão costeira é, em grande parte, consequência da ocupação indevida da orla, sendo que a maior parte dos danos ocorre durante eventos de tempestades extratropicais, especialmente quando associadas a marés de sizígia (KOMAR, 1976; KOMAR et al., 1999; SIMÓ; HORN FILHO, 2004; RUDORFF; BONETTI; MORENO, 2005).

Consoante as problemáticas costeiras e o apoio da ferramenta pelo governo federal, através do Ministério do Meio Ambiente, tanto no âmbito governamental como acadêmico, este trabalho pretende avaliar as potencialidades de utilização dessa ferramenta no órgão executivo estadual de meio ambiente de Santa Catarina.

METODOLOGIA

O Seminário Internacional Brasil-Espanha de Apoio à Gestão da Costa Brasileira, realizado em 2011, foi estruturado em quatro eixos básicos em que as discussões tomaram forma para a proposição de diretrizes e recomendações:

- Eixo 1: Pesquisa e monitoramento;
- Eixo 2: Obras costeiras;
- Eixo 3: Gestão do patrimônio da União; e
- Eixo 4: Instrumentos de gestão ambiental.

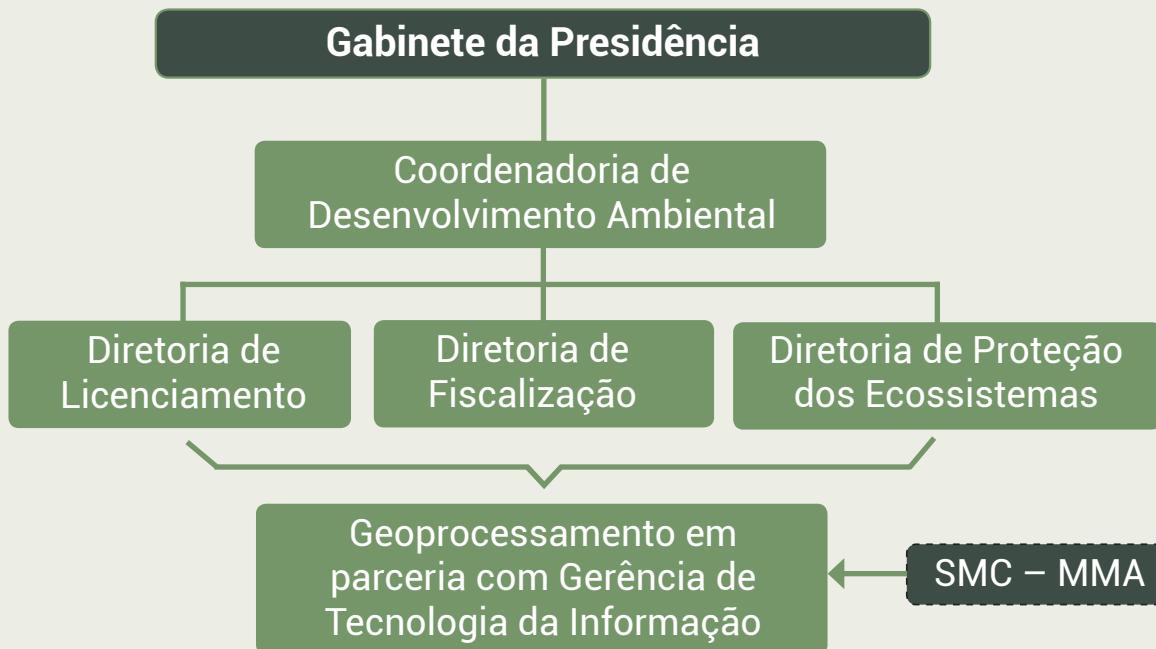
Seguindo essa estrutura, as potencialidades do modelo no órgão ambiental estadual foram avaliadas quanto aos temas pertinentes à instituição: Pesquisa e monitoramento; Obras costeiras e Instrumentos de gestão ambiental.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando as três linhas de pesquisa abordadas no Seminário Internacional Brasil-Espanha de Apoio à Gestão da Costa Brasileira: Pesquisa e monitoramento, Obras costeiras e Instrumentos de gestão ambiental, avalia-se que a ferramenta tem potencial de aprimorar e aperfeiçoar muitas das atividades realizadas no órgão estadual de meio ambiente de Santa Catarina.

Com base nessas linhas de temáticas, o setor de Geoprocessamento da FATMA, responsável por realizar o levantamento e o processamento de informações sobre o território catarinense, poderia fazer a coordenação técnica do processo em parceria com a Gerência de Tecnologia da Informação (Figuras 11.1 e 11.3). Como a aplicação do modelo pelos técnicos exige requisitos e conhecimentos prévios, é importante também ter nesse setor um núcleo de estudos e treinamentos sobre o modelo.

Figura 11.3 – Proposta de integração do SMC à estrutura da FATMA



Fonte: Dos autores (2018).

As Figuras 11.4, 11.5, 11.6 e 11.8 apresentam as gerências e coordenadorias de desenvolvimento ambiental dentro da estrutura da FATMA (Figura 11.1), onde o modelo poderia ser aplicado.

Figura 11.4 – Gerências da Diretoria de Licenciamento com potencial utilização do SMC-Brasil



Fonte: Adaptado de FATMA. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/organograma_fatma.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.

De acordo com a Figura 11.4, dentro da Diretoria de Licenciamento, a Gerência de Avaliação de Impacto Ambiental analisava licenciamentos de empreendimentos de grande porte, avaliando Estudos de Impacto Ambiental (EIA), ocorrendo muitos estudos de empreendimentos costeiros em que poderia ser aplicado o modelo.

A Gerência de Licenciamento Agrícola e Florestal poderia se integrar ao SMC em situações de licenciamento ambiental que envolvam áreas costeiras. Pode ser também estudada a integração de aspectos da vegetação adicionalmente, como um dos parâmetros do modelo (por exemplo, praias antes da recuperação e após revegetação com espécies fixadoras de dunas).

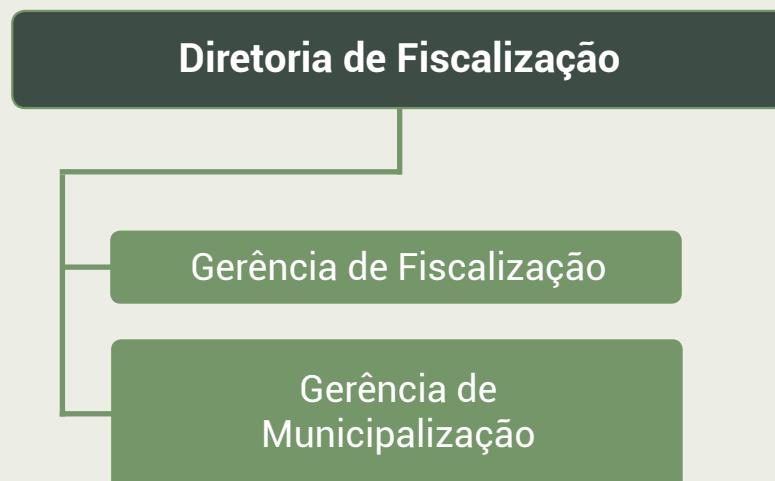
E por fim a Gerência de Licenciamento Ambiental Urbano avalia principalmente empreendimentos de porte grande com a necessidade de elaboração de Estudo Ambiental Simplificado, frequentemente analisando projetos executados na região costeira.

A Resolução do Conselho Estadual de Meio Ambiente de Santa Catarina nº 98/2017 (CONSEMA nº 98/2017) aprova a Listagem das Atividades Consideradas Potencialmente Causadoras de Degradação Ambiental passíveis de licenciamento ambiental no estado de Santa Catarina e a indicação do competente estudo ambiental para fins de licenciamento. Alguns exemplos de atividades que podem ser diretamente beneficiadas através de estudos que aplicam o modelo são estruturas de apoio náutico, dragagens, alimentação artificial de praias, molhes, guia de correntes e similares. Essas modalidades de licenciamento eram conduzidas pelas Gerências de Avaliação de Impacto Ambiental, Gerência de Licenciamento Urbano e Coordenadorias Ambientais (SANTA CATARINA, 2017b).

Nesse sentido, o modelo pode ter intensa aplicação prática na Diretoria de Licenciamento. Como exemplo pode ser feita a inclusão de solicitação de dados pertinentes nas Instruções Normativas da fundação e nos Termos de Referência dos Estudos Ambientais em Ambientes Costeiros. Ademais, as citadas Instruções Normativas podem indicar os parâmetros mínimos necessários para obras costeiras, como abordado no seminário, sugerindo guias de referência.

Já na Diretoria de Fiscalização (Figura 11.5), especificamente na Gerência de Fiscalização, atividades de consultas poderiam ser realizadas através da obtenção de dados para fiscalização em obras costeiras e processos erosivos, por exemplo. Na Gerência de Municipalização poderia ser avaliada a pertinência de convênios de capacitação e transferência de dados com os municípios.

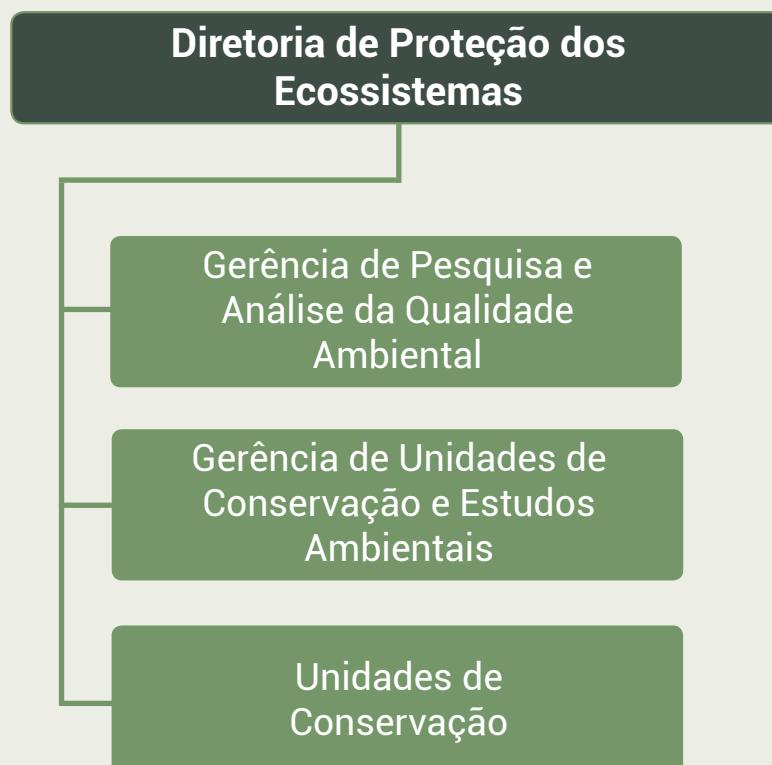
Figura 11.5 – Gerências da Diretoria de Fiscalização com potencial utilização do SMC-Brasil



Fonte: Adaptado de FATMA. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/organograma_fatma.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.

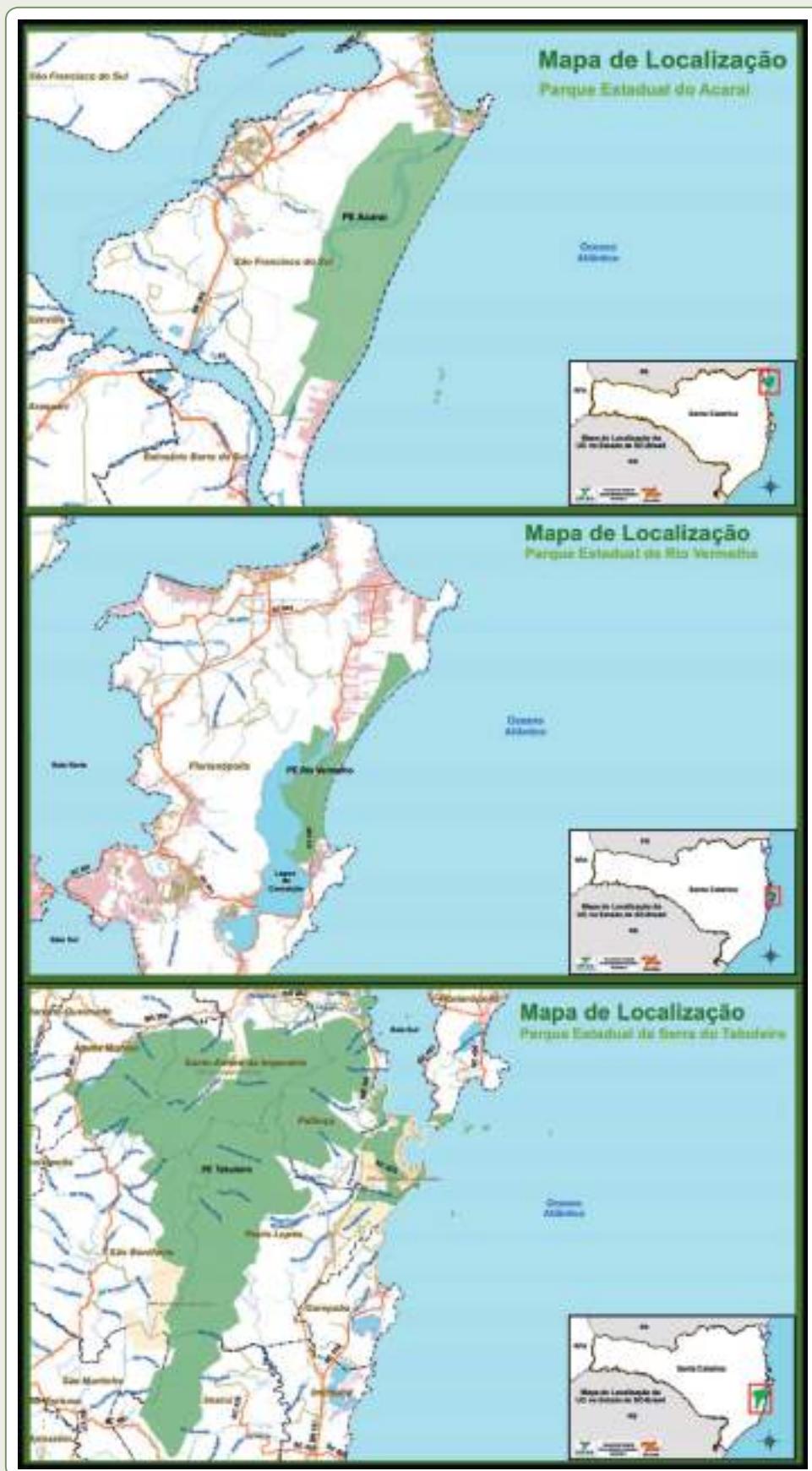
Na Diretoria de Proteção dos Ecossistemas (Figura 11.6), atividades voltadas diretamente para pesquisa e monitoramento poderiam ser desenvolvidas na Gerência de Pesquisa e Análise da Qualidade Ambiental e integrar pesquisas aos dados de monitoramento da balneabilidade. Outros temas de pesquisas podem ser a aplicação do modelo SMC-Brasil nas unidades de conservação costeiras, tais como Parque Estadual Acaraí, localizado no município de São Francisco do Sul, Parque Estadual do Rio Vermelho, em Florianópolis, e Parque Estadual da Serra do Tabuleiro, que abrange áreas dos municípios de Florianópolis, Palhoça, Santo Amaro da Imperatriz, Águas Mornas, São Bonifácio, São Martinho, Imaruí e Paulo Lopes (Figura 11.7). Ações voltadas à pesquisa e monitoramento podem ser desenvolvidas e seus resultados podem retornar ao SMC-Brasil.

Figura 11.6 – Gerências da Diretoria de Proteção dos Ecossistemas com potencial utilização do SMC-Brasil



Fonte: Adaptado de FATMA. Disponível em: <http://www.fatma.sc.gov.br/ckfinder/userfiles/arquivos/organograma_fatma.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.

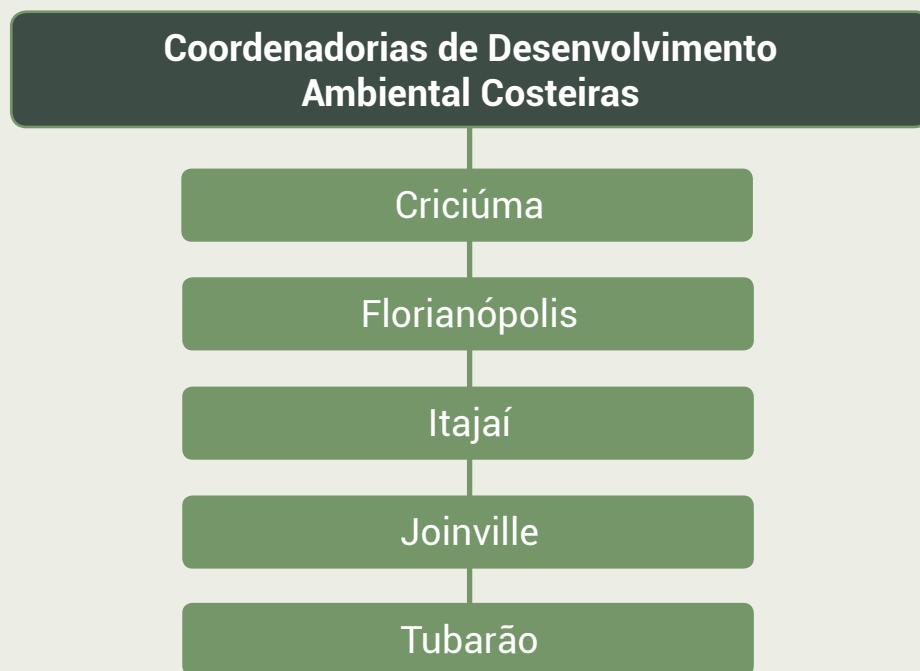
Figura 11.7 – Unidades de Conservação Estaduais Costeiras



Fonte: Elaborado pelo geógrafo Luciano Bonotto (2015).

Ainda, as coordenadorias citadas na Figura 11.8 podem também considerar a integração do SMC-Brasil em suas atividades, já que realizam atividades de licenciamento e fiscalização ambiental de empreendimentos situados na zona costeira. O licenciamento nessas coordenadorias refere-se prioritariamente aos empreendimentos de porte pequeno e médio.

Figura 11.8 – Coordenadorias de Desenvolvimento Ambiental com potencial utilização do SMC-Brasil



Fonte: Dos autores (2018).

O SMC-Brasil pode ser incorporado à estrutura de gestão do órgão estadual de meio ambiente através de instrumentos, tais como convênio de cooperação técnica, com coordenação técnica do setor de geoprocessamento, sendo previstas atividades de teste e capacitação para uso do sistema.

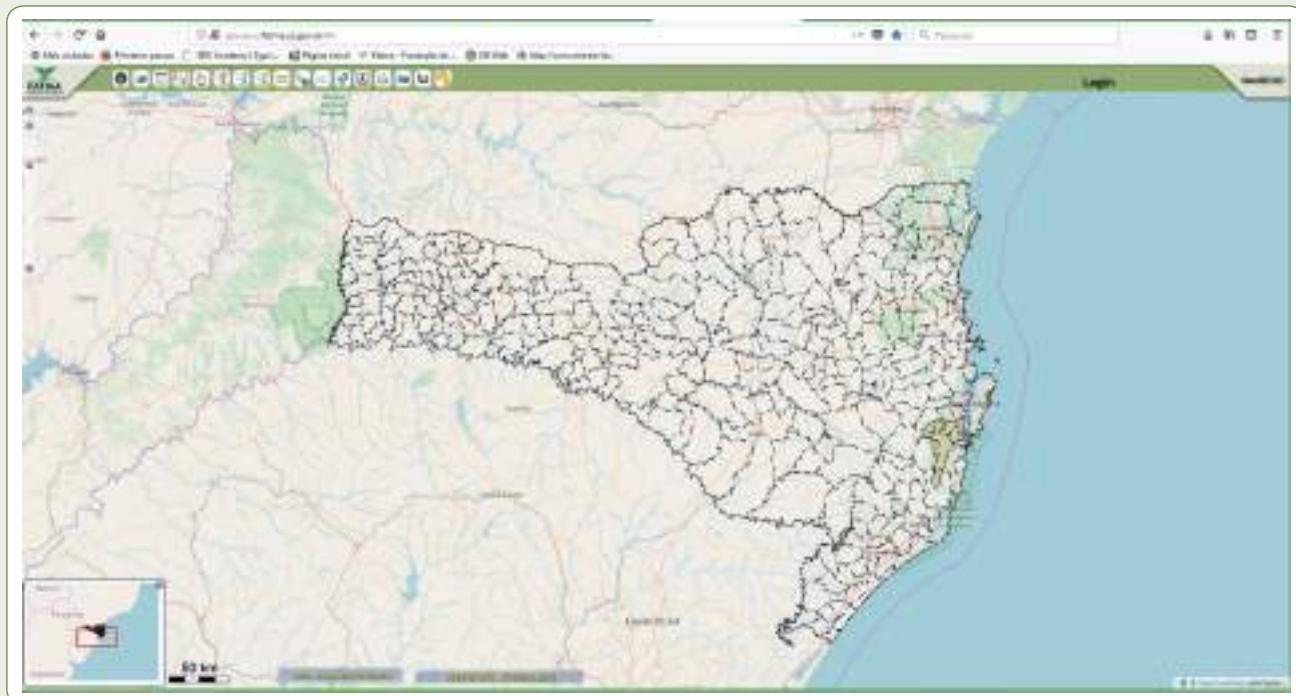
As atividades voltadas à educação ambiental, com resultados obtidos pela implementação do modelo, podem propiciar o conhecimento de questões voltadas aos processos ocorrentes nos ambientes de praias, como a erosão costeira, visando a conscientização, a recuperação e a preservação através da utilização planejada em conjunto com a sociedade desses ambientes. Para o licenciamento ambiental, o órgão estadual de Santa Catarina utiliza o Sistema de Informações Ambientais (SINFAT) (Figura 11.9a) e, para a fiscalização, o Sistema de Gestão e Acompanhamento de Infrações Ambientais (GAIA) (Figura 11.9b). Além desses dois sistemas, existe o GeoSEUC (Figura 11.10), que é um sistema de informação geográfico elaborado pela FATMA e disponibilizado na rede mundial de computadores (SIGWEB). Foi concebido para ser uma ferramenta computacional básica de análise espacial, de busca, registro e consulta de dados geográficos, de produção de mapas e como um visualizador de dados ambientais produzidos e cadastrados pela FATMA, objetivando, dessa maneira, o entendimento do arranjo espacial e a melhoria na conservação da biodiversidade do estado de Santa Catarina. Nesses sistemas poderiam ser estudadas maneiras de integração com o SMC, sobretudo nas atividades que envolvem análises da morfodinâmica de praias, podendo auxiliar o corpo técnico do órgão ambiental estadual nas avaliações preliminares locacionais e de ações estratégicas de tomada de decisões voltadas para questão ambiental.

Figura 11.9 – a) Sistema de Informações Ambientais (SINFAT); b) Sistema de Gestão e Acompanhamento de Infrações Ambientais (GAIA)



Fonte: FATMA-GeoSEUC (2017).

Figura 11.10 – Sistema de Informação Geográfico



Fonte: FATMA-GeoSEUC (2017).

O cenário ideal para a utilização do SMC-Brasil no órgão ambiental seria a implantação do governo eletrônico nos seus procedimentos (fiscalização, licenciamento, unidades de conservação, gestão ambiental, gerenciamento de recursos costeiros etc.). Segundo Agune e Carlos (2005), o governo eletrônico, ao contrário do que o nome pode em princípio sugerir, significa muito mais do que a intensificação do uso da tecnologia da informação pelo poder público. Em verdade, ele deve ser encarado como a transição entre uma forma de governar fortemente segmentada, hierarquizada e burocrática, que ainda caracteriza a maioria das organizações públicas e privadas, para um Estado mais horizontal, colaborativo, flexível e inovador, coerente com a chegada da sociedade do conhecimento, fenômeno que começou a ganhar contornos mais visíveis no último quarto do século passado.

O governo eletrônico vai ao encontro das demandas da sociedade por mais transparência, permitindo o acesso *on-line* aos processos ambientais e maior controle social das ações do poder público.

Sob outro prisma, a adoção do governo eletrônico permitiria, ainda, a criação de critérios objetivos, e a formação de um banco de dados de decisões em processos de licenciamento, fiscalização e gestão ambiental. Esse banco de dados poderia auxiliar na simplificação dos processos ambientais. Assim, a utilização do SMC-Brasil, aliada ao governo eletrônico, torna-se também uma ferramenta estratégica de alto impacto na adequada gestão de recursos costeiros, que pode contribuir para o banco de dados do Estado, além de os dados estaduais poderem retroalimentar o modelo.

CONCLUSÃO

A instrumentalização do órgão ambiental de Santa Catarina, através da implementação da ferramenta Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), no que tange aos aspectos voltados aos processos de morfodinâmica costeira, pode incrementar as ações realizadas atualmente e contribuir para a gestão integrada da costa brasileira.

A partir da análise realizada, constatou-se que em todas as diretorias técnicas da instituição e nas coordenadorias de desenvolvimento ambiental que incluem municípios costeiros, o modelo pode ser amplamente aplicado.

Além disso, aliado às problemáticas costeiras como processos erosivos, construção de obras e intensificação da ocorrência de eventos climáticos extremos nas zonas costeiras, é necessário capacitação, no que tange aos aspectos técnicos nessas temáticas.

Atualmente, o órgão responsável pela coordenação da Gestão Costeira, através do Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro, é a Secretaria do Planejamento do Estado de Santa Catarina (Lei nº 14.465, de 23 de julho de 2008) (SANTA CATARINA, 2008). Porém, podem ser também implementadas ações conjuntas integrando as potencialidades da ferramenta SMC-Brasil, que contribuiria com ambas as instituições.

A ferramenta, composta pelo modelo e pela base de dados, pode permitir a construção de cenários da dinâmica das linhas de praias, produzindo informações importantes para atividades de licenciamento, fiscalização, pesquisa e monitoramento no espaço costeiro, aliadas a questões de planejamento e qualificação da tomada de decisão.

Em discussões pertinentes ao licenciamento de obras costeiras, a ferramenta poderia auxiliar na resolução de problemas de engenharia e na indicação de parâmetros para monitoramento da linha de costa (erosão e progradação) e de variações morfológicas a curto e longo prazos.

Pesquisas científicas com a ferramenta SMC-Brasil estão sendo realizadas pelas universidades brasileiras, especialmente em Santa Catarina, na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Parcerias também podem ser discutidas objetivando a troca de conhecimentos e de base de dados.

São fundamentais também as ações voltadas para a educação ambiental, propiciando, por meio do contato das pessoas com as questões voltadas para a dinâmica das áreas costeiras, a conscientização sobre a necessidade da utilização planejada desses ambientes. A Lei nº 17.354, de 20 de dezembro de 2017, criou o Instituto do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (IMA), que absorveu as obrigações da extinta Fundação do Meio Ambiente de Santa Catarina (FATMA).

Nesse sentido, propõe-se que seja estudada pelos gestores da instituição a implementação, na nova estrutura do instituto, do Sistema de Modelagem Costeira de maneira integrada às atividades pertinentes ao órgão ambiental estadual.

O ideal seria também avaliar a possibilidade de integração com os sistemas existentes na instituição e a implantação de um sistema único e integrado de governo eletrônico, que agregasse a base de dados de todos os sistemas utilizados pelo órgão ambiental, gerando transparência e celeridade nos procedimentos e processos ambientais com qualidade e excelência na gestão.

REFERÊNCIAS

AGUNE, R. M. CARLOS, A. J. Governo eletrônico e novos processos de trabalho. In: LEVY, E.; DRAGO, P. A. (Org.). **Gestão pública no Brasil contemporâneo**. São Paulo: Fundap, 2005.

BIRD, E. C. F. **Coastal changes**: a global overview. New York: John Wiley and Sons, 1985. 219 p.

BIRD, E. C. F. **Submerging coasts**: the effects of a rising sea level on coastal environments. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1993. 184 p. ISBN 0471938076.

BIRD, E. C. F. **Coastal geomorphology**: an introduction. 2nd ed. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2008. 436 p.

BONOTTO, L. **Unidades de conservação estaduais costeiras**. 2015. 3 mapas. Escala varia. Mapas elaborados especialmente para este trabalho.

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. **Diário Oficial da União**, 2011.

BRASIL. Lei nº 7.661, de 16 de maio de 1988. Institui o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, 1988.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: manual do usuário – SMC 3.0. Brasília: MMA, no prelo.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MP) e Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Documento síntese do Seminário Internacional Brasil-Espanha**: apoio à gestão da costa brasileira. Seminário Internacional Brasil-Espanha Apoio à Gestão da Costa Brasileira, 10 e 11 de maio de 2011 – Brasília, DF.

CALLIARI, L. J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO JUNIOR, E. Morfodinâmica praial: uma breve revisão. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 51, p. 63-78, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/bjoce/v51nunico/07.pdf>>. Acesso em: ago. 2015.

FATMA-GeoSEUC. **GeoSEUC**. Disponível em: <<http://geoseuc.fatma.sc.gov.br/#/>>. Acesso em: fev. 2017.

KOMAR, P. D. **Beach processes and sedimentation**. New Jersey: Prentice-Hall, 1976. 429 p.

KOMAR, P. D.; MCDOUGAL, W. G.; MARRA, J. J.; RUGGIERO, P. The rational analysis of setback distances: applications to the Oregon Coast. **Shore and Beach**, v. 67, n. 1, p. 41-49, 1999.

MUEHE, D. **Erosão e progradação no litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 476 p. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_sigercom/_publicacao/78_publicacao12122008084856>. Acesso em: ago. 2015.

RUDORFF, F. D. M.; BONETTI, J.; MORENO, D. A. Maré de tempestade. In: HERRMANN, M. L. P. (Ed.). **Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina**. Florianópolis: CEPED-UFSC, 2005.

SANTA CATARINA. Decreto nº 662, de 30 de julho de 1975. Institui a Fundação de Amparo à Tecnologia e ao Meio-Ambiente (FATMA) e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 1975.

SANTA CATARINA. Lei nº 8.245, de 18 de abril de 1991. Dispõe sobre a organização da Administração Pública e sobre as diretrizes para a reforma administrativa do Poder Executivo e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 1991.

SANTA CATARINA. Lei Estadual nº 14.465, de 23 de julho de 2008. Altera dispositivo da Lei nº 13.553, de 2005, que institui o Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 2008.

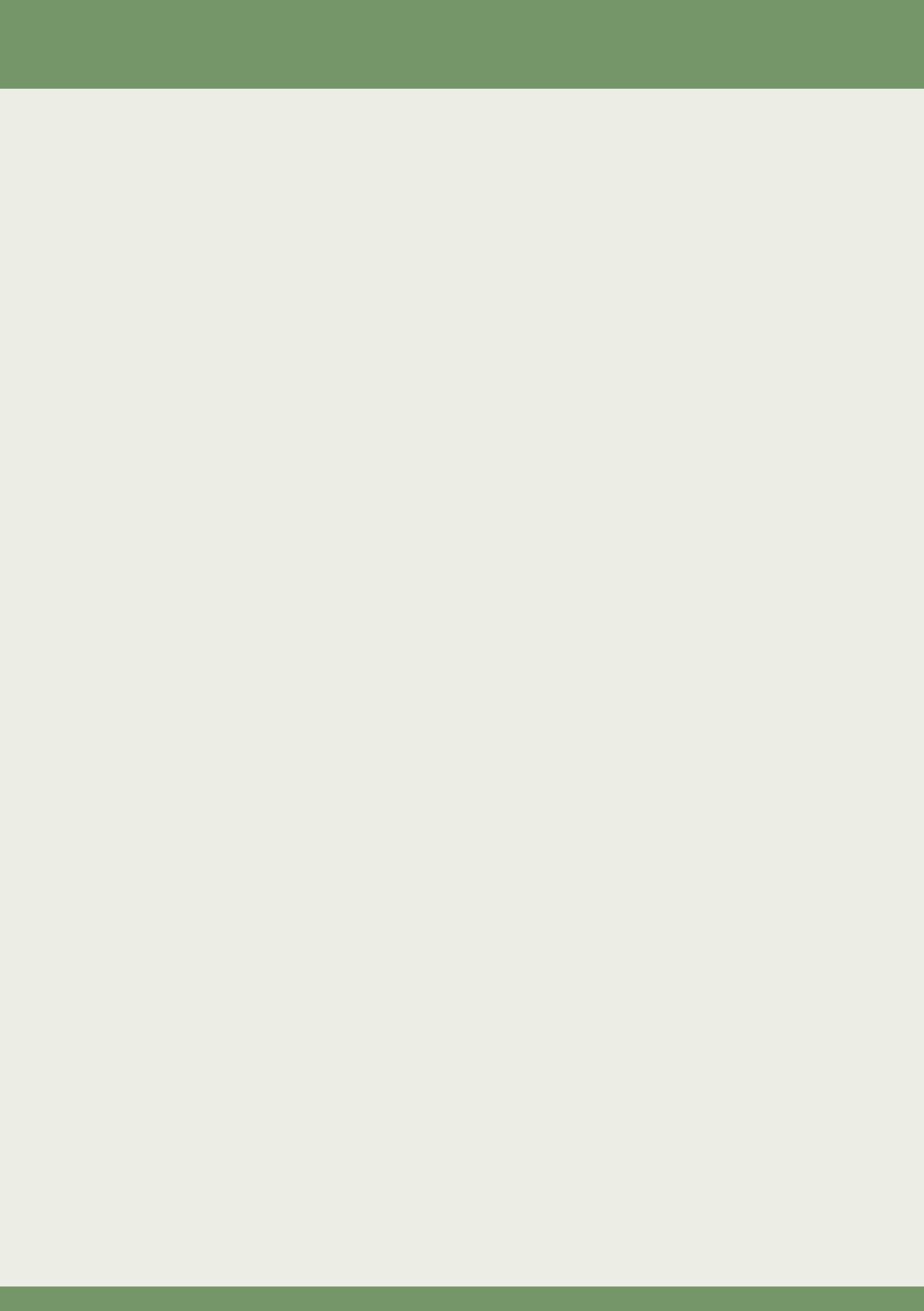
SANTA CATARINA. Lei Estadual nº 14.675, de 13 de abril de 2009. Institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 2009.

SANTA CATARINA. Lei Estadual nº 17.354, de 20 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a criação do Instituto do Meio Ambiente do Estado de Santa Catarina (IMA), extingue a Fundação do Meio Ambiente (FATMA) e estabelece outras providências. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 2017a.

SANTA CATARINA. Resolução nº 98, do Conselho Estadual de Meio Ambiente de Santa Catarina, de 05 de maio de 2017. Aprova, nos termos do inciso XIII, do art. 12, da Lei nº 14.675, de 13 de abril de 2009, a listagem das atividades sujeitas ao licenciamento ambiental, define os estudos ambientais necessários e estabelece outras providências. **Diário Oficial do Estado de Santa Catarina**, 2017b.

SCHMIDT, L.; GOMES, C.; PRISTA, P. Políticas, públicos e estratégias de adaptação às alterações climáticas em zonas costeiras. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO MAR, 3., **Anais...**, Lisboa, 2015.

SIMÓ, D. H.; HORN FILHO, N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na Ilha de Santa Catarina. **Gravel**, v. 2, p. 93-103, 2004.



MODELAGEM DOS PROCESSOS MORFODINÂMICOS DA PRAIA DE PEREQUÊ, PORTO BELO (SC): DETERMINAÇÃO DAS CAUSAS DE ORIGEM

Rafael Bonanata da Rocha
Rômulo Cruz Monteiro
Rodrigo Camacho
Marcus Polette

RESUMO

Com o objetivo de compreender os mecanismos de funcionamento morfodinâmico da Praia de Perequê e determinar as causas que originaram seu estado atual, caracterizado pela limitada faixa de areia disponível para os usuários e pelo constante impacto das ondas sobre as infraestruturas urbanas costeiras, foram utilizados modelos computacionais de geração de ondas em águas profundas, propagação em águas rasas, circulação na zona de arrebentação, assim como modelos empíricos para análise da forma em planta de equilíbrio e estimativa da largura e profundidade-limite do perfil ativo. Os resultados mostraram que a praia possui forma em planta em estado de equilíbrio estático, ou muito próximo ao equilíbrio. Se em planta está em equilíbrio estático, pode-se assumir que as causas dos problemas atuais sejam a soma dos seguintes fatores: 1) incapacidade de a praia responder a mudanças de nível do mar na escala de curto, médio e longo prazo e 2) término das interações entre praia e duna, ambos resultantes das construções em locais inadequados. Durante eventos de tempestade, numa costa não urbanizada, a zona de arrebentação se alarga em direção a terra. Na Praia de Perequê, onde

há muros e calçamento, esse alargamento não pode se desenvolver completamente, concentrando a energia dos processos da zona de arrebentação numa área confinada. Se na Praia de Perequê existem infraestruturas urbanas localizadas em uma área que, naturalmente, seria uma área ativa da praia e, por questões socioeconômicas, não podem ser removidas, deve-se pensar em soluções de engenharia que lhes forneçam proteção (já que a opção de nada fazer não deve ser considerada). Essa proteção pode ser obtida através de técnicas de engordamento artificial de praia ou da combinação de engordamento e estruturas rígidas para estabilização da engorda, tais como quebra-mares costeiros e/ou espigões transversais, os quais diminuem a perda de sedimentos e aumentam a vida útil da obra. A escolha deve ser realizada com base nos resultados de uma análise pormenorizada de funcionalidade, custo/benefício, impactos ambientais ligados a questões socioeconômicas, ecológicas e estéticas, assim como de influência nas áreas adjacentes.

Palavras-chave: Morfodinâmica costeira. Modelagem computacional. Praia de Perequê.

INTRODUÇÃO

O intenso processo de ocupação do litoral centro-norte de Santa Catarina ocorreu sobretudo nos últimos 40 anos com o rápido crescimento do turismo de sol e praia. Alguns dos municípios da região infelizmente não obtiveram êxito no processo de planejamento urbano devido a fortes interesses imobiliários e a desinteresse intencional dos tomadores de decisão no processo de ordenamento territorial.

As consequências desse processo foram funestas em alguns locais, como é o caso de algumas praias que tiveram um forte processo de erosão, colocando em risco estruturas de calçadões e residências e resultando inclusive na perda de ecossistemas fundamentais para a região, como é o caso dos sistemas de dunas.

De uma maneira geral, toda ação na costa visando sua recuperação inicia quando a sociedade se sente ameaçada. O gestor, consciente das necessidades e/ou demandas sociais, deve entender a origem do problema e buscar a melhor forma de diagnosticá-lo, estabelecer um efetivo plano de ação e implementar as ações necessárias para solucionar o problema.

Em cada um desses passos, técnicos e gestores buscam gerenciar a informação relativa ao problema de engenharia para, de acordo com outras condições, tais como prioridades políticas, disponibilidade econômica, aspectos estratégicos etc. decidirem sobre a conveniência de continuar o processo de definição da atuação.

O presente estudo, inserido na fase de diagnóstico, teve como objetivo auxiliar a Prefeitura do Município de Porto Belo (SC) na determinação das causas que originaram o estado atual da Praia de Perequê, caracterizado pela limitada faixa de areia disponível para os usuários e pelo constante impacto das ondas sobre a infraestrutura urbana ainda existente (muros de proteção e passeio marítimo).

Um diagnóstico constitui-se de um elemento capaz de entender o problema com exatidão e oferecer metas necessárias para que o plano possa ser executado da forma mais eficaz, eficiente e efetiva possível. Assim, o presente trabalho contribui de forma significativa para entender o problema na Praia de Perequê, assim como oferece subsídios para o projeto Orla de Porto Belo, que nas suas diversas oficinas de gestão priorizou a recuperação dessa praia reconhecida como das mais importantes do ponto de vista da ocupação histórica na região.

ÁREA DE ESTUDO

A Praia de Perequê está localizada no município de Porto Belo, litoral centro-norte do Estado de Santa Catarina, a aproximadamente 60 km da capital, Florianópolis, nas seguintes coordenadas geográficas: 27°09'28"S e 48°33'11"W. Em conjunto com as praias de Itapema, Meia Praia e Porto Belo, forma uma enseada de aproximadamente 13 km de extensão, conhecida como Enseada de Porto Belo, cuja abertura está voltada para NE.

A localização da área de estudo – em conjunto com as principais feições geomorfológicas, importantes de serem citadas pelo papel que desempenham no funcionamento morfodinâmico das praias do interior da enseada – é apresentada na Figura 12.1.

Figura 12.1 – Praia de Perequê, localizada no interior da Enseada de Porto Belo, a aproximadamente 60 km da capital do estado de Santa Catarina, Florianópolis



Fonte: Dos autores (2018).

MÉTODO DE ESTUDO DE MORFODINÂMICA DE PRAIAS

O método de estudo utilizado para entendimento dos processos morfodinâmicos da Praia de Perequê foi desenvolvido pelo antigo Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (GIOC) da Universidad de Cantabria (atual IH-Cantabria) e Dirección General de Costas do Ministerio de Medio Ambiente da Espanha, e faz parte de um sistema denominado “Modelo de Ayuda a la Gestión del Litoral”.

O sistema foi adaptado e transferido à administração pública brasileira, dentro do projeto Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira, com a colaboração internacional de vários órgãos.

Foi criado o Sistema de Modelagem Costeira (SMC-Brasil), que consiste num conjunto de aplicações, bases de dados (batimetria, ondas e níveis) e modelos matemáticos estruturados de

acordo com as escalas espaciais e temporais das várias dinâmicas que afetam a morfologia de uma praia. Essa ferramenta permite, no campo da engenharia costeira, facilitar aos técnicos a elaboração de estudos passo a passo, usando as metodologias de trabalho propostas nos Documentos Temáticos e de Referência. O objetivo é, mediante a unificação de critérios técnicos e a organização sistemática dos modelos, que os técnicos aumentem a qualidade de seus estudos e, portanto, também vejam aumentada a confiabilidade de suas decisões.

Hipóteses assumidas

Os elementos mais relevantes do método empregado para o cálculo de estabilidade e evolução do sistema praial são:

É aceita, como hipótese inicial, a ortogonalidade dos movimentos longitudinais e transversais da praia. Consequentemente, admite-se que a estabilidade e a evolução da praia possam ser analisadas estudando a estabilidade e a evolução de sua forma em planta e perfil;

Separam-se a análise de estabilidade e evolução da praia de acordo com as suas diferentes escalas de variabilidade.

CLIMA DE ONDAS EM ÁGUAS PROFUNDAS

Apesar da importância econômica e social do litoral centro-norte de Santa Catarina, poucas campanhas de medições de ondas em águas profundas foram realizadas até o momento na região.

Com o objetivo de suprir a falta de dados medidos ao largo da Praia de Perequê, foi gerada uma série temporal de 30 anos em águas profundas com a utilização do modelo numérico WAVEWATCH III (WWIII), desenvolvido pelo National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), para um ponto localizado a aproximadamente 200 m de profundidade, nas seguintes coordenadas geográficas: 27°S e 47°W (Figura 12.1).

O WWIII é um modelo espectral de terceira geração (não assume qualquer tipo de restrição à forma do espectro) que permite descrever adequadamente os processos de geração e propagação de ondas em águas profundas (TOLMAN, 2002). O modelo possui como dados de entrada os campos de reanálise de ventos globais provenientes do programa Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) do National Center Environment Prediction/NOAA (NCEP).

A série de dados gerada contém informações de altura significativa de onda (H_s), período de pico (T_p) e direção média (Dir_m), a cada três horas, de 1º de janeiro de 1979 a 31 de dezembro de 2010.

Estatística básica dos dados de ondas em águas profundas

Os diagramas de ocorrência conjunta de altura significativa de onda e período de pico, e altura significativa de onda e direção de propagação são apresentados nas figuras 12.2 e 12.3, respectivamente.

Figura 12.2 – Ocorrência conjunta de altura significativa de onda (m) e período de pico (s) em águas profundas

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WW	NW	NWW	Total	Porc.
0.0 - 0.5																	8	0.009
0.5 - 1.0	7	7	13	799	676	323	289	379	521	102	8			2	2	6	3149	3.477
1.0 - 1.5	53	47	139	5627	4777	2924	2295	2370	4386	1086	13	11	7	2	8	27	23872	26.36
1.5 - 2.0	38	33	300	5210	4326	3099	2666	2992	7173	2193	35	49	30	8	11	26	28131	31.06
2.0 - 2.5	8	18	173	2140	1919	1675	1572	2014	6121	2292	31	52	32	1	2	6	18056	19.94
2.5 - 3.0	3	82	725	662	668	685	919	3783	1927	17	27	26		3	1	9528	10.52	
3.0 - 3.5	1	23	193	234	224	280	380	1883	1109	2	13	11				4353	4.806	
3.5 - 4.0		12	79	99	66	134	147	839	665	1	6	8				2056	2.27	
4.0 - 4.5		4	32	18	19	53	85	327	390	1						923	1.019	
4.5 - 5.0		8	9	7	18	36	112	157								347	0.383	
5.0 - 5.5			3	2	3	13	46	48								115	0.127	
5.5 - 6.0						3	20	7								30	0.033	
6.0 - 6.5							5	5								8	0.009	
Total	106	109	866	14813	12731	9001	7995	9338	25218	9919	103	158	114	16	24	65	90576	
Porc.	0.12	0.12	0.96	16.35	14.06	9.94	8.83	10.31	27.84	10.95	0.11	0.17	0.13	0.02	0.03	0.07		
Hs Méd.	1.5	1.6	1.8	1.7	1.8	1.8	1.9	2.1	2.5	2	2.2	2.4	1.8	1.6	1.5			
Hs Máx.	2.4	3	4.3	4.7	5.2	5.1	5.2	5.7	6.4	6.1	4.5	4	3.9	2.8	2.7	2.1		

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 12.3 – Ocorrência conjunta de altura significativa de onda (m) e direção de propagação (°) em águas profundas

	2,0 - 4,0	4,0 - 6,0	6,0 - 8,0	8,0 - 10,0	10,0 - 12,0	12,0 - 14,0	14,0 - 16,0	16,0 - 18,0	18,0 - 20,0	20,0 - 22,0	22,0 - 24,0	Total	Porc.
0.0 - 0.5			6	2								8	0.009
0.5 - 1.0	30	302	1433	740	406	147	81	10				3149	3.477
1.0 - 1.5	47	1543	10606	6773	3035	1183	402	77	4	2		23872	26.36
1.5 - 2.0		1310	9047	9900	5349	1929	450	59	6		1	28131	31.06
2.0 - 2.5	455	4436	3822	4966	1920	417	26	8	4	2		18056	19.94
2.5 - 3.0	27	1741	2803	3030	1555	350	21	1				9528	10.519
3.0 - 3.5	2	482	1252	1211	1118	268	10					4353	4.806
3.5 - 4.0		94	641	547	592	177	5					2056	2.27
4.0 - 4.5		3	298	296	242	81	2					923	1.019
4.5 - 5.0			105	135	74	28	5					347	0.383
5.0 - 5.5			14	46	48	6	1					115	0.127
5.5 - 6.0				11	14	5						30	0.033
6.0 - 6.5				3	3	2						8	0.009
Total	77	3639	28058	28431	19035	8825	2267	216	19	6	3	90576	
Porc.	0.1	4	31	31.4	21	9.7	2.5	0.2	0	0	0		
Hs Méd.	1	2	2.3	2.7	3.5	3.5	3.5	3	2	1.8	2.1		
Hs Máx.	1.5	3.1	4.5	5.2	6.3	6.4	6.1	5.4	2.9	2.3	2.2		

Fonte: Dos autores (2018).

No Quadro 12.1 é apresentada a estatística básica dos dados de ondas em águas profundas.

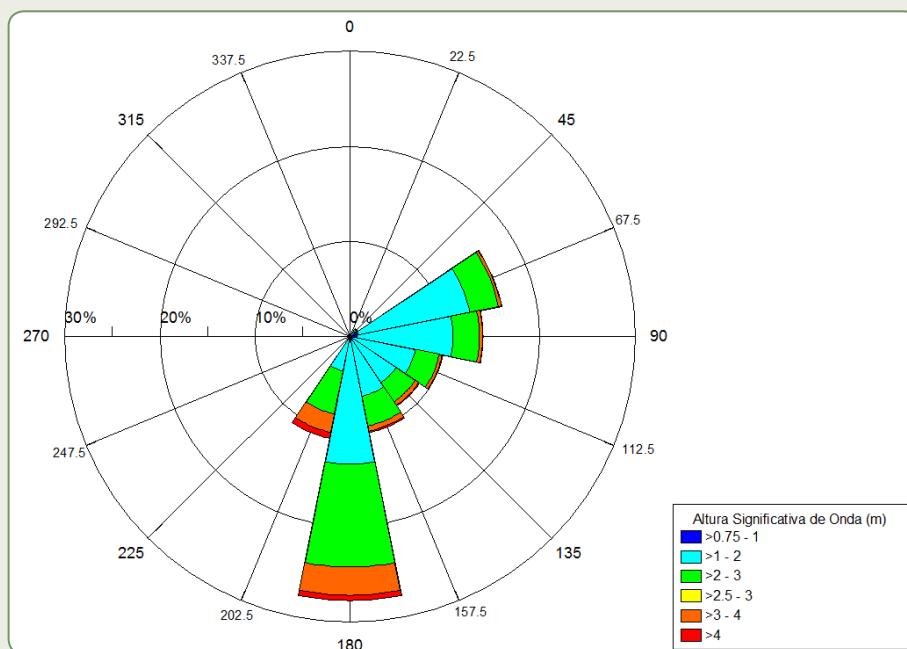
Quadro 12.1 – Estatística básica dos dados de ondas em águas profundas

Direções	Prob.	$H_{S50\%}$	$H_{S90\%}$	$H_{S99\%}$	H_{S12}
N	0,0012	1,4	1,9	2,3	2,4
NNE	0,0012	1,5	2,1	3,0	3,0
NE	0,0096	1,7	2,6	3,7	4,2
ENE	0,1635	1,5	2,3	3,3	4,2
E	0,1406	1,5	2,3	3,5	4,2
ESE	0,0994	1,6	2,5	3,4	4,3
SE	0,0883	1,7	2,7	3,9	4,7
SSE	0,1031	1,8	2,8	4,2	5,0
S	0,2784	2,0	3,1	4,3	5,3
SSW	0,1095	2,3	3,6	4,7	5,3
SW	0,0011	2,0	2,8	4,1	4,4
WSW	0,0017	2,1	3,0	3,6	3,9
W	0,0013	2,2	3,3	3,8	3,9
WNW	0,0002	1,7	2,7	2,7	2,7
NW	0,0003	1,6	2,1	2,6	2,6
NNW	0,0007	1,4	1,9	2,1	2,1

Fonte: Dos autores (2018).

Na Figura 12.4 é apresentada a rosa de ondas elaborada a partir dos dados de reanálise em águas profundas.

Figura 12.4 – Rosa de ondas elaborada a partir dos dados de reanálise em águas profundas



Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados da análise estatística básica mostraram que, ao largo do litoral centro-norte do estado de Santa Catarina, as ondas mais frequentes são provenientes de S (27,84 %), seguidas pelas de ENE (16,35 %) e E (14,06 %).

As maiores alturas significativas de onda são provenientes de S (6,4 m) e SSW (6,1 m), respectivamente.

Para todo o registro, considerando todas as direções, a maior frequência de ocorrência é de ondas com altura significativa entre 1,0 e 1,5 m, com período associado de 6 a 8 s.

A maior porcentagem das ondulações provenientes de S possui altura significativa entre 1,5 e 2,0 m. A maior porcentagem das ondulações provenientes de ENE possui altura significativa entre 1,0 e 1,5 m.

PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM ÁGUAS RASAS E INCIDÊNCIA NA COSTA

Quando se planeja qualquer atuação na costa, é imprescindível conhecer os processos e dinâmicas que predominam na área de estudo. Com esse propósito se desenvolve a presente seção, na qual se estuda o fenômeno que em maior medida governa a estabilidade do sistema praial de Perequê, analisando, para isso, a ação da ondulação incidente.

Modelo de propagação de ondas em águas rasas (OLUCA – SP)

Para o estudo de propagação de ondas em águas rasas foi utilizado o modelo OLUCA-SP, cujo código é baseado no modelo REF-DIF, desenvolvido por Jim Kirby e Tony Dalrymple na Universidade de Delaware (KIRBY; DALRYMPLE, 1983).

O OLUCA-SP é um modelo espectral não dispersivo que resolve a fase (MRF) mediante a aproximação parabólica da Equação da Declividade Suave (Mild Slope Equation). Requer como entrada no contorno exterior um estado de mar direcional, representado por um espectro bidimensional discretizado em componentes freqüenciais e direcionais, que são propagadas de maneira simultânea.

O modelo discretiza o espectro de entrada fora da costa em um número de seções de energia, às quais se associam componentes de ondas com amplitude, freqüência e direção. A propagação de cada componente de energia permite, mediante superposição linear, obter as características estatísticas do espectro em cada ponto do domínio modelado.

Batimetrias

Os dados de profundidade foram obtidos a partir da digitalização das cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) disponíveis para a região. Para a área interna da baía e plataforma continental adjacente foram utilizadas as cartas número 1902, 1810 e 23300, suficientes para a representação do relevo do fundo e incorporação no domínio computacional do modelo de propagação de ondas.

Grades de cálculo

Para propagar as distintas direções das ondulações provenientes de águas profundas, foram utilizadas seis grades de cálculo: as grades A1, A2 e A3 foram utilizadas para propagar as ondulações procedentes de ENE, E e ESE; as grades B1, B2 e B3 foram utilizadas para propagar as ondulações provenientes de SE e SSE.

As grades foram configuradas seguindo o procedimento de acoplamento, no qual se definem dois domínios de aproximação de águas profundas a intermediárias, com menor resolução espacial, e um de detalhe, no qual a ondulação se propaga para o interior da Enseada de Porto Belo. Os resultados das grades de aproximação fornecem as condições de contorno para as grades de detalhe.

A resolução espacial das grades de cálculo foi o melhor ajuste entre os objetivos do projeto (caracterização dos estados de mar médios e extremos na Praia de Perequê), os recursos computacionais disponíveis e o tempo de processamento necessário.

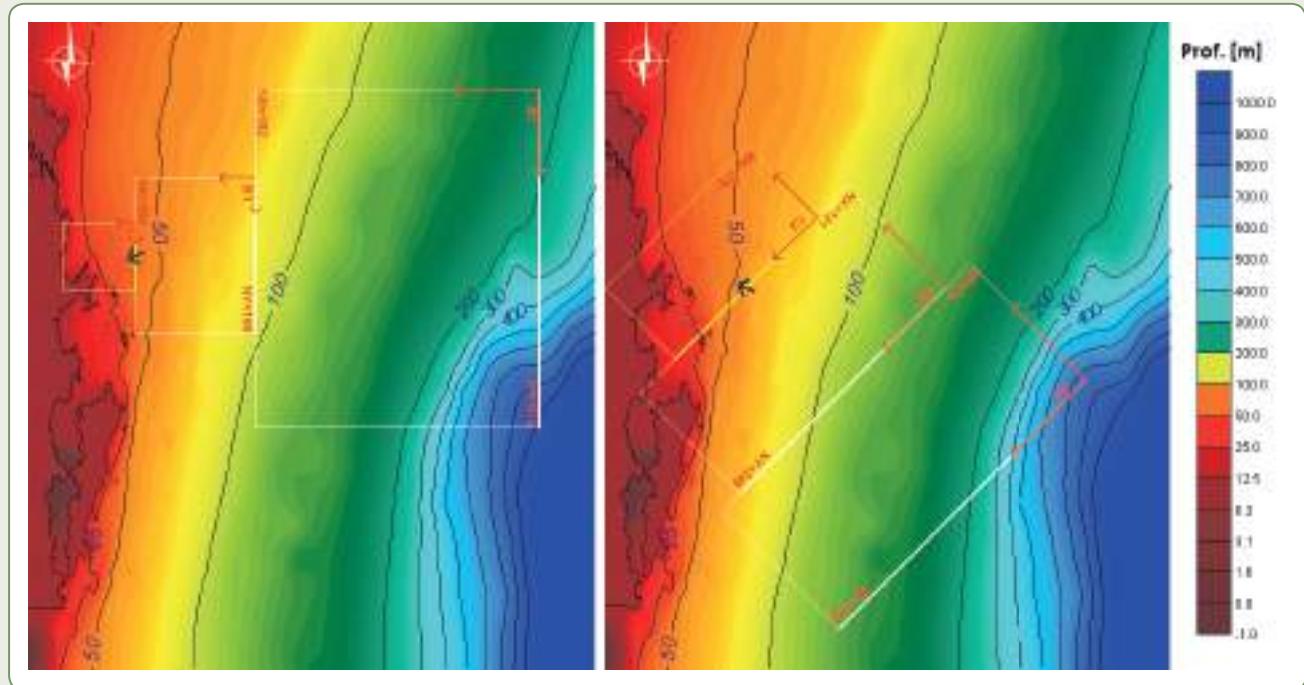
No Quadro 12.2 são apresentadas as características gerais das grades de cálculo e, na Figura 12.5, a disposição delas sobre a base batimétrica.

Quadro 12.2 – Características das grades de propagação de ondas

GRADE	ORIGEM	RUMO	DIMENSÕES (m)	RESOLUÇÃO (m)
Grade A1 – águas profundas	X: 854871 Y: 7043003	E	X: 72400 Y: 86000	400 x 400
Grade A2 – águas intermediárias	X: 782471 Y: 7020603	E	X: 30200 Y: 39600	200 x 200
Grade A3 – detalhe	X: 752271 Y: 7009203	E	X: 18800 Y: 17000	100 x 100
Grade B1 – águas profundas	X: 847765 Y: 6968846	SE	X: 42000 Y: 89400	600 x 600
Grade B2 – águas intermediárias	X: 812127 Y: 6992605	SE	X: 36000 Y: 74400	300 x 300
Grade B3 – detalhe	X: 779034 Y: 7010424	SE	X: 25530 Y: 51000	150 x 150

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 12.5 – Limites das grades de cálculo A1, A2 e A3, utilizadas para as propagações dos estados de mar provenientes de ENE, E e ESE (painel esquerdo), e B1, B2 e B3, utilizadas para as propagações dos estados de mar provenientes de SE e SSE (painel direito)



Fonte: Dos autores (2018).

Casos propagados

A partir da análise dos dados de ondas em águas profundas, foram selecionados os estados de mar mais significativos para a área de estudo, divididos em casos médios e casos extremos.

O modelo OLUCA-SP permite a propagação de um espectro direcional de ondas, definido pela altura significativa, período de pico, forma espectral e função de dispersão angular. Para o caso em estudo, foram propagados espectros TMA (BOUWS et al., 1985), para os quais se aplica a função de dispersão angular proposta por Borgman (1984). Cada espectro propagado fica definido por cinco parâmetros:

- H_s : altura significativa de onda, referente à altura do momento de ordem zero do espectro;
- T_p : período de pico;
- θ_m : direção média;
- γ : fator de agudeza;
- σ_θ : parâmetro de dispersão angular. Define a forma do espectro: $\sigma_\theta \sim 10^\circ$ equivale a um espectro de banda estreita (com componentes entre +/- 30°); e $\sigma_\theta \sim 30^\circ$, a um espectro de banda larga (com componentes entre +/- 80° de direção).

No Quadro 12.3 são apresentados os parâmetros de onda utilizados nas propagações dos estados de mar médios ($H_{s50\%}$: altura significativa de onda superada 50% do tempo).

No Quadro 12.4 são apresentados os parâmetros de onda utilizados nas propagações dos estados de mar extremos para a região (H_{S12} : altura de onda superada 12 horas ao ano, ou com probabilidade de superação 0,99863).

Quadro 12.3 – Parâmetros de onda utilizados nas propagações dos estados de mar médios ($H_{S50\%}$)

Caso	θ_m	$H_{S50\%}$	T_p	γ	σ_θ
M1	ENE	1,5	7	3	20
M2	E	1,5	7	4	15
M3	ESE	1,6	7	4	15
M4	SE	1,7	9	4	15
M5	SSE	1,8	9	6	15

Fonte: Dos autores (2018).

Quadro 12.4 – Parâmetros de onda utilizados nas propagações dos estados de mar extremos (H_{S12})

Caso	θ_m	H_{S12}	T_p	γ	σ_θ
E1	ENE	4,2	9	6	15
E2	E	4,2	10	6	15
E3	ESE	4,3	12	6	15
E4	SE	4,7	14	8	10
E5	SSE	5,0	15	8	10

Fonte: Dos autores (2018).

Na Figura 12.6 são apresentados os espectros de energia bidimensionais utilizados como condição de contorno no modelo OLUCA-SP.

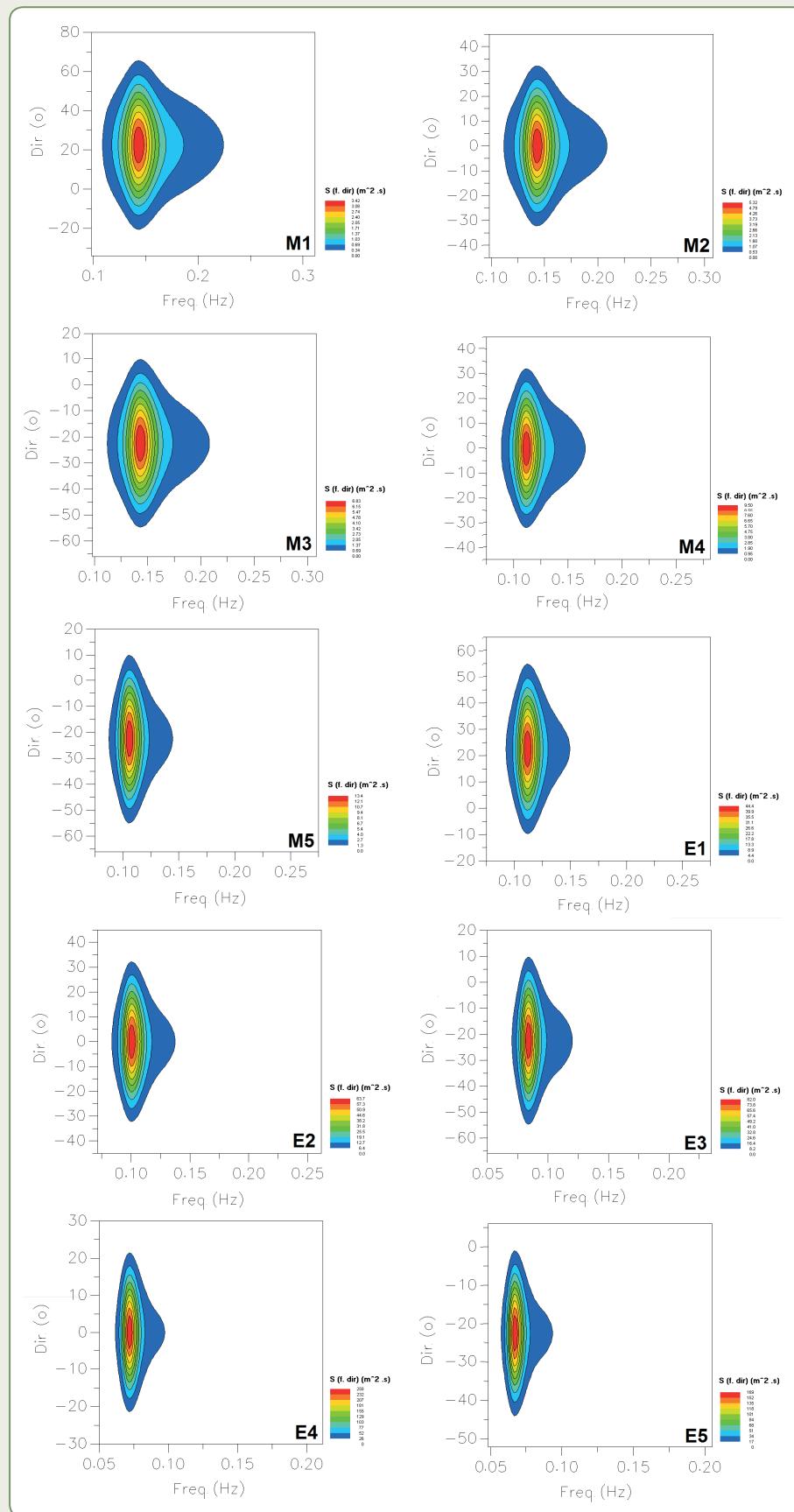
Resultados das propagações

Na Figura 12.7 são apresentados os contornos de altura significativa de onda e a direção média para os estados de mar médios propagados (M1 ao M5).

Na Figura 12.8 são apresentados os contornos de altura significativa de onda e a direção média para os casos extremos propagados (E1 ao E5).

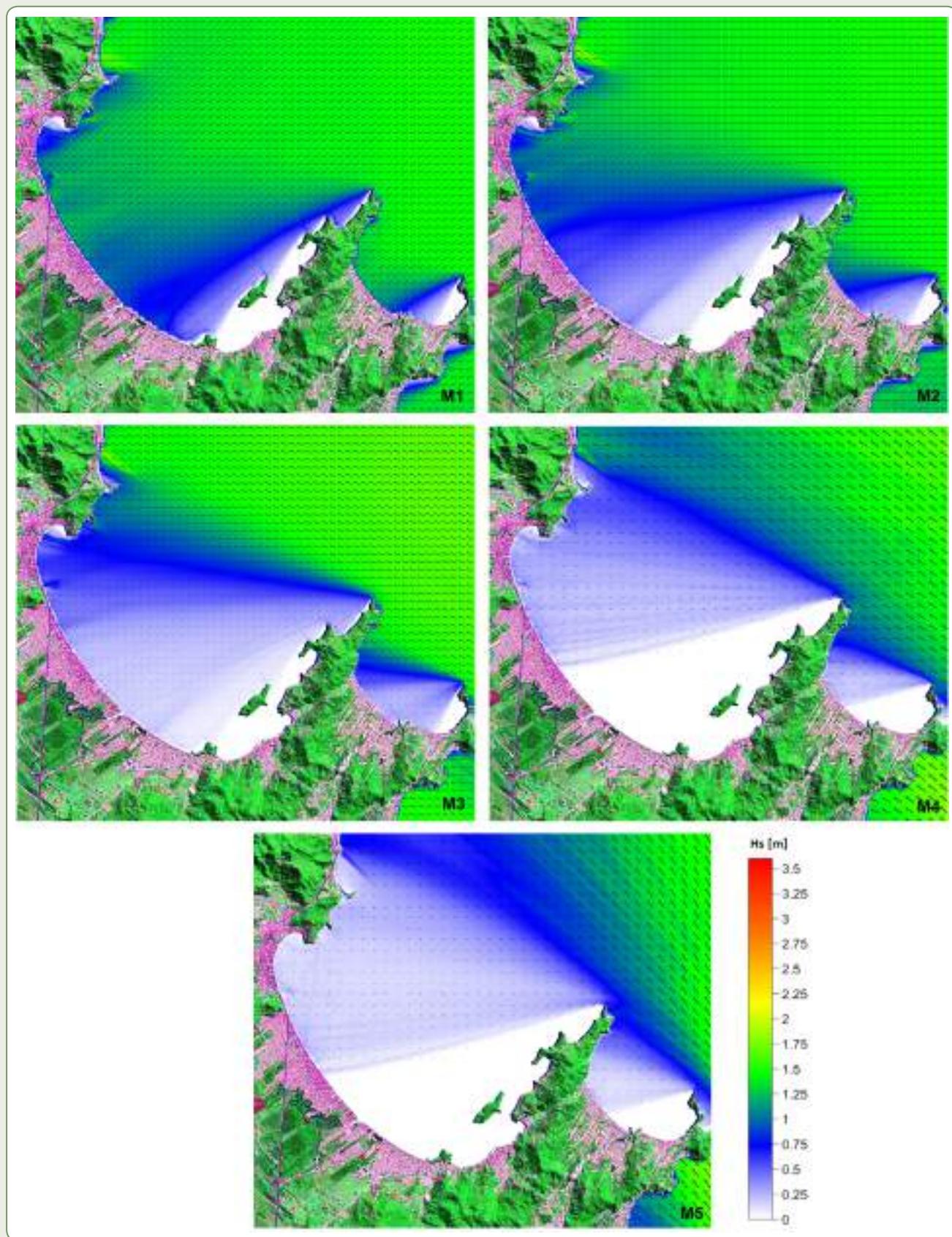
Os resultados são apresentados na grade de detalhe, projetados sobre a imagem de satélite da região.

Figura 12.6 – Espectros de energia bidimensionais utilizados como condição de contorno no modelo OLUC-SP



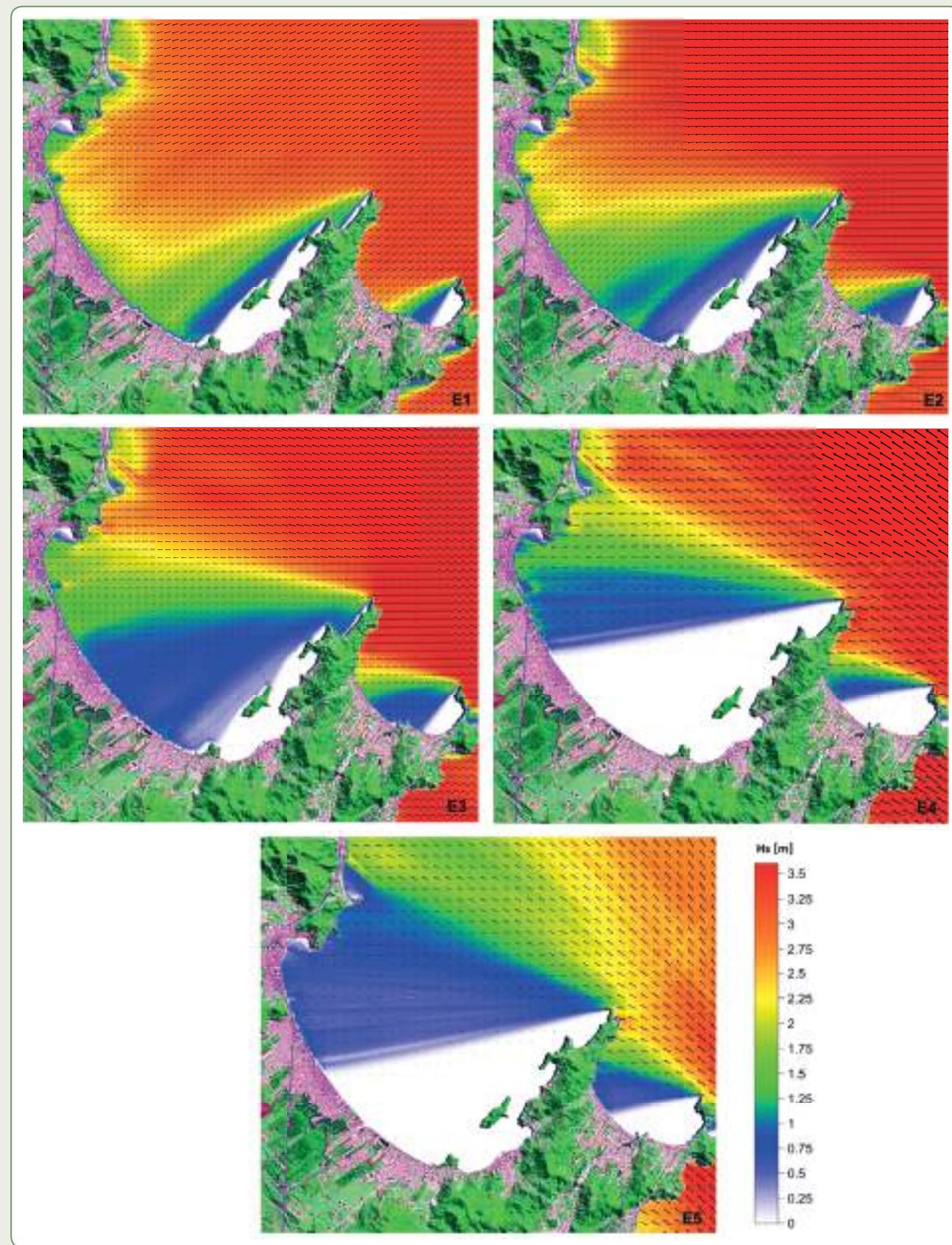
Fonte: Dos autores (2018).

Figura 12.7 – Altura significativa de onda (H_s) e direção média (Dir_m) nas proximidades da Praia de Perequê, para os estados de mar médios



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 12.8 – Altura significativa de onda (H_s) e direção média (Dir_m) nas proximidades da Praia de Perequê, para os estados de mar extremos



Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados das propagações com o modelo OLUCA-SP mostram que a Ponta de Porto Belo exerce um papel preponderante no controle do padrão de propagação das ondas no interior da enseada e posterior incidência na costa, criando uma grande zona de sombra na extremidade sul.

Independentemente da direção de propagação original em águas profundas, maiores alturas de onda são encontradas na porção norte da enseada. Gradientes de altura de onda são claramente estabelecidos em função dos processos de refração e difração nos promontórios rochosos existentes no sul e norte da enseada.

A porção sul, na qual está localizada a Praia de Perequê, está muito mais abrigada da ação das ondas que a porção central e norte da enseada.

Devido à orientação da enseada, ondas provenientes de ENE e E são as que atingem a costa com maior energia. Ondulações de SE e SSE chegam à Praia de Perequê com altura significativa quase nula.

Circulação gerada pela quebra de ondas na Praia de Perequê

As correntes geradas na zona de arrebentação são, normalmente, a força dominante no transporte de sedimentos em áreas pouco profundas. O conhecimento da dinâmica de uma praia é fortemente condicionado por essas correntes.

Como regra geral, a quebra das ondas gera correntes, fundamentalmente paralelas à praia, que são função do ângulo com que a ondulação atinge a costa (correntes de incidência oblíqua) e do gradiente de altura de onda ao longo da praia. Essas correntes, denominadas correntes longitudinais, são de especial importância na disposição de equilíbrio de uma praia e, mais especificamente, em sua forma em planta, dada sua importante capacidade de transporte de sedimentos.

As correntes longitudinais são geradas na zona de arrebentação e, portanto, em uma região onde os sedimentos se encontram em suspensão (pela própria ação da quebra das ondas), sendo facilmente transportado pelas correntes.

Desse modo, para que uma determinada forma em planta esteja em equilíbrio, é necessário que ou bem não existam correntes longitudinais ou bem que, ainda existindo, o gradiente de transporte gerado por estas seja nulo (a areia que é erodida em uma região é substituída pela areia de outra, de modo que se estabeleça um circuito fechado).

Modelo de correntes em praias (COPLA)

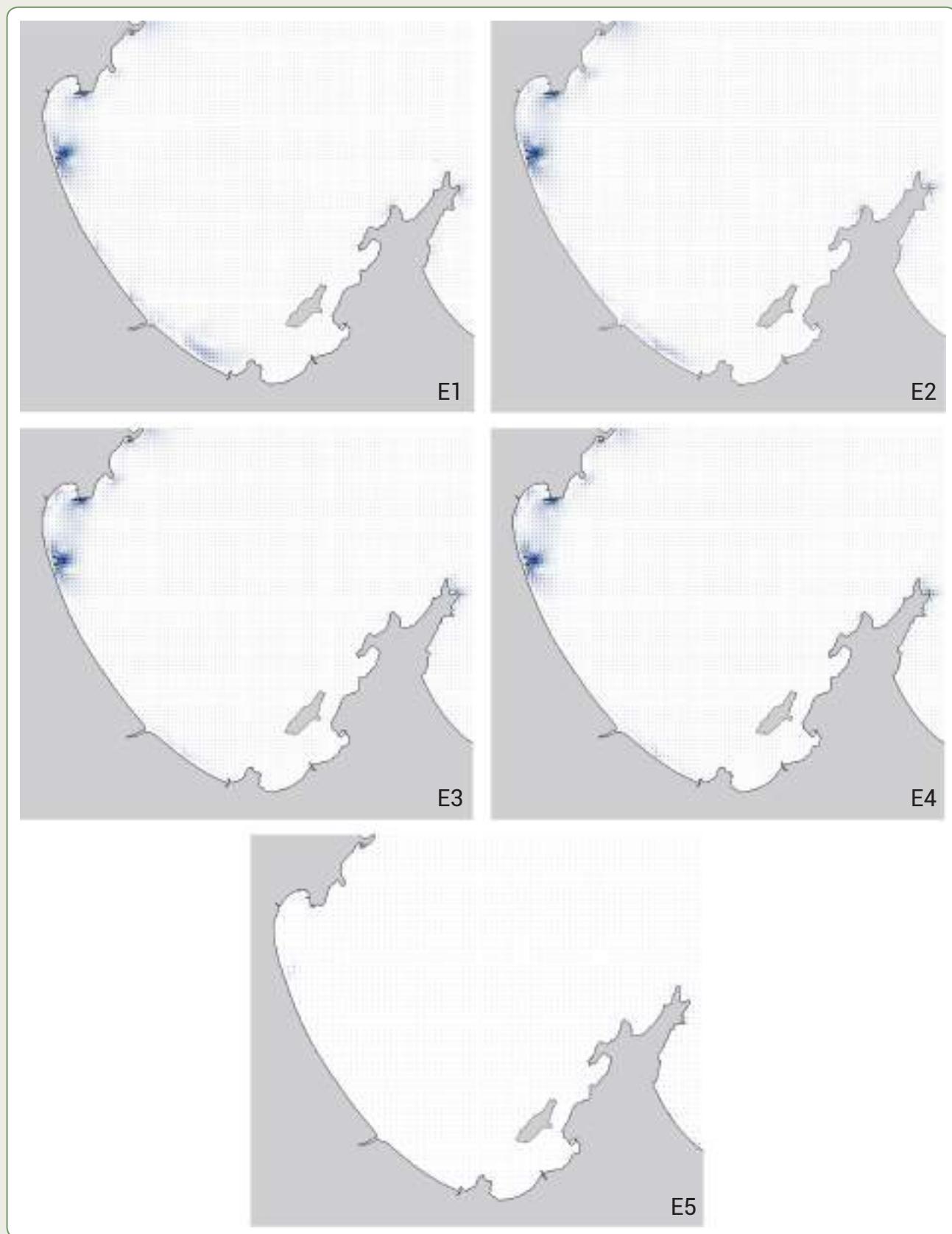
Para o cálculo das correntes geradas na zona de arrebentação, foi utilizado o COPLA-SP, modelo de correntes em praias, induzidas pela quebra de uma ondulação espectral. Esse modelo é aplicável em uma análise de curto prazo, considerando um único evento ou estado de mar.

O COPLA-SP resolve numericamente as equações do movimento promediadas no período da onda e na vertical. Calcula as variações dos tensores de radiação como agentes impulsores das correntes a partir dos resultados do programa OLUCA-SP.

Padrão de correntes na Praia de Perequê

O cálculo das correntes induzidas pela quebra de ondas foi realizado para os casos extremos propagados. Na Figura 12.9 são apresentados os campos vetoriais de circulação e intensidade das correntes para os estados de mar E1, E2, E3, E4 e E5.

Figura 12.9 – Circulação induzida pela quebra de ondas para os casos extremos propagados (E1 ao E5)



Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados do modelo de circulação induzida pela quebra de ondas mostram que as maiores intensidades ocorrem nas proximidades do Parcel do Morrete, alcançando valores de até 0,25 m/s. A quebra de ondas no parcel gera duas células de circulação; a primeira gira em sentido horário e origina uma corrente que flui para norte. A segunda, com giro em sentido anti-horário, parte desse ponto e flui para sul, em direção à Praia de Perequê.

Na Praia de Perequê, as correntes na zona de arrebentação são mais intensas para as ondulações provenientes de ENE. Para todos os casos extremos propagados, foram observadas correntes inferiores a 0,1 m/s. Para os casos de ondas provenientes de SE e SSE, as correntes geradas pela quebra na Praia de Perequê são nulas.

As baixas intensidades das correntes na zona de arrebentação podem ser atribuídas, em primeiro lugar, à orientação e forma da enseada (abrigada das ondas mais energéticas de águas profundas, provenientes de S) e, em segundo lugar, ao equilíbrio existente entre as correntes geradas pela incidência oblíqua e pelo gradiente de altura de onda, que numa praia de enseada próxima do estado de equilíbrio estático tendem a se anular.

ANÁLISE MORFODINÂMICA DE LONGO PRAZO

O estudo da forma em planta e perfil de praia na escala de longo prazo (anos, décadas), está fundamentado na hipótese de equilíbrio. Essa hipótese sustenta que uma praia com um tamanho de grão definido, submetida a uma solicitação ou dinâmica atuante constante, desenvolverá uma configuração (planta e perfil) que não evoluirá com o tempo (MEDINA et al., 1995). Existem diversas formulações que permitem estimar a forma em planta de equilíbrio, por exemplo, Silvester (1970), Garau (1981) e Hsu e Evans (1989), ou o perfil de equilíbrio, por exemplo, Dean (1977), Vellinga (1982) e Larson (1991).

O objetivo da análise de longo prazo é determinar qual será a forma final da praia (planta-perfil) e/ou a evolução temporal dessa forma na escala de anos, a fim de assegurar que a funcionalidade da praia se mantenha durante a sua vida útil (no caso de intervenções de engenharia). As formulações existentes para essa escala de tempo não tentam analisar os processos, mas as magnitudes agregadas a eles.

Perfil de equilíbrio

O perfil de equilíbrio pode ser definido como a resultante do balanço entre forças construtivas e destrutivas que ocorre em condições de ondulação estacionária, para um sedimento em particular. O perfil de equilíbrio é um conceito teórico que unicamente será possível alcançar em laboratório, onde as condições são controladas. No entanto, conforme indicado por González (1995), as variações dos parâmetros hidrodinâmicos e sedimentológicos em uma praia estão restritos a uma gama de valores conhecidos, de modo que a variabilidade do perfil está limitada. Desse modo, existe uma morfologia do perfil de praia que se apresentará com maior frequência, estado modal do perfil de praia, e que se considera como o perfil de equilíbrio dinâmico dela.

A definição do perfil de equilíbrio de uma praia exige a determinação: 1) da forma do perfil de equilíbrio e 2) da profundidade de fechamento, explicada em detalhe posteriormente.

As aplicações desse “perfil de equilíbrio” são múltiplas, destacando-se sua utilização em obras de engordamento e restauração de praias e em múltiplos modelos matemáticos e conceituais que devem supor uma configuração prévia da morfologia do perfil de praia. O perfil de equilíbrio é utilizado, junto com a planta de equilíbrio, na cubicação do volume de areia necessário em um engordamento de praia ou no dimensionamento do comprimento e das cotas de obras de proteção do litoral, tais como espiões de contenção de areias ou quebra-mares destacados.

Historicamente foram propostos diferentes modelos de perfil de equilíbrio, sendo o perfil parabólico de Bruun (1962) um dos mais conhecidos, o qual foi posteriormente melhorado por Dean (1991).

Profundidade-limite do perfil ativo

Naturalmente, a partir de certa profundidade, o perfil de equilíbrio já não responde ativamente às ações da ondulação incidente, definindo-se uma profundidade a partir da qual o transporte de sedimentos transversal e longitudinal não tem magnitude apreciável. Essa profundidade é conhecida como *profundidade de fechamento*, ou *profundidade-limite do perfil ativo*, e pode ser estimada pela expressão:

$$h^* = 1,75Hs_{12} - 57,9 \left(\frac{Hs_{12}^2}{gTs^2} \right) \quad \text{proposta por Birkemeier (1985), ou:} \quad (\text{Eq. 12.1})$$

$$h^* = 2,28Hs_{12} - 68,5 \left(\frac{Hs_{12}^2}{gTs^2} \right) \quad \text{proposta por Hallermeier (1981),} \quad (\text{Eq. 12.2})$$

onde:

$$\begin{aligned} H_{s12} &= \text{altura significativa local que é excedida 12 horas ao ano;} \\ T_s &= \text{período significativo associado à } H_{s12}. \end{aligned}$$

Regra de Bruun

Bruun (1962), baseado no conceito de evolução de longo prazo, propôs um modelo para variação do perfil de praia em decorrência de uma subida do nível relativo do mar.

Segundo o autor, uma vez estabelecido o perfil de equilíbrio dinâmico na zona litorânea, a elevação subsequente do nível do mar perturbará esse equilíbrio, que será restaurado mediante a translação do perfil rumo ao continente. Em consequência, o prisma de praia irá sofrer erosão e o material erodido será transferido e depositado na antepraia. Essa transferência provocará uma elevação do leito da antepraia, de magnitude igual à elevação sofrida pelo nível do mar, mantendo-se constante a altura da lámina d’água. Embora a Regra de Bruun tenha sido proposta para a fase de subida do nível do mar, o mesmo princípio parece ser válido também para a situação inversa, isto é, o equilíbrio desfeito deverá ser restaurado também quando ocorre uma descida do nível do mar.

Bruun considera em seu modelo que a costa apresenta comprimento infinito e neutralidade no movimento longitudinal do material, mantendo as formas geométricas da praia seca e do perfil submerso, que variam unicamente em função da ação das ondas, das marés e do aumento do nível do mar. Desse modo, o autor admite que o ângulo de incidência das ondas não influencia a geometria do perfil. Segundo a Lei de Bruun, o recuo da linha de costa em função de uma elevação do nível do mar em praias arenosas pode ser estimado com base na aplicação da seguinte equação:

$$R = \frac{SL}{H} \quad (\text{Eq. 12.3})$$

onde:

R = recuo da linha de costa devido ao aumento relativo do nível do mar;

S = elevação do nível relativo do mar;

L = comprimento do perfil ativo;

H = altura do perfil ativo.

Ainda que a Regra de Bruun assuma uma série de hipóteses simplificadoras, pode ser utilizada para o entendimento de problemas de erosão em ambientes que possuem determinadas características morfodinâmicas, principalmente os que funcionam como sistema fechado de balanço sedimentar e que possuem pouco transporte longitudinal de sedimentos.

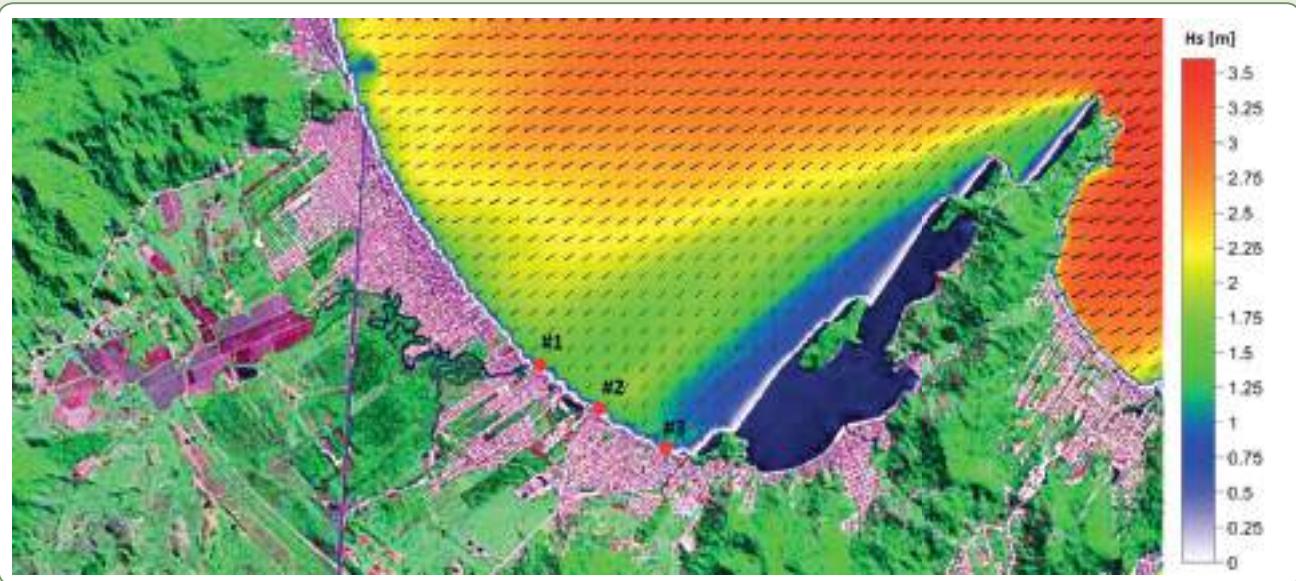
Estimativa da profundidade de fechamento na Praia de Perequê

Na ausência de dados históricos de perfis medidos na Praia de Perequê, optou-se por assumir que o perfil da praia se ajusta a um perfil teórico de Dean (1991) e que a profundidade de fechamento poderá ser determinada pelas equações acima descritas, considerando para tal os parâmetros de onda resultantes da propagação temporal anual proveniente de ENE e E (mais energéticos para a área de estudo).

A localização dos perfis teóricos analisados para a Praia de Perequê é apresentada na Figura 12.10.

O objetivo desta análise foi o de identificar, a partir dessas formulações, a largura do perfil ativo e, a partir de uma análise das feições morfológicas e da batimetria, inferir sobre a possibilidade de existência de transpasse de sedimentos através do promontório rochoso que delimita a porção sul da praia (Ponta do Vieira).

Figura 12.10 – Localização dos perfis teóricos estimados para a Praia de Perequê



Fonte: Dos autores (2018).

Os dados de entrada e os resultados obtidos são apresentados nos quadros 12.5 e 12.6, utilizando a formulação de Hallermeier (1981) e Birkemeier (1985), respectivamente.

Quadro 12.5 – Dados de entrada e resultados obtidos a partir da utilização da formulação de Hallermeier (1981)

#	Dados de entrada			Dados de saída	
	H_{s12} (m)	T (s)	d_{50} (mm)	H^* (m)	Largura do perfil de praia ativo (m)
1	1,5	9	0,13	3,2	260
2	1,0	9	0,13	2,2	145
3	0,75	9	0,13	1,6	96

Fonte: Dos autores (2018).

Quadro 12.6 – Dados de entrada e resultados obtidos a partir da utilização da formulação de Birkemeier (1985)

#	Dados de entrada			Dados de saída	
	H_{s12} (m)	T (s)	d_{50} (mm)	H^* (m)	Largura do perfil de praia ativo (m)
1	1,5	9	0,13	2,4	173
2	1,0	9	0,13	1,6	97
3	0,75	9	0,13	1,3	64

Fonte: Dos autores (2018).

De acordo com as hipóteses assumidas e formulações utilizadas, a largura e a profundidade-limite do perfil ativo teórico #3, localizado mais a sul, indicam a ausência de transpasse de sedimentos pela extremidade do promontório rochoso, uma vez que este possui aproximadamente 380 m de comprimento (a partir da praia) e profundidades adjacentes superiores a 2,0 m.

Estudo da forma em planta de equilíbrio da Praia de Perequê

Nessa etapa do estudo procurou-se caracterizar a morfologia e a estabilidade atual da Praia de Perequê em uma escala temporal de longo prazo. Para tanto, foi analisada a forma em planta de equilíbrio e, como resultado, estabeleceu-se um modelo de funcionamento morfodinâmico que serve de base para o entendimento dos processos atuantes na região e que dá os subsídios para a proposição de alternativas para solucionar o problema da praia.

Será exposto, em primeiro lugar, o modelo teórico-conceitual utilizado para a análise da forma em planta e, posteriormente, sua aplicação à praia estudada (ou uma variante do modelo, no caso de a realidade não se ajustar às hipóteses teóricas).

Forma em planta de equilíbrio de praias de enseada

Os modelos de forma em planta de equilíbrio de praias de enseada definem a forma da linha de costa em função das características médias das ondas incidentes. São modelos empíricos que com pouca informação sobre a dinâmica marinha permitem prever a linha de costa de equilíbrio e, portanto, são de grande utilidade em estudos de engenharia costeira e especificamente no desenho de praias. Neste trabalho será feito uso da metodologia de González e Medina (2002), baseada no modelo parabólico de Hsu e Evans (1989).

Ajuste da forma em planta de equilíbrio para a Praia de Perequê

Com base na concepção de estabilidade da forma em planta da praia, pode-se classificar as praias de enseada em três principais estados:

- 1) equilíbrio estático,
- 2) equilíbrio dinâmico e
- 3) instável.

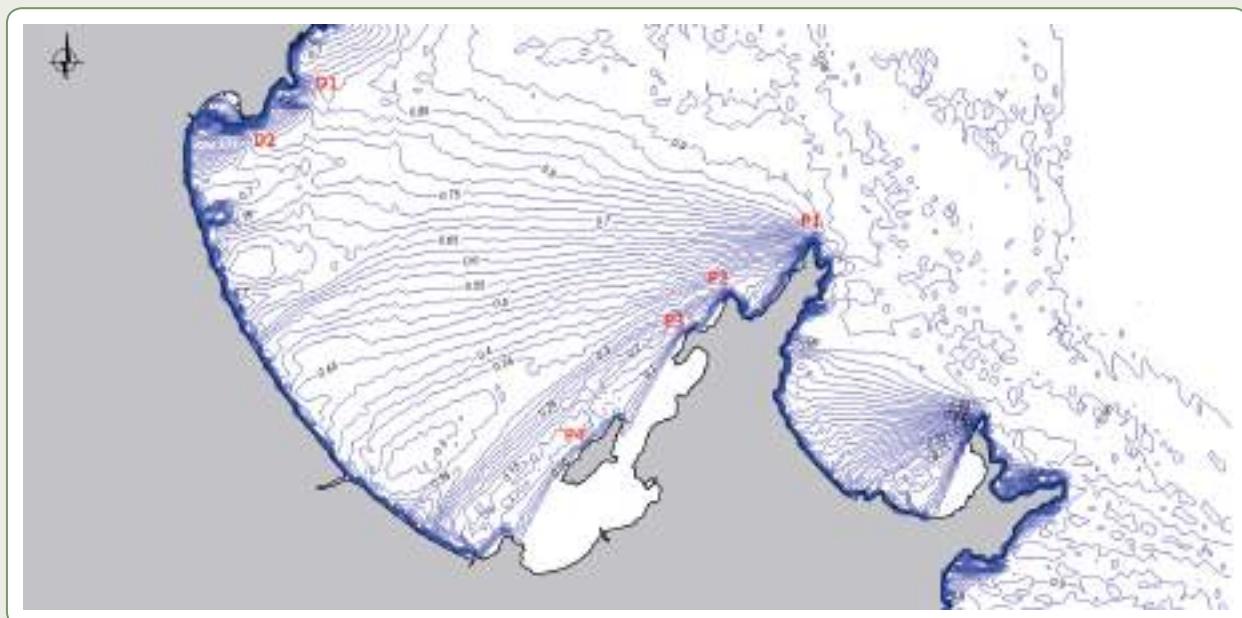
A forma modelada usando a equação parabólica coincide com a forma de praias em equilíbrio estático. No caso de praias em equilíbrio dinâmico, a linha de costa real tende a estar situada adiante (em direção ao mar) da linha de costa modelada. No caso de praias instáveis, a linha de costa real tende a estar situada atrás (em direção a terra) da linha de costa proposta pelo modelo. Seguindo essa linha de pensamento, a equação parabólica proposta pode ser de grande utilidade para classificar a estabilidade da praia estudada.

Na presente seção é apresentado o procedimento de ajuste do modelo parabólico à Praia de Perequê, realizado com o objetivo de verificar sua estabilidade em planta.

Os pontos de controle para o ajuste da parábola foram definidos a partir das isolinhas de altura significativa de onda que, sob o efeito dos processos de difração, se dispõem em sentido transversal à costa. Com esse propósito, foi utilizado o resultado da propagação de ondas de ENE, conforme

apresentado na Figura 12.11. Quatro principais pontos de difração foram identificados na extremidade sul da Praia de Perequê (P1 a P4) e dois na extremidade norte (D1 e D2).

Figura 12.11 – Isolinhas de altura de onda utilizadas para identificar quatro principais pontos de difração existentes na extremidade sul da Praia de Perequê e dois na extremidade norte



Fonte: Dos autores (2018).

Pelo fato de terem sido identificados diversos pontos de difração, a análise foi realizada a partir do ajuste de múltiplas parábolas. O resultado final desse processo é apresentado na Figura 12.12.

Figura 12.12 – Ajuste de modelos parabólicos utilizando múltiplos pontos de difração localizados nas extremidades norte e sul da Enseada de Porto Belo



Legenda: As linhas amarela, vermelha e azul representam os três compartimentos de praia estabelecidos a partir de diferentes elementos governantes

Fonte: Dos autores (2018).

As praias localizadas no interior da Enseada de Porto Belo foram divididas em três compartimentos (linhas amarela, vermelha e azul na Figura 12.12), cujas formas em planta possuem diferentes elementos governantes. O compartimento 1 da praia possui morfologia influenciada principalmente pelos dois pontos de difração existentes na extremidade norte (Ponta da Palhoça e Ponta de Itapema). O compartimento 2 está sob influência direta dos quatro principais pontos de difração existentes na extremidade sul (Ponta de Porto Belo, Ponta do Estaleiro, Ponta de Lopes e Ilha João da Cunha). A divisão desses dois setores ocorre nas proximidades do Parcel do Morrete.

O terceiro compartimento identificado no interior da enseada está situado entre a Ponta do Vieira e a Ponta do Araújo e é composto pela Praia de Porto Belo. A morfologia da praia no interior desse compartimento, caracterizada pela forma saliente, apresenta influência direta da difração das ondas na Ilha João da Cunha e Ponta do Araújo.

Os resultados alcançados mostram que o modelo parabólico de Hsu e Evans (1989), com múltiplos pontos de difração, se ajusta bem à forma em planta das praias localizadas no interior da Enseada de Porto Belo, indicando, assim, que as praias possuem forma em planta em estado de equilíbrio estático, ou muito próxima do equilíbrio.

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste documento foram apresentados os procedimentos de implementação e os resultados dos modelos matemáticos de geração de dados de ondas em águas profundas, propagação de ondas em águas rasas e circulação na zona de arrebentação, bem como dos modelos empíricos utilizados para análise da forma em planta e estimativa do perfil de equilíbrio da Praia de Perequê, município de Porto Belo (SC), utilizados com o objetivo de compreender os mecanismos de funcionamento morfodinâmico da praia e auxiliar na determinação das causas que originaram seu estado atual.

Os resultados das propagações com o modelo OLUC-SP mostraram que a Ponta de Porto Belo exerce um papel preponderante no padrão de propagação de ondas no interior da enseada, com incidência na costa, gerando uma grande zona de sombra na extremidade sul.

Independentemente da direção de propagação original em águas profundas, as ondas chegam com maiores alturas na porção norte da enseada. Gradientes de altura de onda ao longo da enseada são claramente estabelecidos em função dos processos de refração e difração que ocorrem nos promontórios rochosos do sul e norte.

Devido à orientação da enseada, ondas provenientes de ENE e E são as que atingem a costa com maior energia. Ondulações de SE e SSE chegam à Praia de Perequê com altura significativa quase nula.

Os resultados do modelo de circulação induzida pela quebra de ondas mostraram que as maiores intensidades de corrente ocorrem nas proximidades do Parcel do Morrete, com valores de até 0,25 m/s. A quebra de ondas no parcel gera duas células de circulação; a primeira gira em sentido horário e origina uma corrente que flui para norte; a segunda, com giro em sentido anti-horário, parte do parcel e flui para sul, em direção à Praia de Perequê.

Na Praia de Perequê, as correntes na zona de arrebentação são mais intensas para as ondulações provenientes de ENE. Para os casos analisados, foram observadas correntes com intensidades inferiores a 0,1 m/s. Para os casos de ondas provenientes de SE e SSE, as correntes geradas na zona de arrebentação são praticamente nulas.

As baixas intensidades das correntes na zona de arrebentação podem ser atribuídas, em primeiro lugar, à orientação e forma da enseada (abrigada das ondas mais energéticas provenientes de

S e SE) e, em segundo lugar, ao equilíbrio existente entre as correntes geradas pela incidência oblíqua e pelo gradiente de altura de onda, que numa praia de enseada próxima do estado de equilíbrio estático tendem a se anular.

Os resultados do ajuste do modelo parabólico de Hsu e Evans (1989) mostraram que a Praia de Perequê possui forma em planta em estado de equilíbrio estático, ou que está muito próxima do equilíbrio.

Se em planta a Praia de Perequê está em equilíbrio estático, pode-se assumir que as causas dos problemas atuais de ação do mar sobre as infraestruturas urbanas e a falta de uma faixa de areia desejável pelos usuários sejam causadas pela soma dos seguintes fatores:

- A incapacidade da praia de responder a mudanças de nível do mar na escala de curto, médio e longo prazo.
- O término das interações entre praia e duna.
- Durante eventos de tempestade, numa costa não urbanizada, a zona de arrebentação se alarga em direção a terra. Na Praia de Perequê, onde há muros e calçamento, esse alargamento em direção a terra não pode se desenvolver completamente, concentrando a energia dos processos da zona de arrebentação numa área confinada. Não havendo espaço suficiente para dissipação total da energia das ondas, estas atacarão diretamente as estruturas.

A reflexão de ondas nos muros de proteção gera efeitos de erosão ainda mais exacerbados, com retirada de material de suas bases. Como consequência, pode ocorrer a ruptura ou colapso.

Em essência, pelo fato de não existir aporte significativo de sedimentos, a saúde da Praia de Perequê depende de sua capacidade de mover-se em direção a terra em eventos de aumento do nível d'água por ação de tempestades ou variações do nível médio do mar (Regra de Bruun). Como a migração em direção a terra não é possível, os sedimentos da praia emersa são forçados a ocupar uma posição dentro da zona de surf que naturalmente não ocupariam. Como resultado, a praia não será capaz de atingir sua estabilidade em perfil.

Se na Praia de Perequê existem infraestruturas urbanas localizadas em uma área que, naturalmente, seria uma área ativa da praia e, por questões econômicas, não podem ser removidas, deve-se pensar em soluções de engenharia que lhe forneçam proteção (já que a opção de nada fazer não pode ser considerada). Essa proteção pode ser obtida através de técnicas de engordamento artificial de praia ou da combinação de engordamento com estruturas rígidas para estabilização da engorda, tais como quebra-mares costeiros e/ou espigões transversais, os quais diminuem a perda de sedimentos e aumentam a vida útil da obra. A escolha deve ser feita com base nos resultados de uma análise pormenorizada de funcionalidade, custo/benefício, impactos ambientais ligados a questões socioeconômicas, ecológicas e estéticas, assim como de influência nas áreas adjacentes.

Devido ao fato de a praia apresentar baixa dinâmica, é esperado que um engordamento de praia realizado com sedimento mais grosso que o nativo possa apresentar boa estabilidade e baixa perda. No entanto, somente após os resultados de uma busca de material de empréstimo e de um estudo detalhado de alternativas é que se poderá definir a melhor solução para a região.

REFERÊNCIAS

- BIRKEMEIER, A. W. Field data of seaward limit of profile change. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, Reston, Virginia: ASCE, v. 3, n. 3, 1985.
- BORGMAN, L. E. **Directional spectrum estimation for the S_{xy} gages**, technical report, Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Corp of Eng. Waterway Experiment Station, 1984. Technical report, U.S. Army Corp of Eng.
- BOUWS, E.; GUNTER, H.; ROSENTHAL, W.; VINCENT, C. L. Similarity of the Wind wave spectrum in finite water depth: 1 – Spectral Form; **Journal of Geophysical Research**, v. 90, C1, p. 975-986, 1985.
- BRUUN, P. Sea level rise as a cause of shore erosion. **Journal of Waterways and Harbors Division**, v. 88, p. 117-130, 1962.
- DEAN, R. G. Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. **Ocean Engineering**. Rep. n. 12, Dept. of Civil Eng., Univ. of Delaware. Newark, Delaware, 1977.
- DEAN, R. G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. **Journal of Coastal Research**, v. 7, n. 1, 1991.
- GARAU, C. Condicionantes de la estabilidad de playas. Análisis de la función polar de los salientes. **Revista de Obras Publicas**, v. 128, n. 3188, p. 29-48, 1981.
- GONZÁLEZ, E. M. **Morfología de playas en equilibrio: planta y perfil**. Tese. (Doutorado en Ingenieria Hidraulica) – Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente, Universidad de Cantabria, 1995.
- GONZÁLEZ, E. M.; MEDINA, R. A new methodology for the design of static equilibrium beaches and the application in nourishment Projects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 28., 2002. **Proceedings...** ASCE, v. 4, p. 3753-3764, 2002.
- HALLERMEIER, J. R. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**, New York: Elsevier, n. 4, p. 253-277, 1981.
- HSU, J. R-C.; EVANS, C. Parabolic bay shapes and applications. **Proc. Inst. Civil Engrs.**, Part 2, London, v. 87, p. 557-570, 1989.
- KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A. A parabolic equation for the combined refraction-diffraction of stokes waves by mildly-varying topography. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 136, p. 453-466, 1983.
- LARSON, M. Equilibrium profile of a beach with varying grain size. In: COASTAL SEDIMENTS, 1991. **Proceedings...** ASCE, p. 905-919, 1991.
- MEDINA, R.; LOSADA, I.; LOSADA, M. A.; VIDAL, C. Variabilidad de los perfiles de playa: forma y distribución granulométrica. **Ingenieria del Agua**, v. 2. Extraordinario: Proyectos y Construcción de Playas Artificiales y Regeneración de Playas, p. 133-142, 1995.
- SILVESTER, R. Growth of crenulated shaped bays to equilibrium. **Journal of Waterways and Harbours Division**, v. 96, WW2, p. 275-287, 1970.
- TOLMAN, H. **User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22**, U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2002, 133 p.
- VELLINGA, P. Beach and dune erosion during storm surges. **Coastal Engineering**, v. 6, p. 806-819, 1982.

ESTUDO DA DINÂMICA COSTEIRA E MODELO DE FUNCIONAMENTO DA REGIÃO SUL DA PRAIA DE PIÇARRAS (SC)

Laura Ribas de Almeida

Mauricio González

Antonio Henrique da Fontoura Klein

Omar Quetzalcóatl Gutiérrez

Rafael Sangoi Araujo

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre a dinâmica litoral e o funcionamento da Praia de Piçarras (litoral norte de SC, Brasil), mais especificamente da região sul da praia, onde os problemas de erosão são mais acentuados. Através da utilização da metodologia, da base de dados e dos modelos numéricos do SMC-Brasil, foi avaliada a dinâmica costeira a curto e longo prazo. Os resultados indicaram que o Parcel de Piçarras apresenta uma importante função controladora da dinâmica da praia: na região norte as correntes mudam de direção em função da ondulação incidente, porém em frente ao parcel as correntes perdem força e não seguem para sul, não fornecendo sedimento a essa parte da praia. Ao sul dessa praia há o Rio Piçarras, atualmente retificado e considerado com contribuições de sedimento insignificantes. A saída desse rio está fixada por dois guia-correntes, que impedem o transporte de sedimento de sul a norte. Devido a isso planteou-se a hipótese de que os motivos da grande taxa de erosão da região sul da Praia de Piçarras se deve à retificação e fixação da desembocadura do Rio Piçarras e do sistema de correntes, que não fornecem sedimento a essa região em nenhuma das condições avaliadas. Algumas intervenções foram realizadas na Praia de

Piçarras no ano de 2012/2013, com o intuito de conter a erosão dessa região. Essas intervenções foram avaliadas e concluiu-se que esse projeto de engenharia deveria ter outro desenho.

Palavras-chave: Erosão costeira. SMC-Brasil. Modelagem numérica.

INTRODUÇÃO

A Praia de Piçarras, localizada no litoral norte do estado de Santa Catarina, Brasil, é uma praia urbana com alta importância econômica para a região por seu uso turístico, porém, desde a década de 1980, apresenta problemas de perda de faixa de areia (KLEIN et al., 2009). Na região sul da praia foi identificada uma zona de erosão acentuada (ZEA) de 500 m de comprimento que apresenta uma taxa de erosão 50% maior que o restante da praia (ARAUJO et al., 2010). Nessa ZEA há momentos em que não há faixa de praia seca. Para tentar conter essa erosão, diversas medidas foram aplicadas, tal como a construção de espigões (1989, 1994) ou a engorda de praia (1999, 2008), porém sem sucesso a longo prazo (KLEIN et al., 2009). A última intervenção que pretendia solucionar esse problema ocorreu entre 2012 e 2013, com a construção de espigões transversais e engorda de praia conjuntamente.

Para solucionar problemas de erosão em uma praia, é essencial entender seu funcionamento. Esse entendimento necessita de dados da área, tais como o clima de ondas, correntes geradas por elas, características do sedimento da praia e batimetria de detalhe da região, a partir dos quais é possível aplicar modelos numéricos que simulem seu comportamento em diferentes escalas espaciais e temporais e prever as mudanças que provavelmente ocorrerão se, por exemplo, estruturas ou engordas de praia forem aplicadas.

O Sistema de Modelagem Costeira do Brasil (SMC-Brasil) é uma ferramenta que inclui um conjunto de metodologias e modelos numéricos que permite estudar os processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais ou de atuações humanas na costa. O SMC-Brasil também inclui bases de dados (ondas, nível do mar, batimetria e linha de costa) e ferramentas estatísticas, apoiando o desenvolvimento de estudos de casos reais na costa do Brasil.

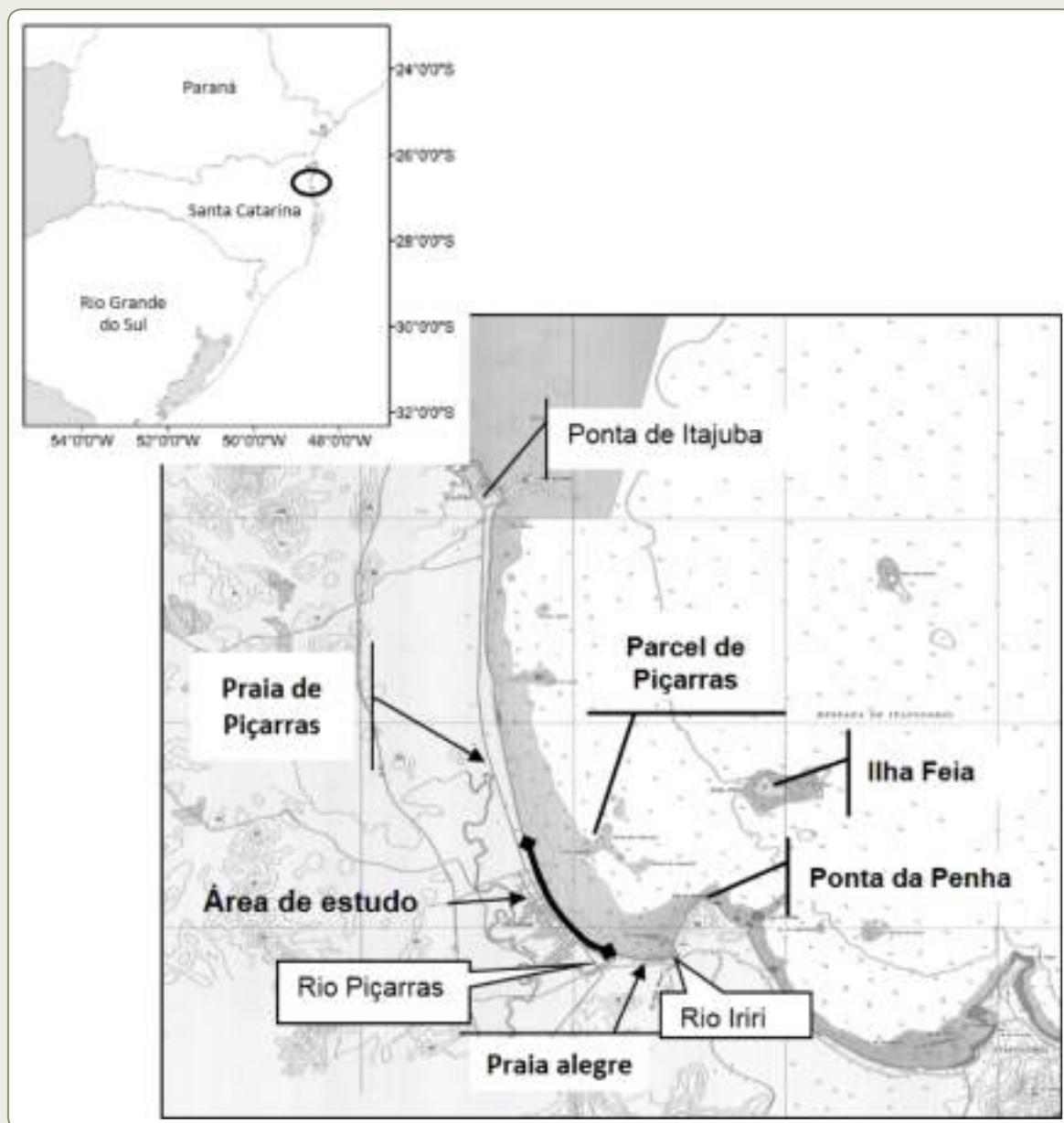
Devido à grande importância econômica da Praia de Piçarras, aos graves problemas erosivos e à falta de solução desses problemas, o presente trabalho apresenta o funcionamento morfodinâmico da região sul da Praia de Piçarras, obtido através da aplicação da metodologia, base de dados e modelos numéricos inseridos no SMC-Brasil, além de avaliar a intervenção de 2012/2013.

ÁREA DE ESTUDO

A Praia de Piçarras está inserida na Enseada do Itapocorói (latitude 26,7°S; longitude 48,6°W), que por sua vez está limitada ao norte pelo Promontório de Itajuba e ao sul pelo Costão da Penha. Além da Praia de Piçarras, que apresenta uma extensão de mais de 8,5 km, ao sul dessa enseada há outra pequena praia chamada Praia Alegre (Figura 13.1). As duas praias estão separadas pela desembocadura do Rio Piçarras, que está atualmente retificado com guia-correntes. Ao sul da Praia Alegre há a desembocadura do rio Iriri.

A Enseada do Itapocorói apresenta diversos elementos que influenciam na propagação das ondas e na circulação costeira da região (Figura 13.1), dentre os quais se pode destacar, para a área de estudo: a Ponta da Penha; a Ilha Feia e o Parcel de Piçarras.

Figura 13.1 – Localização da área de estudo (Praia de Piçarras, norte do estado de Santa Catarina), com os elementos morfológicos da Enseada do Itapocorói



Fonte: Modificado a partir da Carta Náutica nº 1809 (MARINHA DO BRASIL, 2012).

Em trabalho de Tessler (2010), modelaram-se as correntes da Enseada do Itapocorói e verificou-se que o padrão de fluxo hidrodinâmico forçado por ondas na Praia de Piçarras é preferencialmente de sul para norte ao longo da costa, porém com uma importante presença de correntes transversais à costa na área de estudo do presente trabalho.

A granulometria das praias pertencentes à Enseada do Itapocorói, analisada por Araujo (2008), tem como características uma areia fina na Praia Alegre (0,16-0,23 mm) e areia média na Praia de

Piçarras (0,25-0,44 mm). Através dessa análise, Araujo (2008) concluiu que o tamanho médio do sedimento entre as duas praias indica que não há trocas sedimentares entre elas. Indica também que há uma tendência de aumento natural do tamanho médio do sedimento em direção ao norte, que corrobora um aumento de exposição às ondas incidentes.

Em relação às fontes de sedimento, Hoefel (1998) e Paim (2012) citam que os rios que desembocam nessas praias (rios Piçarras e Iriri) são de planície costeira, pequenos, limitados a cotas inferiores a 200 m, com a maior parte de seu curso retificado, o que acarreta o transporte principalmente de sedimentos finos, que tendem a depositar-se ao longo da enseada. Sendo assim, neste trabalho considerou-se que nas últimas décadas a carga arenosa que poderia ser fonte de sedimento para as praias pode ser desprezada, tal como afirmado por INPH (1992). Porém, Araujo (2008) estudou a migração da desembocadura do Rio Piçarras através de ortofotos de 1938 a 2005 e afirma que nos anos 1930, quando essa desembocadura não apresentava praticamente influência humana, tinha a característica de migrar para o norte até que a competência do rio era superada pela das ondas e a desembocadura era fechada. À medida que aumentava a pluviosidade, o rio voltava a ter importância, causando o rompimento da barreira arenosa e abertura de um novo canal em um local mais ao sul. Esse mecanismo de ruptura da barreira arenosa permitia que o sedimento fosse imediatamente transferido para a zona norte da desembocadura, aportando areia para a praia adjacente e para o transporte pelas correntes. Essa dinâmica da desembocadura exercia um papel importante no balanço sedimentar da região sul da Praia de Piçarras, que foi modificado com sua retificação.

Projeto de recomposição da praia (2012/2013)

O último projeto de recomposição da região sul da Praia de Piçarras, executado entre 2012/2013, pode ser observado na Figura 13.2 (PREFEITURA DE PIÇARRAS, 2012a). Para avaliar seu funcionamento e eficácia, utilizaram-se os dados apresentados no projeto, pois no momento da realização do presente estudo não estavam disponíveis os dados da obra executada.

O projeto apresentado pela Prefeitura de Piçarras (2012a) tem a seguinte descrição: em uma primeira etapa, executada em princípios de 2012, foram construídos dois espiões em forma de T, que pretendiam, segundo os autores, reduzir o impacto das correntes costeiras sobre a praia, conter a areia que seria depositada em uma segunda etapa, além de, graças às pontas transversais dos espiões, diminuir a ação das ondas de tempestade (denominadas Ressaca) de nordeste (PREFEITURA DE PIÇARRAS, 2012b). Em uma segunda etapa, o projeto previa uma engorda de 2 km de praia, entre os espiões e a desembocadura do Rio Piçarras, com o objetivo de obter nessa área uma faixa de areia de praia seca de 60 m. O volume estimado de areia era de 785.989 m³ (PREFEITURA DE PIÇARRAS, 2012a).

Figura 13.2 – Apresentação do projeto de recomposição da Praia de Piçarras, executado entre 2012/2013, com construção de dois espiões em forma de T e engorda de praia



Legenda: As flechas cinza indicam a direção das correntes e as flechas brancas indicam a direção das ondas de tempestade, segundo os autores do projeto

Fonte: Prefeitura de Piçarras (2012b).

MATERIAIS E MÉTODOS

Dados utilizados

As avaliações e modelos numéricos a serem executados, com o objetivo de entender o funcionamento morfodinâmico da área de estudo, necessitam de dados básicos da área. Os utilizados no presente estudo estão apresentados a seguir.

Batimetria e linha de costa

Para que seja possível avaliar e modelar o comportamento da dinâmica costeira em uma região em concreto, é necessária uma batimetria de detalhe de boa qualidade, pois a propagação das ondas responde à morfologia do fundo marinho, sendo modificada por diferentes processos, como empinamento, refração, difração, reflexão e arrebentação.

Neste estudo foram utilizadas três bases de dados de batimetria: batimetria geral da região, obtida a partir da digitalização de cartas náuticas, disponível na base de dados do SMC-Brasil; batimetrias de detalhe, provenientes de estudos realizados em colaboração entre a Universidade do Vale do Itajaí

(UNIVALI) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), dos anos 2009 e 2011. A linha de costa das praias e costões da região estudada, sem a interversão do último projeto implementado, foi obtida do SMC-Brasil. Para a avaliação do projeto de recomposição utilizou-se uma nova linha de costa, com os espiões do projeto de contenção de erosão.

Ondas e nível do mar

Os dados utilizados para avaliação do clima de ondas e dinâmica costeira da região são provenientes da base de dados do SMC-Brasil, que contém espectros de ondas, com 60 anos de duração (de 1948 a 2008), resolução temporal de 1 hora e espacial de 1 km, gerados por reanálises, calibrados e validados. Os dados de nível do mar compreendem maré astronômica e maré meteorológica de séries de 60 anos reconstruídas, respectivamente através de análise harmônica e de reanálise, validadas. A metodologia de geração dessas bases de dados pode ser verificada nos documentos temáticos do SMC-Brasil de Ondas (BRASIL, 2018a) e de Nível do Mar (BRASIL, 2018b).

O ponto selecionado da base de dados do SMC-Brasil localiza-se em frente à Praia de Piçarras (lat. 26,7°S; long. 48,5°W; *World Geodetic System 1984 – WGS84*) a uma profundidade de 20 m (águas intermediárias), considerando que a partir dessa profundidade os elementos morfológicos influenciam significativamente a propagação dos espectros de ondas. Os outros pontos da base de dados próximos ao selecionado também foram avaliados e apresentaram variações insignificantes.

Metodologia

A metodologia para avaliação do funcionamento de uma praia em particular, proposta pelo SMC-Brasil (BRASIL, 2018c), baseia-se na avaliação de seu comportamento a curto prazo (de dias a meses), ou seja, seu comportamento em cenários particulares (condições médias e condições extremas); e de seu comportamento de equilíbrio, ou longo prazo (de anos a décadas), em função do clima de ondas atuante na região. A seguir apresentam-se os métodos e modelos utilizados no presente estudo.

Clima de ondas

O clima de ondas obtido no ponto da base de dados selecionado foi avaliado através de análises estatísticas executadas pelo SMC-Brasil, com o objetivo de entender a dinâmica da zona, definir as malhas dos modelos de propagação e os casos da avaliação a curto prazo.

Modelos de propagação

Os casos de ondulação espectral, tanto de curto como de longo prazo, foram propagados até a área de estudo através da aplicação do Modelo de Propagação de Onda Espectral (OLUCA-SP); as correntes induzidas pelas ondas foram avaliadas com o Modelo de Correntes (COPLA) (GONZÁLEZ et al., 2007), inseridos no SMC-Brasil. Considerando as limitações do modelo, as características do espectro de ondas e as características morfológicas do fundo marinho, utilizaram-se dois pares de malhas. Cada par de malhas está constituído por uma malha geral e uma malha de detalhe com

resolução de, respectivamente, 45 e 15 m entre nós. O par composto por malhas com orientação de 0-180° foi utilizado para a propagação de ondas provenientes de leste-nordeste (ENE), leste (E) e leste-sudeste (ESE) e as malhas com orientação de 15-195° foram utilizadas para a propagação de ondas provenientes de sudeste (SE).

Análise a curto prazo

Para caracterizar o comportamento das ondas na região estudada, a curto prazo, foram selecionados casos representativos de condições médias e de condições associadas a eventos de tempestade para as principais direções de ondulações atuantes na área, obtidos a partir da avaliação dos resultados de Clima de Ondas em águas intermediárias. Esses casos foram propagados em maré baixa e maré alta, com apresentação dos resultados de altura de onda significativa, sua direção e as correntes geradas na Enseada do Itapocorói.

Análise a longo prazo

Para a aplicação de modelos de avaliação a longo prazo, é necessário conhecer o clima de ondas, próximo à praia, para um período de tempo longo. A partir das ferramentas e metodologia do SMC-Brasil, é possível transferir a base de dados de 60 anos até o ponto desejado:

- 1) primeiramente se realiza uma seleção dos casos representativos a partir do método de Análise das Componentes Principais e do algoritmo de Máxima Dissimilaridade (MaxDiss);
- 2) tais casos são propagados até a praia usando os modelos apresentados anteriormente;
- 3) após a propagação dos casos, a base de dados é reconstruída mediante a técnica de interpolação *Radial Basis Functions* (RBF) (BRASIL, 2018a).

Os modelos de avaliação de longo prazo e as ferramentas estatísticas necessárias para avaliar a estabilidade e evolução de uma praia estão inseridos no SMC-Brasil e englobam modelos baseados na hipótese de equilíbrio (forma em planta e em perfil) e cálculo de transporte de sedimento médio anual para os 60 anos de dados.

O modelo de perfil de equilíbrio utilizado foi o de Dean (1977, 1991), aplicado em perfis obtidos a partir da batimetria interpolada, perpendiculares à linha de costa. A definição do limite do perfil ativo, até onde se considera que a equação do perfil de equilíbrio pode ser aplicada, chamada profundidade de fechamento (h^*), foi estimada pela equação de Hallermeier (1981) com os parâmetros obtidos da reconstrução do clima de ondas na praia. O melhor ajuste do parâmetro de forma A_D do perfil de equilíbrio foi obtido utilizando o Método de Mínimos Quadrados. A partir das equações propostas por Dean (1977) e dos valores obtidos do parâmetro de forma A_D , o tamanho médio de sedimento associado (D_{50}) foi estimado e comparado com o medido por Araujo (2008).

Para avaliar a forma em planta de equilíbrio, foram utilizadas a equação de Hsu e Evans (1989) e a metodologia de desenho de González e Medina (2001), com a determinação do ponto de controle, ou seja, o ponto que causa a difração das ondas e que determina a forma em planta, obtida através dos resultados das propagações; e a direção do fluxo médio de energia (dFME) das ondas, calculada utilizando a base de dados propagada até o ponto de controle, reconstruída, para os 60 anos de dados. Utilizando o módulo de Modelagem de Terreno do SMC foi possível ajustar a forma em planta.

Para o cálculo de transporte de sedimentos anual médio, com base nos 60 anos de dados de ondulações, foi usada a equação de CERC (1984), com constante dependente das características do

sedimento de Del Valle et al. (1993). A equação de CERC leva em consideração a altura, o ângulo e a profundidade de arrebentação das ondas, além das características do sedimento, porém não considera transporte causado por correntes geradas por gradiente de altura de ondas nem por transporte transversal. O transporte foi calculado para os mesmos perfis utilizados na avaliação dos perfis de equilíbrio. Salienta-se que os resultados obtidos devem ser interpretados de modo qualitativo, pois não há dados medidos suficientes que possam ser usados na calibração de tais valores de transporte.

Avaliação do Modelo Morfodinâmico de Funcionamento

Os processos morfodinâmicos que acontecem em uma praia são complexos, com ações e respostas essencialmente tridimensionais e de diferentes escalas temporais. Com o atual conhecimento e tecnologia disponível não é possível abordar o problema com um modelo único. Sendo assim, aproximações são realizadas, de acordo com cada processo, em curto e longo prazo e em planta e perfil, aplicando formulações específicas para cada dimensão e escala de interesse (BRASIL, 2018c). Porém, para definir a causa do problema de erosão de uma praia e propor soluções, é necessário entender o funcionamento de uma praia como um todo.

Dessa maneira, para propor um Modelo Morfodinâmico de Funcionamento da região sul da Praia de Piçarras, interpretou-se de maneira conjunta os resultados encontrados tanto a curto como a longo prazo, em planta e perfil. A partir desse modelo de funcionamento é possível desenvolver uma hipótese da causa do problema de erosão e interpretar o comportamento da praia frente a novas intervenções.

Para facilitar essa avaliação, a praia foi separada por setores, verificando a conectividade entre eles, que por sua vez foram definidos em função das características morfodinâmicas encontradas e estão apresentados nos resultados.

Avaliação do projeto de recomposição da praia

O projeto de recomposição da região sul da Praia de Piçarras, executado entre 2012 e 2013, foi avaliado em relação ao seu funcionamento e eficácia, considerando o Modelo Morfodinâmico de Funcionamento proposto por este estudo.

Com a ajuda do Sistema de Modelagem de Terreno do SMC-Brasil, foi gerada uma nova batimetria, utilizando as características apresentadas no projeto e parâmetros da engorda supostos, pois não puderam ser obtidos no momento da execução deste estudo, de: $D_{50} = 0,3 \text{ mm}$; $h^* = 3 \text{ m}$; perfil da praia de equilíbrio proposto por Dean (1977). A partir dessa nova batimetria foi calculado o volume necessário e comparado com o apresentado pela prefeitura de Piçarras, para verificar se os parâmetros de engorda supostos estavam corretos.

Para avaliar possíveis mudanças na dinâmica costeira, os mesmos casos de espectro de ondas associados a condições médias e a eventos de tempestade foram propagados, a partir da nova batimetria com a engorda e os espiões. Sua estabilidade a longo prazo foi avaliada mediante o uso dos modelos de equilíbrio das formas em planta e em perfil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Retroanálise do nível do mar e clima de ondas em águas intermediárias

A amplitude da maré astronômica máxima (diferença entre mínima e máxima) para a região é de 1,8 m. A maré meteorológica pode exercer grande influência na dinâmica costeira regional, podendo elevar o nível do mar em até 1,3 m. O valor mais frequente de amplitude de nível do mar é de 1,2 m.

O clima de ondas em frente à Praia de Piçarras, a uma profundidade de aproximadamente 20 m (água com profundidade intermediária) apresenta a predominância de quatro direções de ondas, ENE, E, ESE e SE, que juntas representam 93%. A predominância das ondas de ESE pode ser verificada durante todas as épocas do ano, porém a participação de ondas de SE aumenta no inverno (de junho a agosto, Figura 13.3a). Esses valores coincidem com dados obtidos através de ADCP na mesma zona entre agosto e setembro de 2011 (OLIVEIRA, 2013).

A altura de onda significativa (H_s) varia entre 0,5 m e 3,5 m, enquanto que o período de pico (T_p) varia entre 4 e 19 s. Mais de 75% dos estados de mar apresentam H_s menor que 1,5 m e período de pico de menos de 8,2 s (Figuras 13.3b a 13.3e).

A distribuição conjunta entre H_s e direção das ondas indica que ondas maiores que 2 m são provenientes de direções entre 90 e 140° (Figura 13.3f). A distribuição conjunta entre H_s e T_p indica que as ondulações mais frequentes da região são de T_p entre 6 e 9 s e H_s entre 1 e 1,5 m (Figura 13.3g).

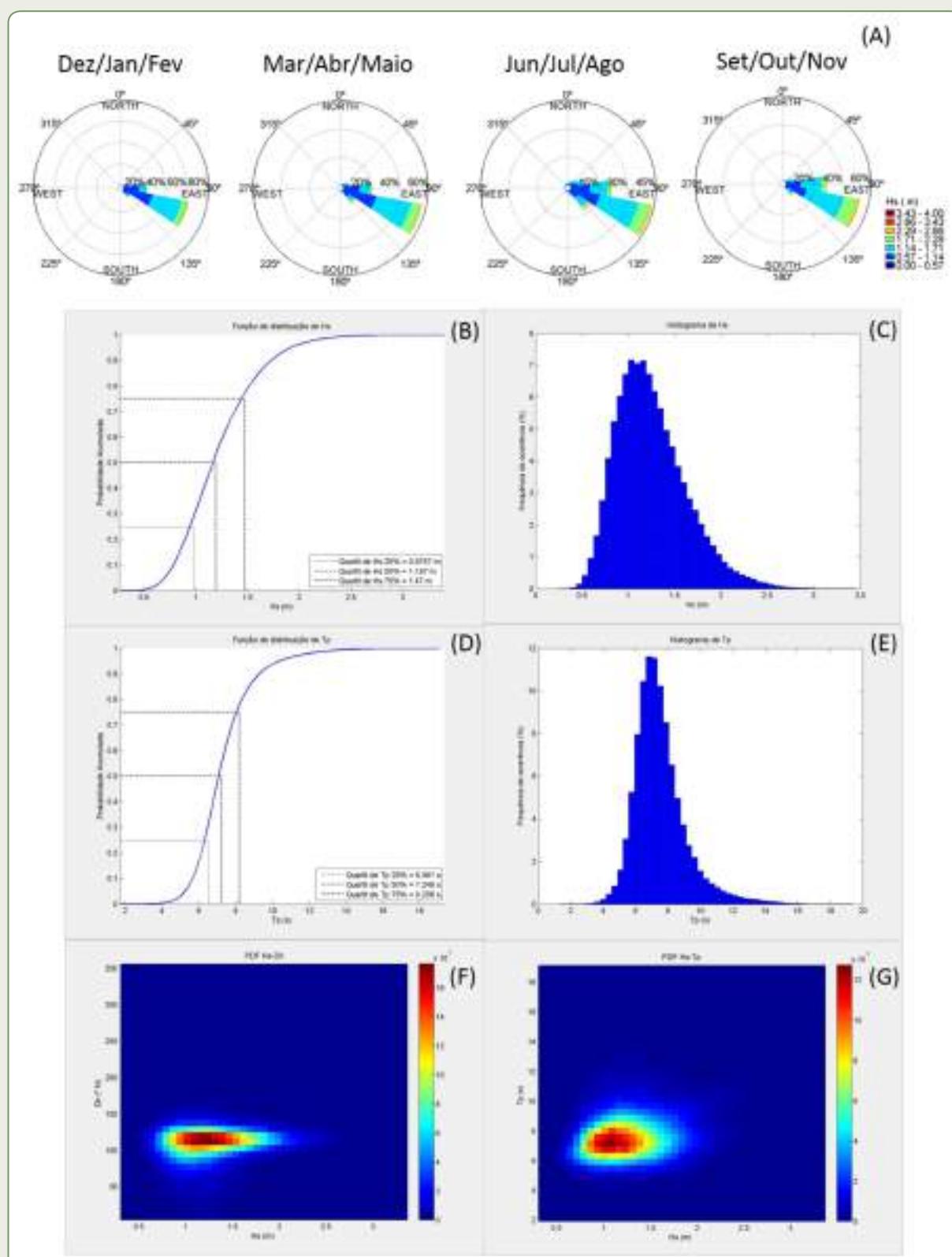
Em termos gerais pode-se verificar que as alturas de onda dos temporais anuais apresentam uma altura significativa (H_{s12}) de aproximadamente 2,8 m com período de pico associado (T_{p12}) de 15 s, enquanto que a altura de onda significativa média ($H_{s50\%}$) está em torno de 1,2 m com período de pico ($T_{p50\%}$) de aproximadamente 7 s (Quadro 13.1).

Quadro 13.1 – Principais direções, probabilidade de ocorrência, $H_{s50\%}$, $T_{p50\%}$, H_{s12} , T_{p12} , obtidos da base de dados do SMC-Brasil em frente à Praia de Piçarras (20 m de profundidade)

Direções	Probabilidade de ocorrência	$H_{s50\%}$	$T_{p50\%}$	H_{s12}	T_{p12}
ENE	0,0590	1,0656	7,2782	2,3971	13,2421
E	0,2322	1,1372	7,4363	2,5803	14,3454
ESE	0,5398	1,2508	7,2589	2,8198	15,9237
SE	0,0971	1,1909	7,0392	2,8544	16,2428

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 13.3 – Parâmetros caracterizadores de clima de ondas no ponto da base de dados do SMC-Brasil (lat. 26,7°S; long. 48,6°W)



Legenda: a) rosa de direção de ondas por trimestres; b) probabilidade acumulada de H_s ; c) histograma de probabilidade de H_s ; d) probabilidade acumulada de T_p ; e) histograma de probabilidade de T_p ; f) distribuição conjunta de H_s e direção de ondas; g) distribuição conjunta de H_s e T_p

Fonte: Dos autores (2018).

Análise a curto prazo (propagação dos casos selecionados)

Comportamento das ondas

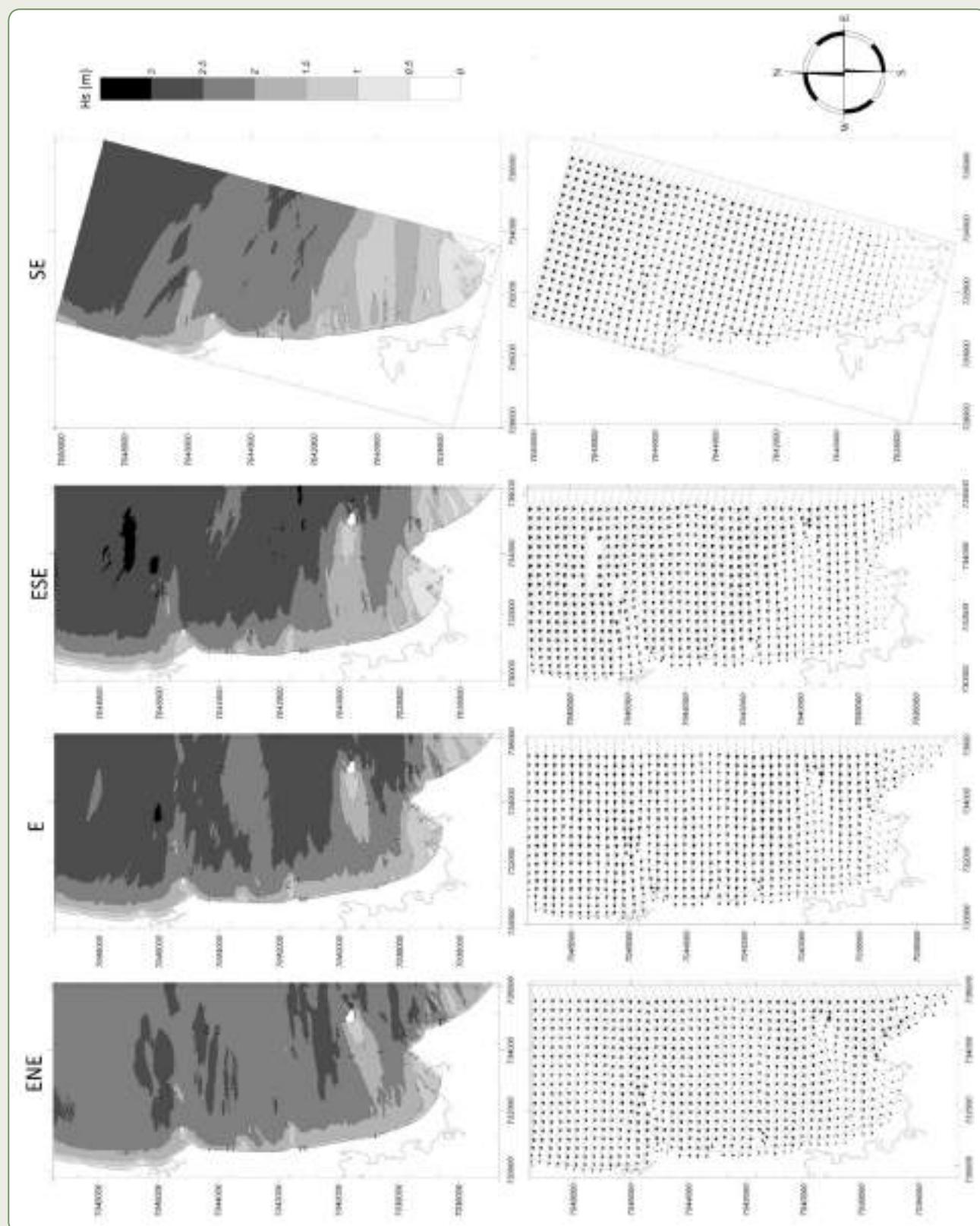
Os parâmetros de propagação dos casos onde se avalia o comportamento a curto prazo são os apresentados no Quadro 13.1. Uma vez que as diferenças entre maré alta e maré baixa não foram significativas, serão apresentados os resultados das propagações em maré alta (Figura 13.4).

Em relação aos casos associados a eventos de tempestade, correspondentes aos valores de H_{s12} e T_{p12} , a ondulação proveniente da direção ENE chega à zona norte da Praia de Piçarras com H_s de até 2 m, diminuindo em direção ao sul (1 a 1,5 m). A Ilha Feia causa difração, protegendo a zona sul da praia da ondulação proveniente dessa direção. Na área de estudo e em frente à Praia Alegre pode-se observar uma forte diminuição de H_s , devido essencialmente à refração das ondas. No gráfico de vetores de H_s é evidente que essa ondulação chega à região norte e central da praia com direção similar à ENE, atingindo a linha de costa com uma obliquidade a sul.

Para a ondulação de tempestade proveniente de E, a difração causada pela presença da Ponta de Penha começa a ser importante, causando uma diminuição da energia das ondas que chega à Praia Alegre. Observa-se um gradiente de altura de onda, com valores mais altos a norte/centro que a sul da praia. A obliquidade da ondulação em relação à linha de costa diminui, sendo praticamente perpendicular.

As ondulações de ESE, as mais frequentes, são difratadas pela Ponta da Penha, que protege a região sul da Praia de Piçarras dessas ondas. O gráfico de vetores de H_s mostra que as ondas chegam, em relação à orientação da linha de costa, com uma suave inclinação para norte na região central e norte da Praia de Piçarras, sendo que essa obliquidade volta a ser importante.

Figura 13.4 – Resultado das propagações em maré alta dos casos associados a eventos de tempestade para as quatro direções principais de onulação da região da Praia de Piçarras



Legenda: Isolinhas de H_s à esquerda e vetor de direção de H_s à direita. ENE ($H_s = 2,4\text{ m}$; $T_p = 13,2\text{ s}$); E ($H_s = 2,6\text{ m}$; $T_p = 14,3\text{ s}$); ESE ($H_s = 2,8\text{ m}$; $T_p = 15,9\text{ s}$); SE ($H_s = 2,9\text{ m}$; $T_p = 16,2\text{ s}$)

Fonte: Dos autores (2018).

As ondas de tempestade de SE chegam à zona sul e central da Praia de Piçarras muito difratadas, tanto pelos costões localizados a sul como pela Ilha Feia, apresentando altura de onda muito pequena na região sul (máximo de 1 m). A região norte da praia continua sendo mais exposta. O gráfico de vetores de H_s mostra que há uma maior obliquidade das ondas, com ângulo para norte.

Em relação aos casos associados a ondulações médias, correspondentes aos valores de $H_{S50\%}$ e $T_{P50\%}$, estes apresentam um comportamento muito parecido ao das ondulações associadas a eventos de tempestade, porém com alturas de onda menores. Para todas as ondulações, a região norte da Praia de Piçarras apresenta maiores alturas de onda que a região sul, esta última com uma evidente proteção do Costão da Penha, principalmente das ondulações provenientes de ESE e SE.

Tessler (2010) avaliou o comportamento de variação de H_s na Enseada do Itapocorói utilizando o modelo de propagação espectral de ondas SWAN e observou comportamento muito semelhante ao do presente trabalho, com uma região mais protegida ao sul que ao norte.

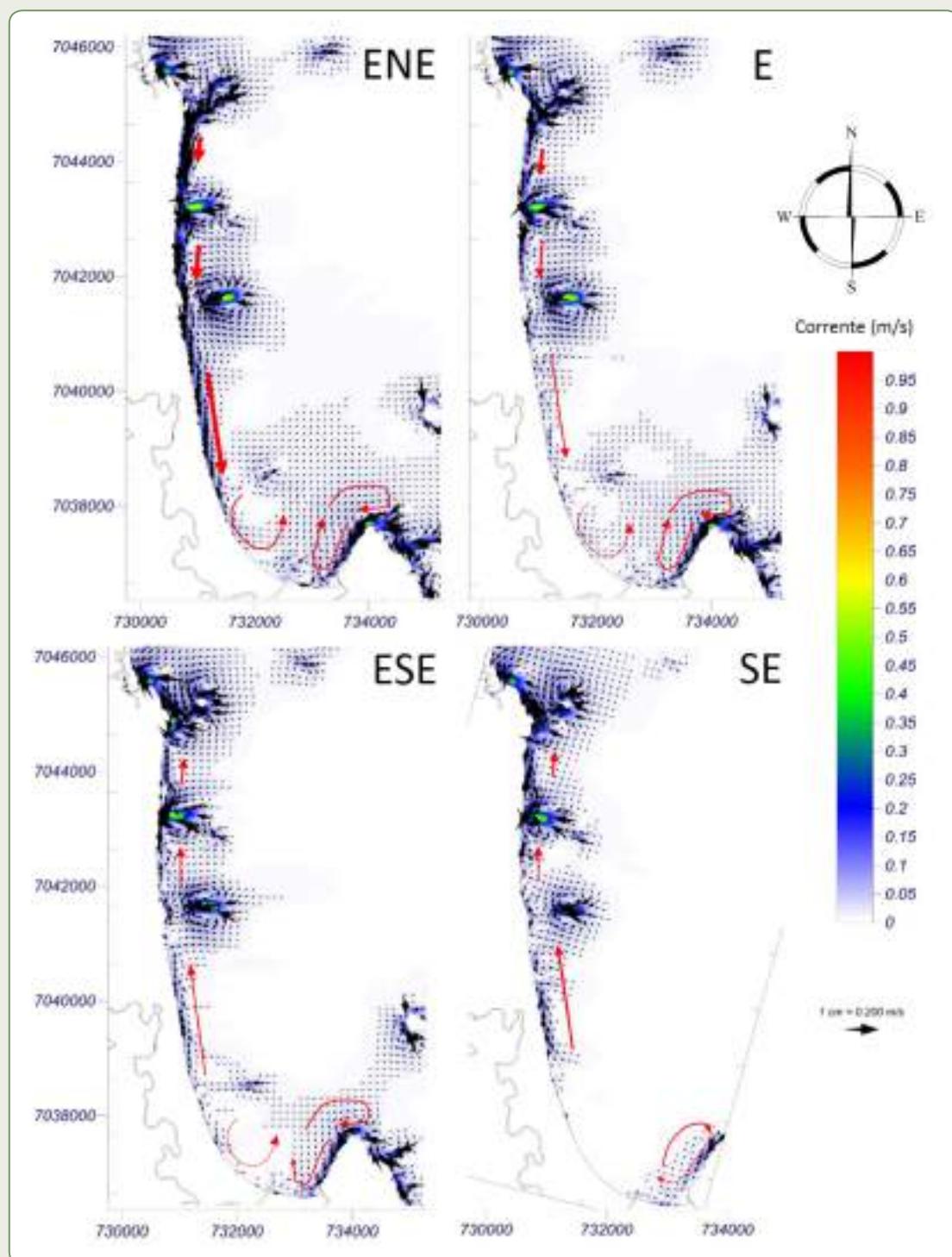
Sistema circulatório associado às ondas

Avaliando as correntes geradas pelas ondas associadas a eventos de tempestade e a condições médias, para cada uma das direções, observou-se que nas duas condições o comportamento das correntes é muito semelhante, variando somente a intensidade, sendo apresentados na Figura 13.5 os resultados para eventos de tempestade.

Para ondulações provenientes de ENE, as correntes associadas são para direção sul, causadas devido à obliquidade das ondas, na região norte e central. Na região sul a obliquidade diminui e a corrente para sul é gerada devido ao gradiente de altura de onda. Por outro lado, verificou-se que, adjacente ao costão sul, se forma uma corrente que flui para norte. O encontro entre a corrente para sul e a corrente para norte ocorre na região sul da Praia de Piçarras, que se torna perpendicular à costa e gera um circuito fechado com a corrente adjacente ao costão da Ponta da Penha.

O comportamento das correntes geradas por ondas de E é muito similar ao observado para as ondas de ENE, porém com intensidades menores, pois a ondulação chega com menor obliquidade, gerando correntes menos intensas.

Figura 13.5 – Correntes causadas por ondulações associadas a eventos de tempestade provenientes das quatro principais direções, em maré alta



Fonte: Dos autores (2018).

As correntes geradas por ondas provenientes de ESE apresentam, para as regiões central e norte da Praia de Piçarras, um comportamento oposto, com corrente para norte, mais uma vez provocada pela chegada de maneira oblíqua da ondulação. Porém, na região sul da Praia de Piçarras, os efeitos de difração e refração ocasionados pela presença do Parcel de Piçarras e da Ponta de Penha geram o mesmo sistema de correntes observado para os casos de ENE e E: a formação de uma corrente para sul devido ao gradiente de altura de onda. O sistema de corrente fechado adjacente ao costão sul, que segue até a Praia Alegre e encontra-se com a corrente que vem de norte e torna-se perpendicular à costa, também existe para essa condição de ondulação.

As correntes geradas por ondas provenientes de SE fluem para norte na parte central e norte da Praia de Piçarras. Na região sul as correntes são desprezíveis, pois nesses casos as ondas que chegam a esta região apresentam altura muito pequena.

Para todas as ondulações observa-se que há um ponto de parada/início da corrente justo em frente ao Parcel de Piçarras. Esse será um importante condicionante à dinâmica da área de estudo, como se explicará em detalhe no funcionamento morfodinâmico da praia.

Outro ponto a salientar é que esse sistema de correntes para sul na região da Praia de Piçarras não era esperado, pois conhecedores da região (comunicação pessoal) indicam que as correntes em eventos de tempestade de ESE e SE são para norte. Essa diferença com os resultados encontrados no presente estudo pode se dever ao fato de que as correntes aqui apresentadas são geradas exclusivamente pelas ondas, sendo que correntes locais geradas por ventos não são consideradas, tal como verificado em trabalho de Leite et al. (2011), onde correntes para norte foram observadas na área de estudo em condições de vento de sul e de sudeste.

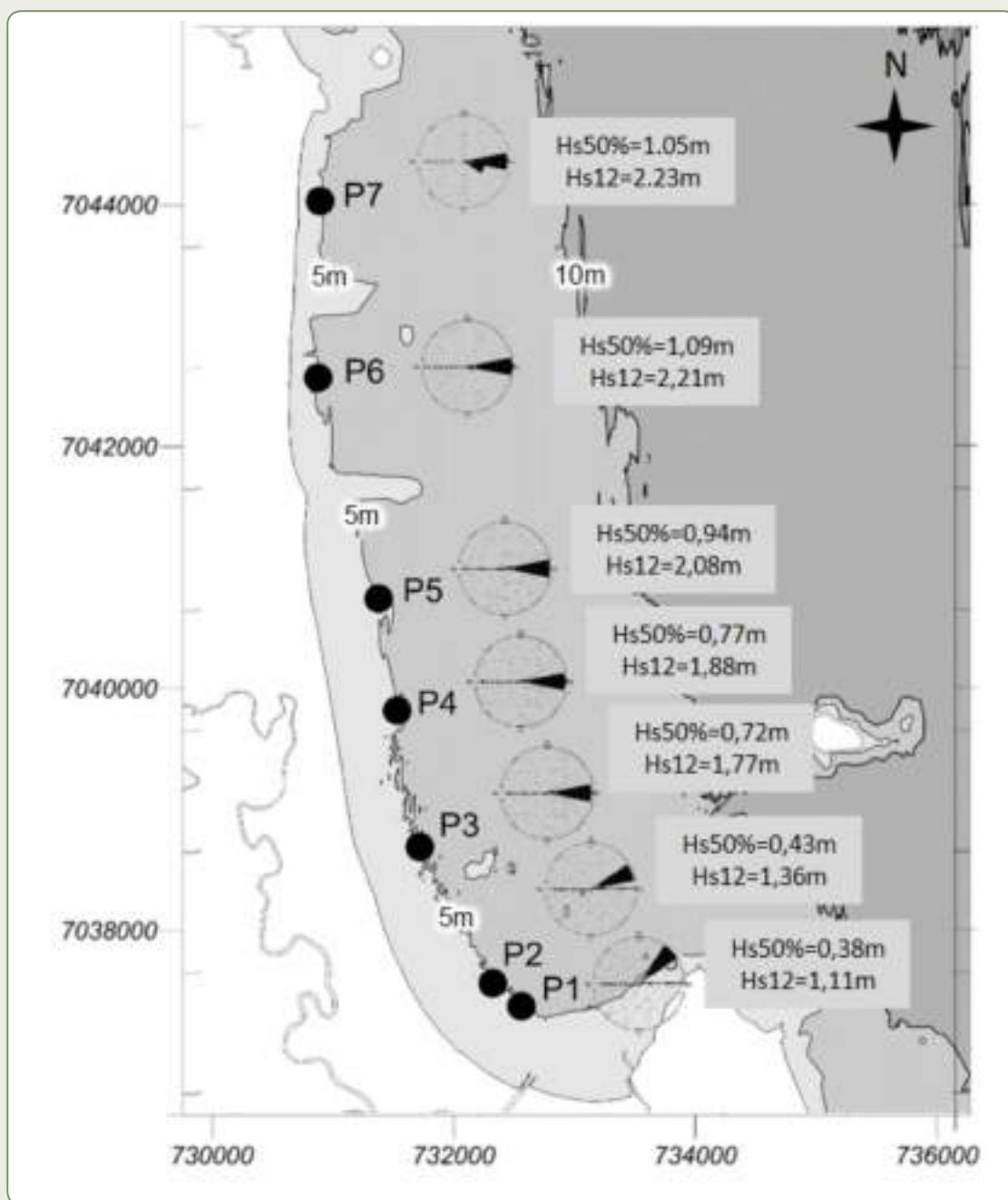
Análise a longo prazo

Para a avaliação do clima de ondas na área de estudo, considerando os 60 anos de dados disponíveis no SMC-Brasil, ao total foram selecionados 150 casos que foram propagados em três níveis de maré (baixa, meia maré e alta), sendo executadas 450 propagações.

Clima de ondas em águas rasas

Sete pontos próximos à praia foram selecionados a uma profundidade de aproximadamente 5 m, para a reconstrução e a avaliação do clima de ondas em águas rasas. A localização dos pontos e os respectivos resultados encontrados podem ser observados na Figura 13.6.

Figura 13.6 – Pontos de reconstrução da base de dados de 60 anos de ondulação em profundidade de 5 m, com respectivas características de clima de ondas



Fonte: Dos autores (2018).

O clima de ondas em águas rasas (profundidade de 5 m) nos indica que nos pontos mais ao sul (P1 e P2) as ondas chegam à praia de NE e ENE, enquanto que na parte central (P3 a P5) e norte da praia (P6 e P7) as ondas são predominantemente de E. As alturas significativas de onda média ($H_{s50\%}$) e associada a evento de tempestade (H_{s12}) são menores na região sul, caracteristicamente mais protegida das ondulações incidentes, aumentando para norte, chegando a atingir $H_{s12} = 2,23$ m no ponto P7.

Avaliação dos perfis de equilíbrio

Os cinco perfis avaliados localizam-se perpendicularmente aos pontos P1 a P5 (Figura 13.6) e à linha de costa. Os resultados dos cálculos de profundidade de fechamento (h^*) e dos parâmetros de forma de equilíbrio (A_D) dos perfis estão apresentados no Quadro 13.2.

A profundidade de fechamento (h^*) calculada aumenta quanto mais ao norte (de 2,4 m em P1 a 4,47 m em P5), coincidindo com o aumento da exposição da costa frente às ondas. Essa diferença na profundidade de fechamento será importante na definição do desenho das propostas que pretendem solucionar o problema de erosão acentuada.

Quadro 13.2 – Resultados dos cálculos de profundidade de fechamento (h^*) e parâmetros de ajuste de perfil de equilíbrio

	H_{s12}	T_P	h^* (Hallermeier, 1981)	A_D	D_{50} estimado	D_{50} medido (Araujo, 2008)
P1	1,11	9,11	2,42	0,2499	0,97 mm	0,25-0,44 mm
P2	1,36	9,31	2,94	0,1869	0,53 mm	0,29-0,34 mm
P3	1,77	10,40	3,83	0,1555	0,36 mm	0,25-0,31 mm
P4	1,88	10,03	4,04	0,1450	0,31 mm	0,28-0,37 mm
P5	2,08	10,42	4,47	0,1404	0,29 mm	0,27-0,32 mm

Fonte: Dos autores (2018).

Quanto à comparação da granulometria (D_{50}) estimada correspondente a um perfil de equilíbrio de Dean com a medida em campo, os resultados indicam que, para os perfis localizados na parte central da Praia de Piçarras (de P3 a P5), o ajuste corresponde a um D_{50} de aproximadamente 0,3 mm, valor coincidente com o medido por Araujo (2008), o que nos indica que a praia nesse tramo, quanto ao seu perfil, apresenta uma configuração de equilíbrio, como proposto por Dean. Porém, para P1 e P2, os ajustes do perfil sugerem um D_{50} estimado maior que o medido. Há duas hipóteses que podem explicar essa diferença:

- Hipótese (1): esta é uma zona que sofre erosão e os valores de D_{50} estimados para P1 e P2 representam a realidade. O D_{50} apresentaria valores maiores em 2011 que os obtidos em amostras de 2007, pois as correntes estariam carreando sedimentos mais finos, permitindo esse aumento de D_{50} .
- Hipótese (2): existem outros aspectos que influem na forma dos perfis P1 e P2, além do proposto no perfil de Dean. Um dos aspectos que pode ser considerado é que o Parcel de Piçarras está afetando a forma do perfil. Como comprovado por Muñoz-Pérez (1996), os perfis de praia apoiados em uma laje rochosa apresentam uma maior inclinação, com relação entre os parâmetros de forma do perfil de Dean (A_D) e do perfil com laje rochosa (A_{LR}) de: $A_{LR} = 1,5 * A_D$. O motivo dessa maior inclinação radica na dissipação da energia da ondulação devida à arrebentação das ondas sobre a laje.

Nessa hipótese (2) a granulometria não poderia ser calculada a partir de ajuste de A_D e sim de A_{LR} , e os valores estimados apresentados para P1 e P2 no Quadro 13.2 não condizem com a realidade, sendo a granulometria aproximadamente a indicada por Araujo (2008), entre 0,2 e 0,4 mm.

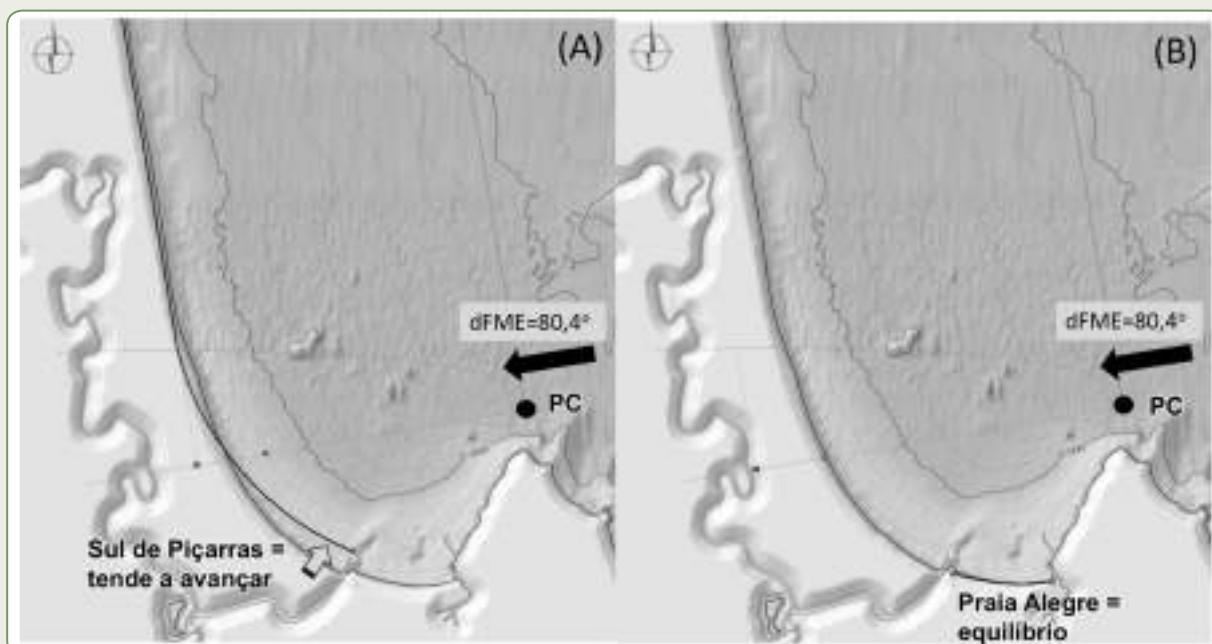
A comprovação das hipóteses requer a obtenção de amostras sedimentológicas nos perfis P1 e P2, que deveriam ser analisadas antes da intervenção na praia realizada em 2012/2013, pois influenciam no desenho final e no volume de areia necessário para a engorda da praia.

Avaliação da forma em planta de equilíbrio

O ponto de controle que define a forma em planta da região sul da Praia de Piçarras e Praia Alegre foi identificado como a Ponta de Penha. Sua localização foi definida a partir dos gráficos de propagação de ondas, no local onde as ondas começam a apresentar mudança de direção devido à sua difração. Nesse ponto a direção do Fluxo Médio de Energia (dFME) calculada foi de $80,4^\circ$ (N $80,4^{\circ}$ E), que coincide com a orientação da parte reta da Praia de Piçarras. Devido à presença dos guia-correntes da desembocadura do Rio Piçarras, as praias Alegre e Piçarras estão desconectadas, sendo necessário aplicar a forma em planta separadamente para cada uma delas. Os resultados da forma em planta estão apresentados na Figura 13.7 e mostram que a Praia Alegre se encontra em equilíbrio. A região sul da Praia de Piçarras, para as condições avaliadas neste estudo, apresenta-se em desequilíbrio, pois a forma em planta de equilíbrio nos mostra que a praia tenta aumentar a obliquidade da linha de costa em relação às ondas, para compensar a corrente gerada por gradiente de ondas, e para tal tende a avançar. Destaca-se que o Parcel de Piçarras também é um ponto de difração, com tendência a apresentar uma saliência em sua frente.

Klein et al. (2003) e Silveira et al. (2010) também aplicaram a forma em planta de equilíbrio à Praia de Piçarras, porém utilizaram uma metodologia diferente, avaliando a forma em planta a partir das imagens de satélite e indicaram que a Praia de Piçarras se encontra em equilíbrio dinâmico. Essa metodologia não considera a dFME calculada com base nos dados de ondas nem a definição do ponto de controle em função da propagação das ondas, o que explicaria a diferença dos resultados. O fato de a dFME calculada no presente estudo coincidir com a direção da parte reta da praia fortalece a confiabilidade nos cálculos realizados.

Figura 13.7 – Ajuste da forma em planta de equilíbrio, com indicação do ponto de controle (PC) e direção do Fluxo Médio de Energia (dFME)



Legenda: a) região sul da Praia de Piçarras; b) Praia Alegre

Fonte: Dos autores (2018).

Transporte litoral de sedimento

Para fins de cálculo, considerou-se um valor de tamanho de grão mediano (D_{50}) de 0,3 mm para a Praia de Piçarras. Os resultados do transporte de sedimento médio anual para cada perfil estão apresentados no Quadro 13.3. Esses resultados indicam um transporte essencialmente de sul para norte (valores negativos indicam essa direção).

Como se mostrou anteriormente, as correntes da região sul da Praia de Piçarras apresentam uma importante componente gerada por gradiente de altura de onda, que não é levada em consideração no cálculo de transporte com a formulação de CERC. Da mesma maneira, essa formulação não considera o transporte causado por correntes transversais, observadas na área de estudo. Portanto o cálculo de transporte de sedimento utilizando a formulação de CERC não é adequada para os perfis P1 e P2. Para os perfis P3 a P5 a equação de CERC pode ser mais bem aplicada, pois as correntes nessa região são essencialmente geradas pela obliquidade das ondas, com valores na ordem de 100 a 150 mil m^3 ao ano para norte.

Quadro 13.3 – Resultados dos cálculos de transporte de sedimento (m^3/ano) utilizando a formulação de CERC (1984)

Ponto	FME	Direção FME	Transporte líquido	Transporte para sul	Transporte para norte
P1	189,09	48,60	-116536,04	6086,96	-122622,99
P2	533,37	69,68	-286784,57	0,27	-286784,83
P3	566,91	79,15	-152747,67	5865,39	-158613,06
P4	470,31	85,05	-136064,25	7405,18	-143469,43
P5	944,69	81,02	-96651,83	13291,07	-109942,90

Fonte: Dos autores (2018).

Modelo morfodinâmico de funcionamento

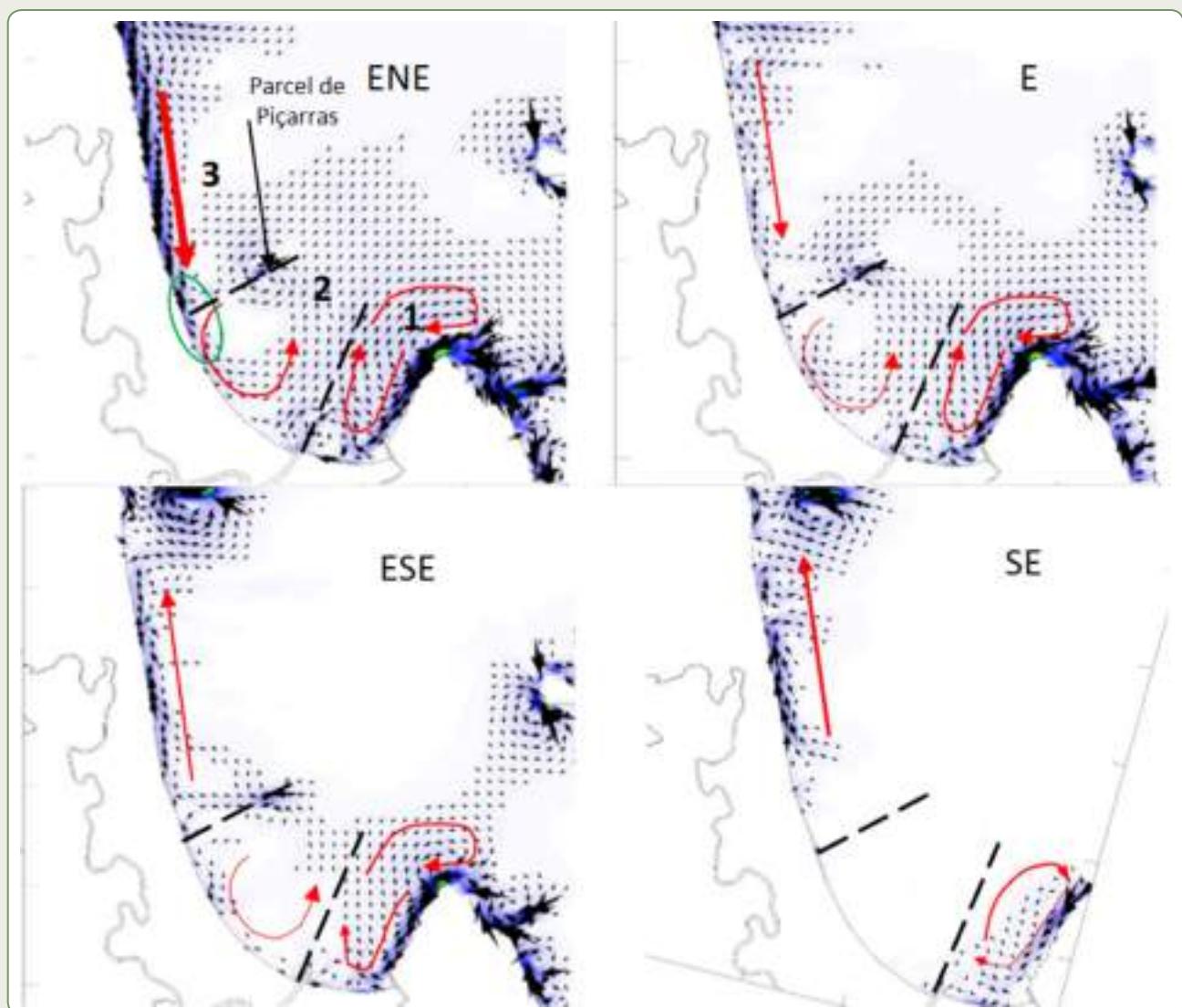
O funcionamento morfodinâmico da região sul da Enseada do Itapocorói pode ser explicado por setores, definidos em função da dinâmica observada e das características morfológicas:

- Setor 1, compreende a Praia Alegre e o costão sul da Enseada do Itapocorói, caracteristicamente protegido das ondulações, principalmente de ESE e SE;
- Setor 2 (principal área de análise), estende-se desde a desembocadura do Rio Piçarras até o Parcel de Piçarras, onde se localiza a zona de erosão acentuada, com grande pressão urbana (construções na berma da praia) e onde foi implementado em 2012/2013 um projeto de recomposição da praia;
- Setor 3, desde o Parcel de Piçarras até a zona central da Praia de Piçarras, caracteristicamente mais exposta, com perfil de praia menos inclinado, praia seca mais larga e menor pressão urbana (presença de vegetação de praia e dunas primárias).

Ao avaliar a condição dinâmica das correntes geradas por ondas na região sul da Enseada do Itapocorói a curto prazo, separadamente por setores (Figura 13.8), observa-se que:

- O Setor 1 apresenta correntes, para todas as direções de ondas avaliadas, adjacentes ao costão da Ponta de Penha, fluindo pela Praia Alegre para norte, tornando-se perpendiculares ao encontrar a corrente do Setor 2 e retornando ao costão. Essas correntes provavelmente não transportam grandes quantidades de sedimento por virem do costão, porém se há sedimento, este é depositado na Praia Alegre à medida que a corrente perde força.
- No Setor 2 observa-se que as correntes são sempre em direção sul, independentemente da direção das ondas incidentes (exceto para ondas de SE, que não formam correntes nesse setor), sendo o principal fator gerador dessas ondas incidentes o gradiente de altura de onda, pois a ondulação chega nesse setor difratada e sem uma obliquidade importante das ondas. As correntes dos setores 1 e 2 se encontram na altura da desembocadura do Rio Piçarras e fluem, transversalmente à costa, para maiores profundidades.

Figura 13.8 – Correntes geradas por ondas provenientes das quatro direções avaliadas, específicas para cada um dos setores (1, 2 e 3 como indicado na figura superior esquerda)



Fonte: Dos autores (2018).

- O Setor 3 apresenta variação na direção das correntes: para sul, com ondas de ENE e E, e para norte com ondas de ESE e SE, devido principalmente ao fato de que essas correntes são geradas pela obliquidade das ondas em relação à costa. O transporte de sedimento resultante dessas correntes será que, para correntes que fluem para norte, o sedimento será erodido à medida que a corrente ganha intensidade. Quando as correntes fluem para sul, estas depositarão sedimento entre o Setor 3 e o 2, pois perdem intensidade nessa região (círculo verde na Figura 13.8). As ondulações que geram correntes para o norte, apesar de apresentarem menor intensidade, são as mais frequentes (mais de 60% dos estados de mar). Dessa maneira, em um balanço sedimentar, a retirada de areia da região entre os setores 2 e 3 será maior que a deposição produzida pelas correntes que fluem para sul (causadas por ondulações com frequência de menos de 30% dos estados de mar).

Importante ressaltar que as correntes do Setor 3 que fluem para sul diminuem sua intensidade devido à presença do Parcel de Piçarras, que causa um aumento local no nível do mar (*set up*), bloqueando a corrente. Sendo assim, o Parcel de Piçarras funciona como um ponto de controle das correntes geradas por ondas, nessa zona da praia.

Um fator crítico desse sistema de corrente é que o Setor 2 não recebe sedimento dos outros dois setores, devido à presença do Parcel de Piçarras a norte e dos guia-correntes do rio ao sul, com consequente erosão ao longo do setor.

Da análise a longo prazo da forma em planta (Figura 13.7) também se espera que a praia acumule areia ao sul do Setor 2 devido ao sistema de correntes, que apesar de pouco intensas são constantes, porém isso não ocorre porque não há sedimento disponível, fazendo com que a linha de costa retroceda até o ponto em que intervenções são implementadas tentando impedir esse retrocesso. Isso se reflete nos perfis P1 e P2 localizados no Setor 2, se considerarmos a hipótese (1), que provavelmente apresentam sedimento grosso em função do carreamento de sedimentos mais finos para a região em frente à desembocadura do Rio Piçarras e à plataforma interna adjacente ao costão da Ponta da Penha.

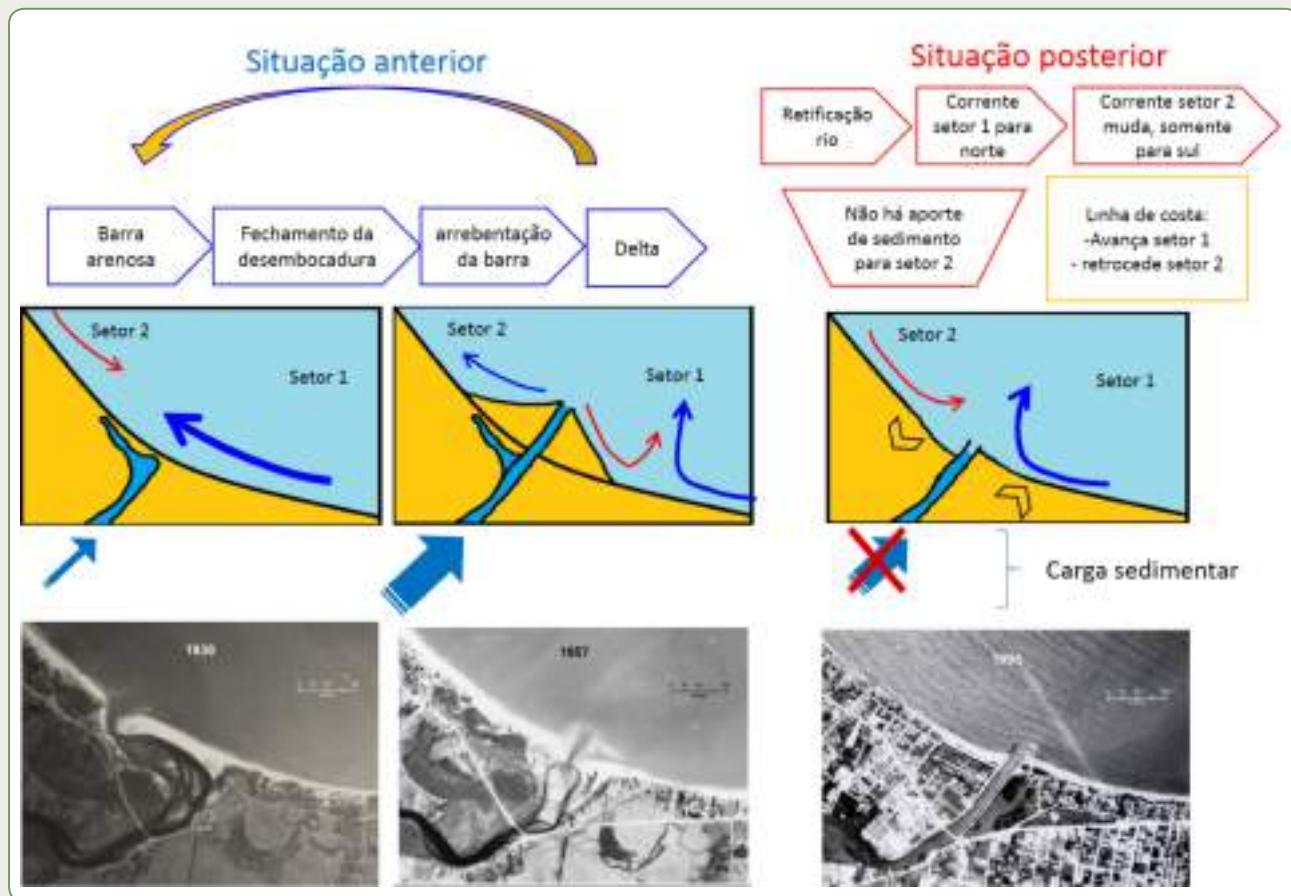
Em estudo realizado por Araujo et al. (2010), os perfis monitorados na região equivalente ao Setor 2 apresentaram características erosivas, o que indica que o sedimento está sendo removido da parte sul, mas não está sendo depositado na mesma proporção na direção da deriva litorânea, que nesse trabalho foi considerada de sul a norte. Esse fato pode estar relacionado com o transporte sedimentar de correntes transversais para além da profundidade de fechamento na região sul da enseada (ARAUJO et al., 2010), correntes estas também observadas na modelagem realizada por Tessler (2010). O sistema de correntes obtido com os modelos do SMC-Brasil coincide com o comportamento sedimentar observado por Araujo et al. (2010), porém, tal como sugerem os autores, estudos sedimentares e batimétricos de detalhe devem ser desenvolvidos para identificar o destino do sedimento erodido da região sul da Praia de Piçarras.

Estudos granulométricos da Enseada do Itapocorói foram realizados em agosto de 2008 por Bella (2009) e entre novembro de 2011 e julho de 2012 por Nakao (2012). O primeiro estudo indica que a região em frente aos setores 1 e 2 apresenta sedimentos finos (D_{50} de 0,03-0,07 mm), porém o segundo indica uma mudança nesses valores, com presença de areia com D_{50} entre 0,06 e 0,25 mm. Os resultados obtidos por Nakao (2012) indicam um aumento do tamanho de grão, que poderia ser proveniente da erosão da areia do Setor 2 da Praia de Piçarras, carreado pela corrente longitudinal para sul e transversal que se forma a partir do encontro das correntes dos setores 1 e 2, depositando o sedimento na plataforma interna adjacente ao costão. Estudos complementares são necessários para comprovar esse transporte.

A partir do entendimento do funcionamento da praia, é possível complementar a hipótese de Araujo (2008) sobre os motivos da desestabilização da região sul da Praia de Piçarras, com base na teoria de funcionamento da desembocadura do Rio Piçarras, em uma escala a muito longo prazo (Figura 13.9):

- Na década de 1930, a desembocadura do Rio Piçarras ficava a cerca de 300 m ao norte da posição atualmente retificada. Nessa desembocadura se formava uma barra arenosa, que migrava para norte, chegando a fechar a desembocadura quando a competência hidráulica do rio era muito pequena em relação à dinâmica costeira (Araujo, 2008). Isso sugere que a corrente dominante nessa zona era para norte (Figura 13.9), o que coincide com os resultados obtidos neste estudo para o Setor 1, indicando que o sistema permaneceu o mesmo na Praia Alegre.
- Durante os períodos de alta pluviosidade, a competência do rio aumentava e rompia a barreira arenosa, com a abertura de um novo canal em uma posição mais ao sul. Esse mecanismo de arrebentação da barreira permitia que o sedimento fosse imediatamente transferido para o Setor 2 do presente estudo (Araujo, 2008). Além disso, se formava um delta, que por sua vez mudava a forma em planta, aumentando sua curvatura, gerando uma corrente por obliquidade para norte. A muito longo prazo o comportamento de mudança na direção da corrente para norte ou para sul, no Setor 2, permitia um equilíbrio dinâmico, e dessa maneira o sistema se mantinha estável a longo prazo (Figura 13.9 à esquerda).
- O Setor 3 não deve apresentar mudanças de correntes entre a década de 1930 e hoje, porém pode sofrer retrocesso da linha de costa devido à perda da carga sedimentar pontual proveniente do arrombamento da barra arenosa do Rio Piçarras.
- Com a retificação da desembocadura do Rio Piçarras, na década de 1970, este balanço sedimentar foi modificado (Figura 13.9 à direita): a corrente para norte a partir da Praia Alegre continua existindo, porém como a desembocadura agora está fixa, esta não pode chegar à forma de delta alcançada no passado e não fornece sedimento ao Setor 2. A corrente para norte, no Setor 2, não existe em nenhum estado de mar e não há aporte sedimentar nem do rio nem da região mais a norte, devido ao ponto de parada da corrente do Setor 3, causado pelo Parcel de Piçarras. Dessa maneira há a tendência de ocorrer um avanço da linha de costa da Praia Alegre, se há sedimento (Setor 1), pois o sedimento fica aprisionado nesse setor, e um retrocesso na região sul da Praia de Piçarras.

Figura 13.9 – Mudança da dinâmica da desembocadura do Rio Piçarras Furado (ARAUJO, 2008) e sistema de correntes, antes e após a retificação do Rio Piçarras na década de 1970



Fotos: Araujo (2008).

Avaliação do projeto de recomposição da região sul da Praia de Piçarras

A partir da avaliação da dinâmica da área de estudo e da determinação do modelo morfodinâmico de funcionamento da Praia de Piçarras, é possível avaliar o projeto de recomposição proposto e executado em 2012 e 2013.

A inserção da engorda à batimetria resultou em um volume de areia, calculado por este estudo, de 629.116 m³, valor muito similar ao do projeto (785.989 m³), o que indica que os parâmetros considerados para a criação da nova batimetria são próximos aos do projeto de recomposição.

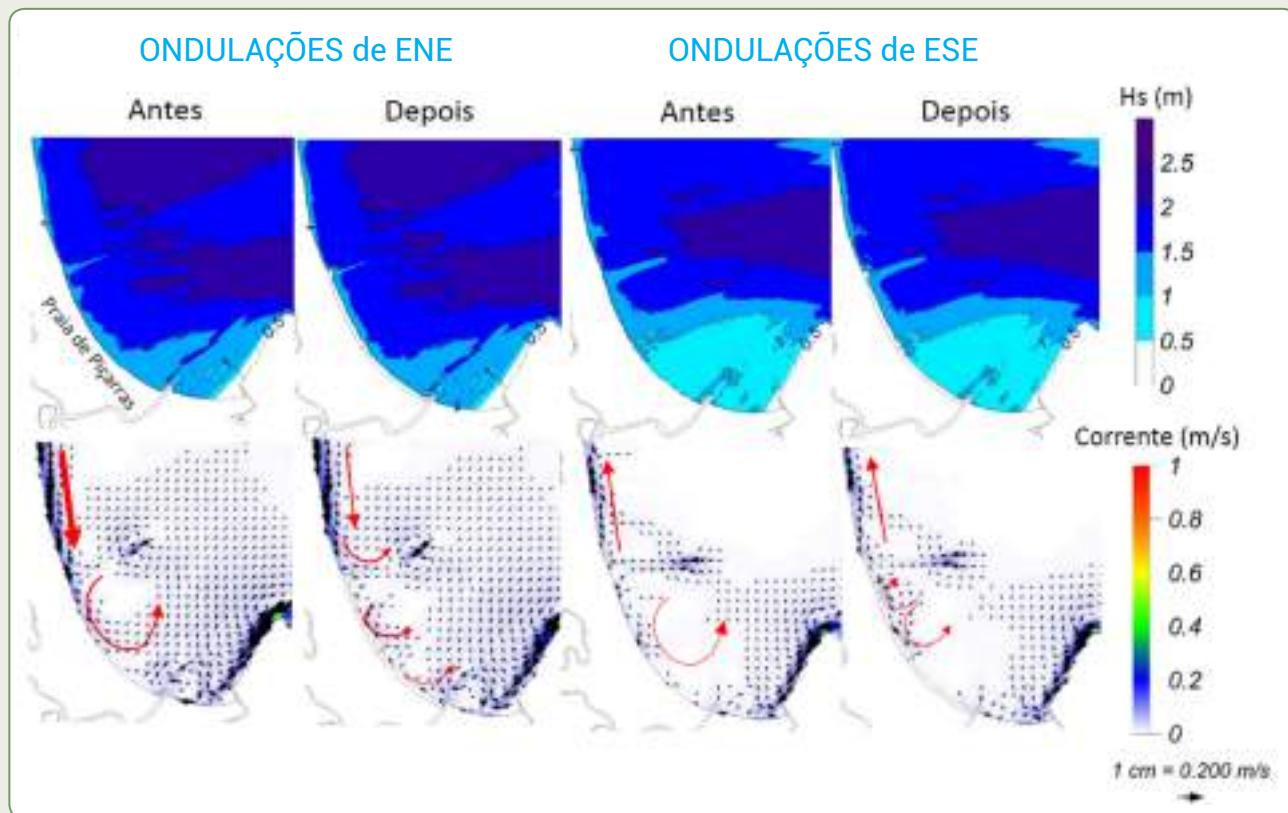
É importante ter em conta que as características dinâmicas descritas no projeto da Prefeitura de Piçarras (2012b) e no presente estudo apresentam as seguintes diferenças:

- 1) o projeto considerou que as correntes no Setor 2 são de sul para norte, direção contrária à observada como resultado da modelagem do SMC-Brasil;
- 2) o projeto considerou que as tempestades que mais atingem a praia (ressacas) vêm de nordeste, e no presente trabalho verificamos que os temporais mais energéticos são provenientes de leste-sudeste.

Cabe destacar que as bases de dados e modelos do SMC-Brasil foram submetidos ao processo de validação, o que faz com que sejam confiáveis para realizar esse tipo de estudo. Mesmo assim, as diferenças encontradas entre os dados aqui apresentados e os do projeto da prefeitura sugerem que a dinâmica da área deve ser estudada com maior detalhe antes do estabelecimento de uma solução definitiva para a erosão da região sul da Praia de Piçarras.

Para a análise a curto prazo repetiram-se as propagações dos casos (Quadro 13.1) sobre a nova batimetria, e encontrou-se que as características das ondas e das correntes não mudam significativamente. Como exemplo, na Figura 13.10 estão apresentados os casos de ondas e correntes para ondulação de tempestade de ENE e ESE, antes e depois da implantação do projeto. Verifica-se aí que a altura de onda que chega à praia é muito similar. Quanto às correntes, com a implantação dos espigões, para a ondulação de ENE, a parada da corrente, que ocorria anteriormente devido à presença do Parcel de Piçarras, ocorrerá em um ponto um pouco mais ao norte. A corrente mais fraca para sul, que partia da altura do Parcel de Piçarras agora está descontínua. As correntes geradas por ondas de tempestade de ESE são similares, somente com a formação de um pequeno vórtice próximo ao espigão mais ao norte.

Figura 13.10 – Comparação do comportamento de altura de onda e do sistema de correntes para ondulação de ESE e ENE associados a condição de tempestade, antes e depois da implantação do projeto de recomposição da região sul da Praia de Piçarras



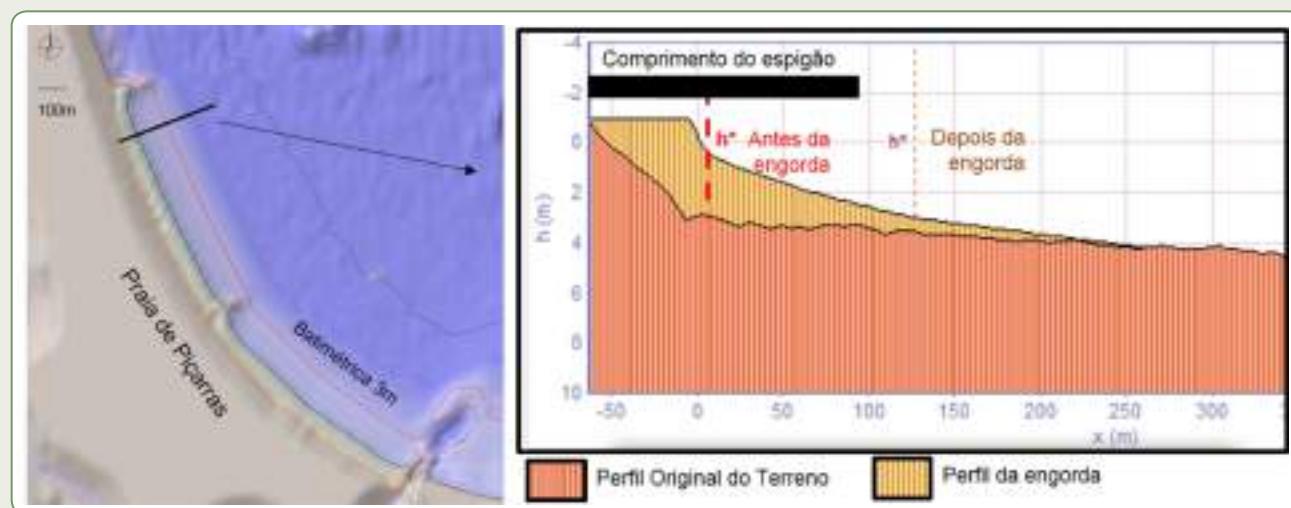
Fonte: Dos autores (2018).

A longo prazo analisaram-se o perfil e a planta de equilíbrio da praia após a implantação do projeto. O perfil de equilíbrio foi avaliado, e um corte do terreno, antes e depois da engorda da praia, pode ser observado na Figura 13.11. Nessa figura pode-se observar que a profundidade de fechamento ($h^* = 3$ m) antes de realizar a engorda se localizaria dentro da proteção dos espigões, porém, ao avançar esse perfil com a acreção de sedimento, essa mesma profundidade de fechamento localiza-se fora da

proteção dos espigões. Isso significa que o perfil é ativo até profundidades maiores que a proteção dos espigões e que o sedimento continuará sendo transportado dessa praia, sofrendo um retrocesso da linha de costa até que o perfil esteja contido pelos espigões. Como se pode observar na vista em planta (Figura 13.11 à esquerda), a linha batimétrica de 3 m (linha vermelha) passa por fora da contenção dos espigões.

Quanto à forma em planta de equilíbrio, observa-se que o projeto considerou que a praia contida entre os espigões teria sua forma em planta paralela à de antes do projeto. Como constatado no tópico “Avaliação da forma em planta de equilíbrio”, com base nos dados disponibilizados pelo SMC-Brasil, a forma em planta da parte sul da Praia de Piçarras não se encontra em equilíbrio. Dessa maneira espera-se que as praias entre os espigões girem, com acúmulo de areia na zona sul e erosão na zona norte de cada praia.

Figura 13.11 – Nova batimetria da área de estudo após a implantação do projeto de recomposição da Praia de Piçarras, em que se destacam a profundidade de fechamento de 3 m e o corte do terreno



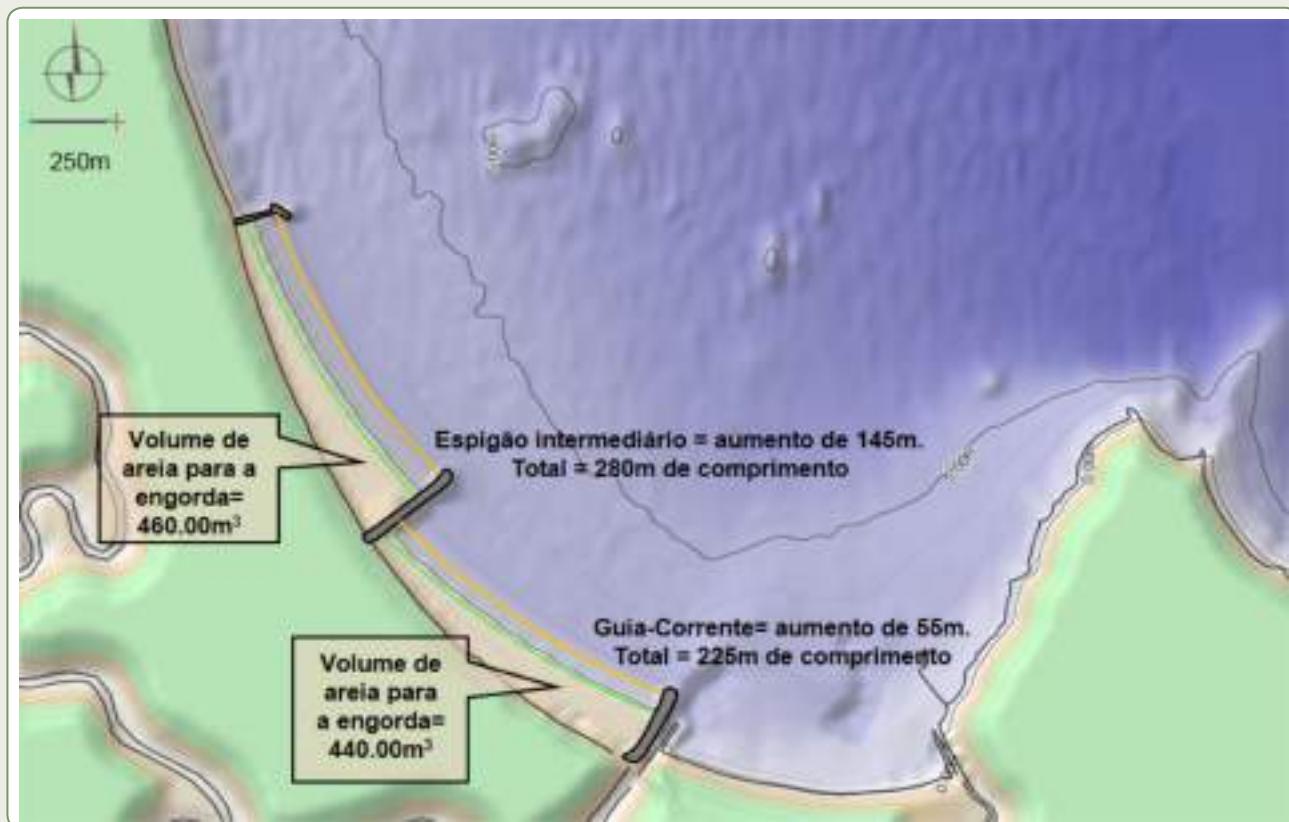
Fonte: Dos autores (2018).

Para complementar essa avaliação, realizou-se o desenho de uma alternativa com praias entre os espigões em estabilidade estática, ou seja, confinadas lateralmente sem perda de areia e com uma menor manutenção de reposição de areia à praia. Para tal foram aplicadas a forma em planta e de perfil de equilíbrio obtidas como resultado desse estudo, com os seguintes parâmetros de desenho: granulometria $D_{50} = 0,3 \text{ mm}$; largura mínima da praia de 30 m; $h^* = 3,1 \text{ m}$ para a praia ao norte e $h^* = 2,5 \text{ m}$ para a praia ao sul. Quanto ao comportamento do perfil de equilíbrio, duas hipóteses foram planteadas no tópico “Avaliação dos perfis de equilíbrio”, porém devido ao fato de que não há dados disponíveis para comprovar qual delas é a correta, utilizou-se como critério de desenho a hipótese (1), mais conservadora, que é a de que o perfil se comportará como descrito por Dean. O resultado e sua comparação com o resultado do projeto atual estão apresentados na Figura 13.12.

Nessa alternativa, o espigão construído em 2012 ao norte da área de estudo poderia permanecer o mesmo; o espigão intermediário deveria ter um comprimento total de 280 m, ou seja, o atual espigão deveria ser aumentado em 145 m; o guia-corrente do Rio Piçarras deveria ser aumentado em 55 m, atingindo um comprimento de 225 m. Nesse caso as praias teriam uma largura de praia seca de 30 m em sua porção ao norte e aproximadamente 160 m na região mais ao sul. A quantidade de sedimento necessária para a engorda dessas praias seria de aproximadamente 900.000 m^3 , apenas 15% a mais que

o suposto volume utilizado na engorda realizada em 2013 (Figura 13.12). Vale salientar que a obtenção de dados de campo e a comprovação das hipóteses planteadas neste estudo devem ser realizadas para a validação da eficácia dessa alternativa, além da avaliação de impactos ambientais.

Figura 13.12 – Alternativa para obtenção de praias em equilíbrio estático utilizando a forma em planta de equilíbrio e de perfil de equilíbrio de Dean, com profundidade de fechamento (linha laranja) de $h^* = 3,1$ m para o espião intermediário e de $h^* = 2,5$ m para o guia-correntes da desembocadura do rio



Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados anteriormente, podemos concluir que na região externa da Enseada do Itapocorói (20 m de profundidade) a ondulação é predominantemente de leste-sudeste (ESE), com ondas associadas a condições médias com $H_{S50\%} = 1,2$ m e $T_{P50\%} = 7$ s e ondas associadas a condições de tempestade com $H_{S12} = 2,8$ m e $T_{P12} = 15$ s. Próximo à Praia de Piçarras (5 m de profundidade), a região sul é atingida por ondas de nordeste, e na região central e norte, por ondas predominantemente de leste. A altura das ondas aumenta gradualmente de sul a norte, de 1,1 a 2,2 m em condições de tempestade, demonstrando uma variação da exposição da praia, principalmente devido aos efeitos de difração causados pela Ponta da Penha.

Essas ondas geram correntes que variam de direção na parte central da Praia de Piçarras. Porém, no setor sul, onde se localiza a zona de erosão acentuada, há uma corrente de deriva longitudinal contínua de norte a sul, para todas as condições de estados de mar testadas, que se torna transversal na altura da desembocadura do Rio Piçarras. Esse setor não recebe aportes externos de areia: ao

norte o Parcel de Piçarras causa um ponto de parada das correntes que vêm da parte central da praia, impedindo a continuidade do sistema circulatório e sedimentológico; ao sul a corrente que vem da Praia Alegre, fluindo para norte, desloca-se perpendicularmente à costa na altura da desembocadura do Rio Piçarras. Dessa maneira a zona sul da Praia de Piçarras encontra-se em constante regressão da linha de costa.

A avaliação do perfil de praia na zona de erosão acentuada indicou uma declividade maior que a esperada para um perfil de equilíbrio. Isso pode ocorrer porque:

- 1) o sedimento é mais grosso que o medido em 2007, devido ao processo de erosão que transportou a fração mais fina; ou
- 2) o tamanho do sedimento é similar ao restante da praia ($D_{50} = 0,3$ mm), porém existem efeitos locais que afetam a declividade do perfil de praia, como a presença da laje rochosa (Parcel de Piçarras). Estudos são indicados para verificar tais hipóteses.

Coincidindo com o modelo apresentado por Araujo (2008) e avaliando o modelo morfodinâmico de funcionamento, concluiu-se que a causa do problema de erosão acentuada na região sul da Praia de Piçarras se deve à fixação da desembocadura do Rio Piçarras e à sua retificação, o que impede a livre dinâmica da desembocadura que aportava sedimento pontualmente e mudava o sistema de correntes, que anteriormente se encontrava em equilíbrio dinâmico.

Sendo assim, com base nos resultados do presente estudo, a última intervenção realizada para tentar solucionar/mitigar o problema de erosão acentuada aparentemente não é estável a longo prazo, pois os espiões não conterão a planta e o perfil da nova praia. Consequentemente serão necessários futuros aportes de areia e altos custos de manutenção. Uma alternativa é proposta, baseada nos resultados e hipóteses planteadas neste estudo, com o objetivo de criar uma praia em equilíbrio estático, que minimizaria os custos de manutenção. Sugere-se o prolongamento dos espiões já construídos, até a futura profundidade de fechamento, permitindo que a engorda da praia atinja sua forma em planta e o perfil de equilíbrio estático.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), ao Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria (IH-Cantabria) da Universidad de Cantabria, ao Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente español, à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), à Universidade de São Paulo (USP), pelo patrocínio, desenvolvimento, disponibilização, incentivo e disseminação do SMC-Brasil; e à Fundación Carolina e ao CNPq (Proc. nº 575008/2008-3 e Proc. nº 471068/2008-0) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, R. S. *Morfologia do perfil praial, sedimentologia e evolução histórica da linha de costa das praias da Enseada do Itapocorói – Santa Catarina*. 145 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Itajaí, Brasil, 2008. Disponível em: <http://www6.univali.br/tede/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=479>. Acesso em: 15 jul. 2015.

ARAUJO, R. S.; SPROVIERI, F. C.; FREITAS, D. ; KLEIN, A. H. F. Variação da morfologia praial e identificação de Zonas de Erosão Acentuada (ZEA) na Enseada do Itapocorói – SC. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 14, n. 1, p. 29-38, 2010.

BELLA, M. P. **Caracterização sedimentológica e morfológica da plataforma continental associada às praias de Piçarras e Alegre em Santa Catarina**. 101 p. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Itajaí, Brasil, 2009.

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

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

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC-Brasil**: Documento temático – Recuperação de praias. Brasília: MMA, 2018c.

CERC. **Shore Protection Manual**. Washington. D.C.: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center. U.S. Government Printing Office, 1984.

DEAN, R. G. Equilibrium beach profiles: characteristics and applications. **Journal of Coastal Research**, v. 7, p. 53-84, 1991.

DEAN, R. G. **Equilibrium beach profiles**: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Ocean Engineering Report 12, University of Delaware, 1977. 45 p.

DEL VALLE, R.; MEDINA, R.; LOSADA, M. A. Dependence of coefficient K on grain size. Technical Note n. 3062. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 119, n. 5, p. 568-574, 1993.

GONZÁLEZ, E. M.; MEDINA, R. On the application of static equilibrium bay formulations to natural and man-made beaches. **Coastal Engineering**, v. 43, n. 3-4, p. 209-225, 2001.

GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R.; GONZÁLEZ-ONDINA, J.; OSORIO, A.; MÉNDEZ, F. J.; GARCÍA, E. An Integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 7, p. 916-931, 2007.

HALLERMEIER, R. J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**, v. 4, p. 253-277, 1981.

HOEFEL, F. G. **Diagnóstico da erosão costeira na Praia de Piçarras, Santa Catarina**. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

HSU, J. R. C.; EVANS, C. Parabolic bay shapes and applications. **Proc., Institution of Civil Engineers**, London, England, v. 87, Part 2, p. 556-570, 1989.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS (INPH). **Projeto básico para recuperação das Praias de Piçarras e Penha – Santa Catarina**. Relatório 14/92, Piçarras-900/0. Rio de Janeiro: INPH, 1992.

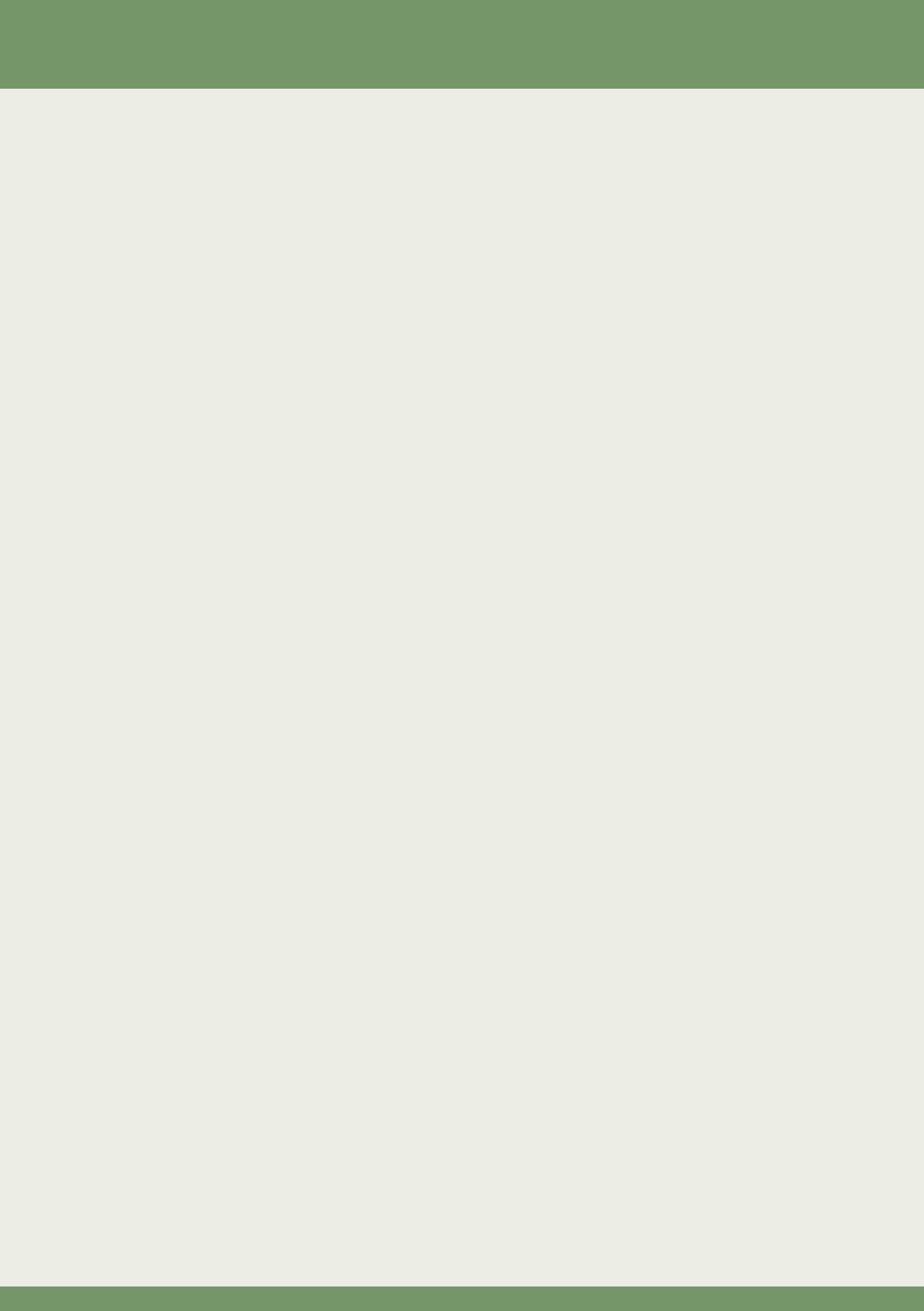
KLEIN, A. H. F.; BENEDET, L.; HSU, J. R. Stability of headland bay beaches in Santa Catarina: a case study. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, v. 35, p. 151-166, 2003.

KLEIN, A. H. F.; ARAUJO, R. S.; POLETTE, M.; SPERB, R. M.; FREITAS, D.; CAMARGO, J. M.; SPROVIERI, F. C.; PINTO, F. T. Ameliorative strategies at Balneário Piçarras Beach–Brazil. In: **Beach Management Guidelines: Principles and Practice**. London, UK: Earthscan Publisher, 2009. p. 241-255.

LEITE, L. M.; DIAS, J. M.; CARVALHOS, J. M. B.; KLEIN, A. H. F. Hydrodynamic study of bay beaches: a case study of Itapocorói Bay, Brasil. **Journal of Coastal Research**, Special Issue, v. 64, p. 1086-1090, 2011.

MARINHA DO BRASIL. Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/dhn/chm/images/cartas/1809.html>>. Acesso em: 18 out. 2012.

- MUÑOZ-PÉREZ, J. J. **Análisis de la morfología y variabilidad de playa apoyadas en lajas rocosas.** 221 p. Tese (Doutorado) – Universidad de Cádiz, Departamento de Física Aplicada, Cádiz, 1996. Disponível em: <<http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/15374/Tesis%20Sept.1996.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 jul. 2015.
- NAKAO, L. T. H. **Identificação de Bypassing sedimentar entre as praias de enseada utilizando sonar de varredura lateral e perfil sedimentológico.** Caso de Estudo: Enseada do Itapocorói-SC. 80p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Itajaí, Brasil, 2012. Disponível em: <<http://siaibib01.univali.br/pdf/Lais%20Thie%20Hasuda%20Nakao.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2015.
- OLIVEIRA, J. G. **Modelagem numérica das respostas do perfil praial a eventos extremos em praias de enseada:** estudo de caso da Enseada do Itapocorói, Santa Catarina, Brasil. 162 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <<http://deolhonastempestades.ufrgs.br/deolhonastempestades/index.php/component/gsportal/?task=bibliografias.downloadBibliografia&id=5>>. Acesso em: 18 jul. 2015.
- PAIM, J. B. **Avaliação do potencial de produção de sedimento na Bacia Hidrográfica do Rio Piçarras utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 107 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) – Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Itajaí, Brasil, 2012. Disponível em: <http://www6.univali.br/tede/tde_arquivos/6/TDE-2012-05-31T142556Z-887/Publico/Jean%20Berna%20Paim.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2015.
- PREFEITURA DE PIÇARRAS. Notícia de 24 maio 2012. Disponível em: <<http://picarras.sc.gov.br/conteudo/?item=7398&fa=1&cd=138440>>. Acesso em: 1 nov. 2012a.
- PREFEITURA DE PIÇARRAS. Notícia de 03 ago. 2012. Disponível em: <<http://www.picarras.sc.gov.br/conteudo/?item=7398&fa=1&cd=143853>>. Acesso em: 4 dez. 2012b.
- SILVEIRA, L. F.; KLEIN, A. H. D. F.; TESSLER, M. G. Headland-bay beach planform stability of Santa Catarina State and of the Northern Coast of São Paulo State. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. 2, p. 101-122, 2010.
- TESSLER, T. M. **Esquematização do clima de ondas da Bacia de Santos para modelagem numérica de morfologia costeira em escalas temporais de meses a anos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar, Itajaí, Brasil, 2010.



ALTURA DE ONDAS, *RUNUP* E COTA DE INUNDAÇÃO NAS PRAIAS DA BARRA DA LAGOA E MOÇAMBIQUE – FLORIANÓPOLIS (SC) – COM BASE EM SÉRIES DE DADOS DE 60 ANOS DE REANÁLISE

Paula Gomes da Silva
Antonio Henrique da Fontoura Klein
Omar Quetzalcóatl Gutiérrez
Mauricio González

RESUMO

Este trabalho apresenta a análise de altura de onda, *runup* e cota de inundação ao longo das praias de Moçambique e Barra da Lagoa. Os dados foram obtidos a partir de propagações da série de 60 anos de dados de reanálise de onda da base de dados do SMC-Brasil até águas rasas utilizando o modelo OLUCA-SP. Com base nas séries propagadas, o *runup* foi calculado com formulação adaptada para praias de enseada. Em seguida, para obtenção da cota de inundação, a esses valores foram somados os valores de maré astronômica e maré meteorológica. A partir dessa série foram obtidos os valores de cota de inundação associados a três cenários de regime extremo: período de retorno (PR) de 5, 25 e 50 anos. Então, foram somados os valores de elevação do nível médio do mar previstos para cada um dos cenários. Observam-se maiores valores de H_s na porção central da praia, correspondente à

zona mais exposta à ação das ondas, com média de 1,71 m e PR50 igual a 4,22 m. As estatísticas de *runup* também indicam maiores valores na parte central do sistema praial (média de 1,43 m e PR50 de 2,23 m). Valores médios de cota de inundação apresentaram o mesmo padrão demonstrado nas análises de H_s e *runup*, com maiores valores sendo observados na zona mais exposta da praia. Nessa zona, o valor de cota de inundação apresentado para períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos foi de 2,68, 2,93 e 3,0 m respectivamente.

Palavras-chave: Propagação de ondas. *Runup*. Cota de inundação. SMC-Brasil.

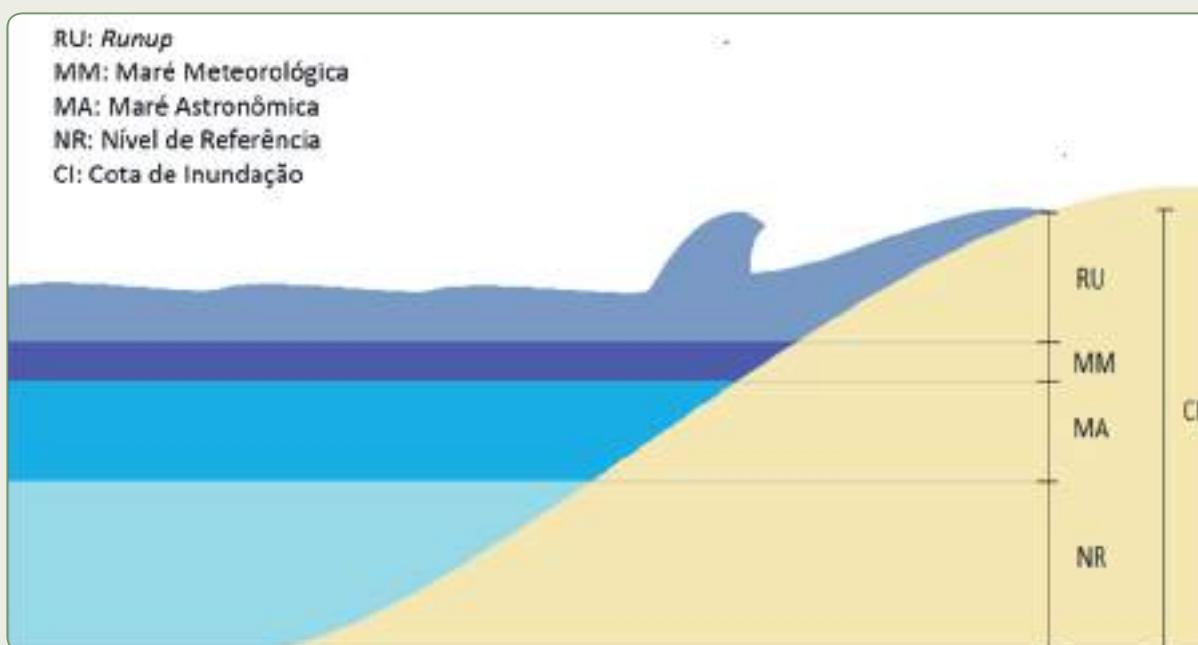
INTRODUÇÃO

O desenvolvimento rápido e desordenado das cidades localizadas junto à costa submete a população a uma série de riscos relacionados à dinâmica dos processos que determinam e modificam as feições costeiras (SIMÓ; HORN FILHO, 2004), como aqueles riscos relacionados à inundação decorrente de eventos extremos de tempestade, conhecidos popularmente por “ressacas”.

As ressacas são o resultado da elevação do nível da água oceânica induzida pela ação de ventos e gradientes de pressão (maré meteorológica), somada à ação das ondas (CARTER, 1988). Tal fenômeno está relacionado aos principais perigos naturais que atingem a população costeira (NICHOLLS; SMALL, 2002), especialmente quando sua ocorrência coincide com preamares de sizígia.

Esses fatos têm motivado a realização de estudos com enfoque no cálculo da inundação costeira (CHEUNG et al., 2003; BONETTI et al., 2012; CARRASCO et al., 2012, DALINGHAUS et al., 2013; VILLATORIO et al., 2014). O cálculo da chamada cota de inundação, por exemplo, é uma forma bastante aceita e utilizada para representar tal fenômeno. Trata-se da soma de quatro variáveis: i) nível médio do mar, ii) maré astronômica, iii) maré de tempestade e iv) *runup* (*setup* + espraiamento) (Figura 14.1) (DALINGHAUS et al., 2013; VIEIRA DA SILVA, 2012; BRASIL, 2018a; HOLTHUIJSEN, 2007; MEDINA; MENDEZ, 2006).

Figura 14.1 – Componentes da cota de inundação



Fonte: Dos autores (2018).

Séries longas de cota de inundação permitem a obtenção de valores críticos a partir da análise de regime extremo, valores estes comumente utilizados como base para o planejamento territorial e a gestão da zona costeira (TANK et al., 2009). Medina e Méndez (2006), por exemplo, apresentaram uma análise do regime extremo de cota de inundação com base em dados de boias e marégrafos ao longo de toda a costa da Espanha. Mais recentemente, um trabalho da Comissão Econômica para América Latina e Caribe da ONU (CEPAL-ONU, 2011) apresentou um estudo de tendências e dinâmicas decorrentes das mudanças climáticas para a América Latina e Caribe. Resultados como tendências de cota de inundação, elevação do nível médio do mar e dinâmicas marinhas, baseados em dados de reanálises, foram apresentados para toda a área estudada em tal projeto.

No Brasil, os problemas relacionados à inundação costeira motivaram a publicação do documento *Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil* (BRASIL, 2018a). Utilizando a base de dados de reanálise do Projeto SMC-Brasil e modelos simplificados de propagação de ondas e cálculo de *runup*, foram geradas séries de cota de inundação e suas análises de regime extremo para toda a costa do país. Os resultados gerados, além de serem utilizados para fins de gestão de território, também são utilizados em fase de pré-desenho de projetos.

Dada a relevância da análise das dinâmicas costeiras em áreas suscetíveis à inundação, o presente trabalho apresenta uma avaliação do regime de ondas, *runup* e cota de inundação ao longo das praias de Barra da Lagoa e Moçambique (Santa Catarina), sistema assolado frequentemente por eventos de ressaca, a partir das séries temporais de 60 anos de reanálise de onda, maré astronômica e maré meteorológica, disponibilizadas pelo Projeto SMC-Brasil (BRASIL, 2018b, 2018c).

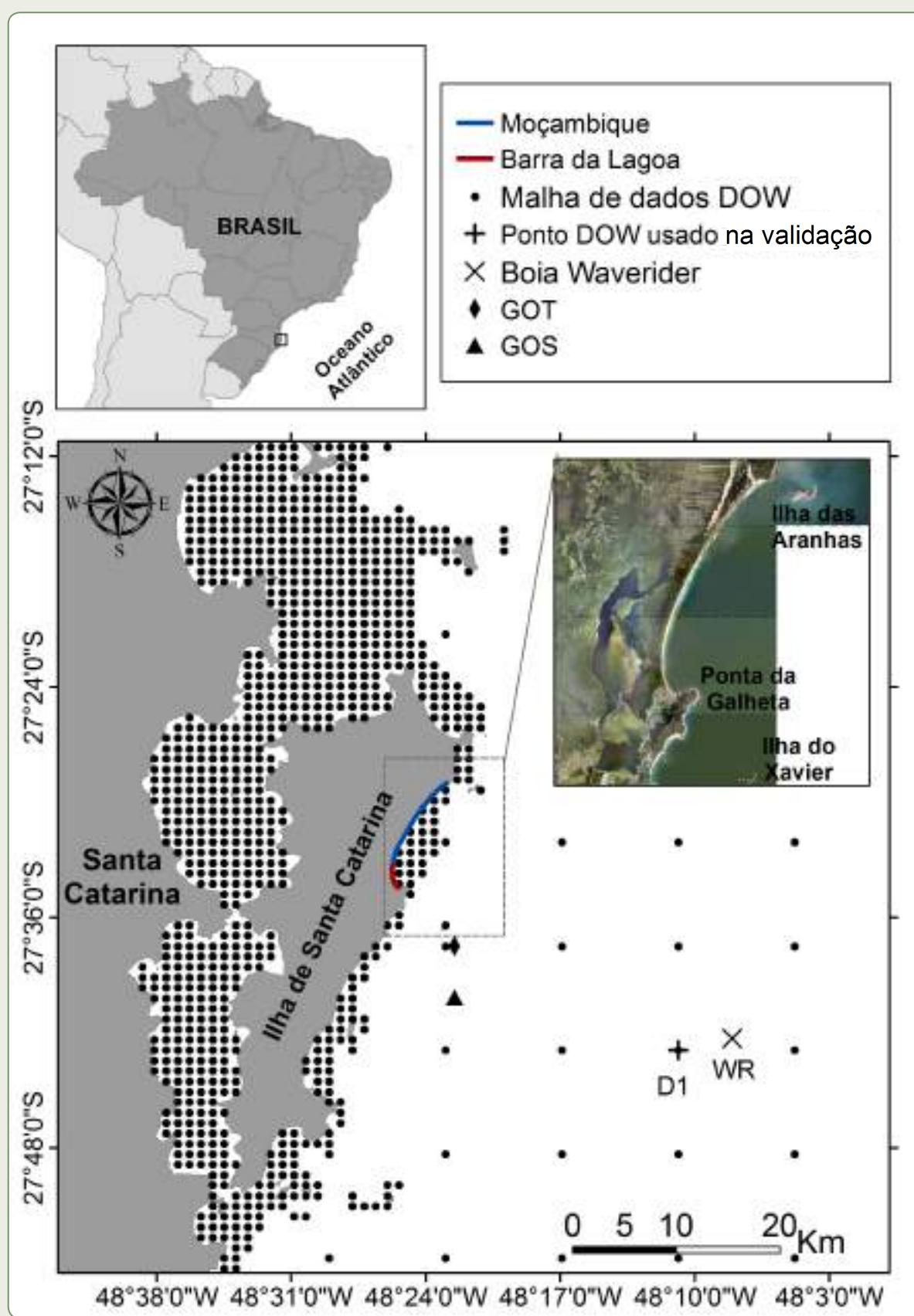
ÁREA DE ESTUDO

Localizadas no nordeste da Ilha de Santa Catarina – Florianópolis (SC) –, as praias da Barra da Lagoa e Moçambique formam juntas um arco praial de 12 km de extensão, com linha de costa orientada para leste-sudeste (ESE). Barra da Lagoa e Moçambique são os nomes dados às porções sul e norte do sistema, respectivamente (Figura 14.2). Trata-se de um sistema praial assolado frequentemente por eventos extremos de ressaca. Maiores danos são verificados principalmente na Praia da Barra da Lagoa, onde a urbanização é mais intensa (SIMÓ; HORN FILHO, 2004).

Características ambientais como granulometria, declividade da face da praia, exposição à energia das ondas e estágio morfodinâmico variam consideravelmente de um setor a outro do arco praial. Sedimentos mais finos são observados nas extremidades da praia chegando a granulometria grossa na porção central (LEAL et al., 2000; HORN FILHO, 2006). Padrão semelhante é observado no que diz respeito às declividades da face ($\tan\beta$) com maiores valores na parte central da praia (chegando a valores 0,17) e mínimos nos extremos (menores valores na zona sul da praia, aproximadamente 0,02) (MULER et al., 2013). Silveira, Klein e Tessler (2011), através de análises de imagens de satélite classificaram a praia como intermediária, enquanto Miot da Silva (2006), tomando como base a granulometria e a hidrodinâmica local, identificou, na porção norte, o estágio intermediário, alcançando o estágio dissipativo na porção sul da praia.

A região em que está inserida a Ilha de Santa Catarina é caracterizada por um regime de micromaré, predominantemente semidiurno, com desigualdades diurnas. A elevação de maré de sínódio varia de 0,46 a 1,06 m (KLEIN, 2004). Já os valores médios das elevações (positivas) decorrentes de fatores meteorológicos chegam a 1 m (TRUCCOLO; FRANCO; SCHETTINI, 2006).

Figura 14.2 – Localização da área de estudo e malha de pontos DOW, GOT e GOS disponíveis para a região da Ilha de Santa Catarina



Fonte: Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (2010).

O clima de ondas na plataforma de Santa Catarina apresenta características bimodais, sendo dominado por ondulações de nordeste e sul (ARAUJO et al., 2003; SIGNORIN, 2010). Franco e Melo Filho (2008) demonstraram a importância dos mares secundários na região, com quase 32% dos estados de mar sendo representados por condições bimodais. Araujo et al. (2003) verificaram sazonalidade nas alturas de onda no decorrer do ano, observando maiores valores de H_s (altura significativa de onda) no inverno, estação em que as ondulações predominantes têm direção de sul. Ondas de direção sul também são predominantes no outono, enquanto nas estações de verão e primavera predominam as ondulações de nordeste. Os períodos e alturas significativas mais frequentes no local ficam entre 8-10 s e 1-1,5 m, respectivamente (MIOT DA SILVA; MOUSAVI; JOSE, 2012). Valores extremos de altura significativa estão relacionados principalmente a ondulações provenientes do quadrante S-E, chegando a atingir valores de altura individual de 13 m ($H_s = 6$ m) (MELO FILHO, HAMMES; FRANCO, 2006). Essas ondulações atingem diretamente as praias analisadas, já que elas se encontram em grande parte de sua extensão orientadas para SE.

MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia do estudo consistiu em cinco fases principais: 1) propagação de dados de reanálise até a área de estudo; 2) setorização da praia de acordo com o grau de exposição às ondas; para cada setor calculou-se então o 3) *runup* e 4) a cota de inundação instantânea (sem considerar o nível médio do mar (NMM)); 5) por fim, realizou-se a análise de regime extremo da cota de inundação instantânea, da qual foram obtidos os valores de período de retorno de 5, 25 e 50 anos, que foram somados à elevação do nível do mar prevista para cada um desses cenários (5, 25 e 50 anos). Optou-se por trabalhar com tais cenários para representar diversas escalas temporais sem exceder o período total da série de dados (60 anos), gerando resultados consistentes com base em métodos probabilísticos. A Figura 14.3 mostra um esquema da metodologia aplicada no presente estudo. A descrição detalhada de cada uma das etapas está apresentada a seguir.

Figura 14.3 – Metodologia aplicada



Fonte: Dos autores (2018).

Bases de dados

Dados de onda (DOW)

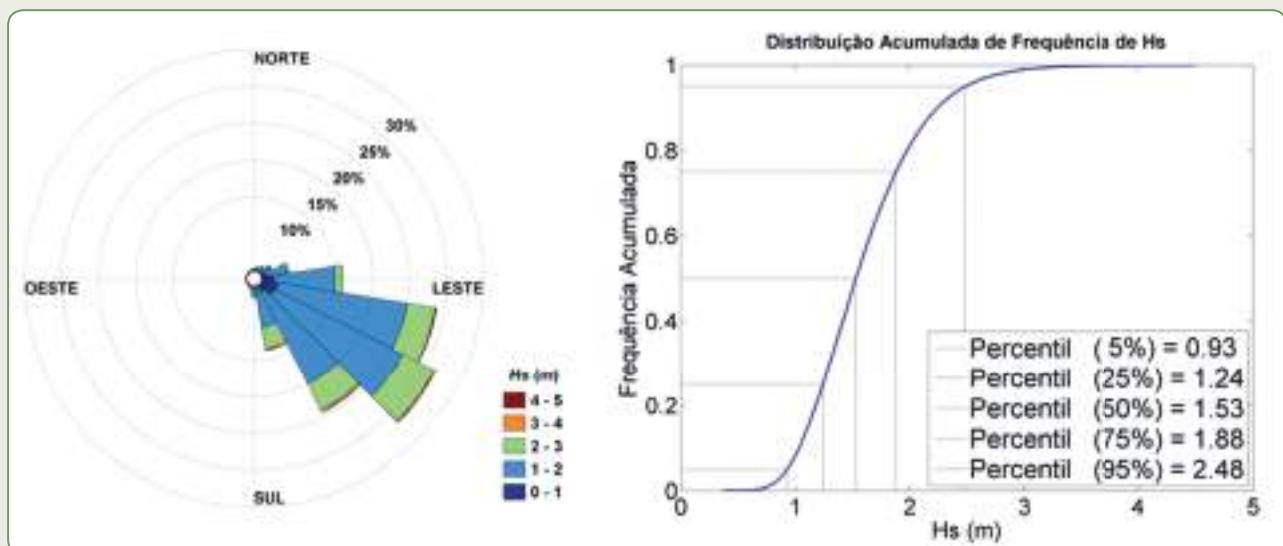
A base de dados DOW (*Downscaled Ocean Waves*) da costa brasileira foi gerada dentro do âmbito do Projeto SMC-Brasil. Trata-se de dados de onda ao longo de toda a costa brasileira com alta resolução espacial (1 km, de 0 a 20 m de profundidade, e 10 km, a partir de 20 m de profundidade (Figura 14.2)) e temporal (1 hora) para um período total de 60 anos (1948-2008). Os parâmetros compreendidos na base de dados são altura significativa de onda (H_s), período médio (T_m), período de pico (T_p), direção média de onda (θ_m), direção de pico (θ_p), espalhamento direcional e espectro de energia (BRASIL, 2018b).

As séries temporais foram geradas em duas etapas principais: i) em um primeiro momento, uma reanálise global foi realizada com o modelo *WaveWatch III*, na versão 2.22 (TOLMAN, 1991), utilizando dados de ventos globais (Reanálise 1 – NCEP/NCAR), gelo (NCEP/NCAR) e batimetria da base GEBCO como dados de entrada, o que resultou em parâmetros de onda para todo o globo (*Global Ocean Waves – GOW*) (REGUERO et al., 2012); ii) a seguir, o modelo SWAN (BOOIJ; HOLTHUIJSEN; RIS, 1999) foi utilizado para realizar um *downscaling* propagando os dados da base GOW até a costa brasileira com base em batimetrias GEBCO e cartas náuticas, e em dados de ventos (Reanálise 1 – NCEP/NCAR) (BRASIL, 2018b; CAMUS et al., 2013).

Gomes da Silva et al. (2015) validaram a base de dados DOW para a costa catarinense. A validação consistiu na comparação de quantis da distribuição de Gumbel de Máximos de 10 meses de dados de um ponto da base DOW (D1) com os dados de uma boia *Waverider* (WR), situada a 80 m de profundidade a uma distância de 35 km da costa (Figura 14.2). Com base em parâmetros estatísticos (RMSE de 0,02 e 2,57 e BIAS de 0 e 2,53 para H_s e T_p respectivamente), constatou-se que as séries simuladas representam bem os dados medidos em campo, especialmente com relação aos valores de H_s .

A série de 60 anos de dados de ondas do ponto D1 foi utilizada no presente estudo para propagação até a área de estudo. A Figura 14.4 apresenta a rosa de ondas e a distribuição acumulada de frequência dessa série temporal.

Figura 14.4 – Dados ponto D1: rosa direcional e distribuição acumulada de frequência de H_s



Fonte: Dos autores (2018).

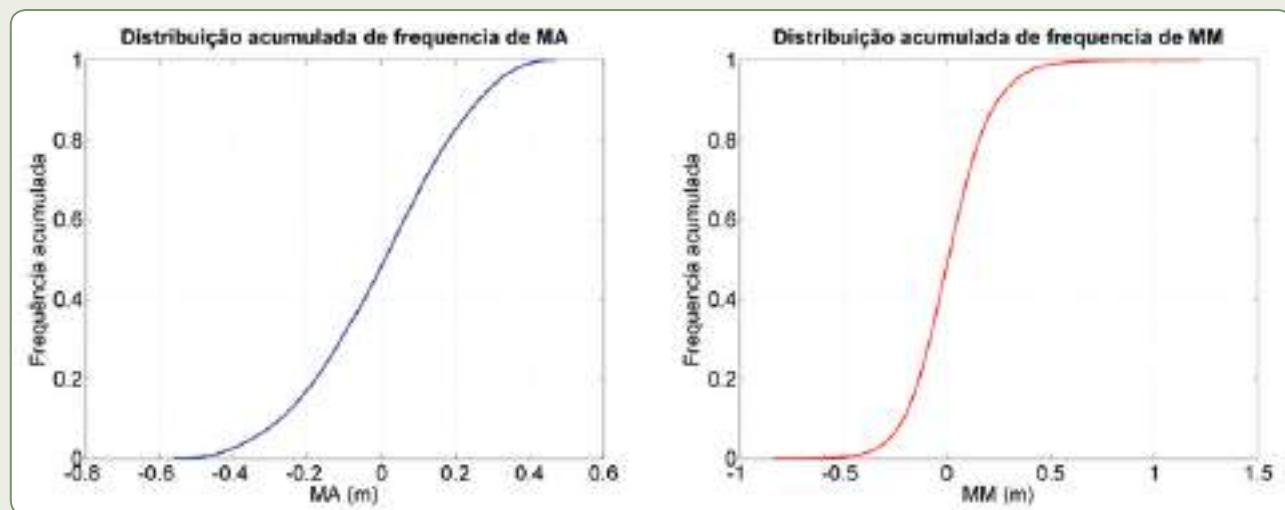
Dados de maré astronômica (GOT)

A base de dados de maré astronômica – *Global Ocean Tide* (GOT) – do SMC-Brasil consiste em 60 anos de dados-horários de elevação do nível do mar resultantes das forças de atração do sistema Terra-Lua-Sol (1948-2008). Essa base foi gerada a partir de constantes harmônicas do modelo global de maré TPXO (EGBERT; BENNETT; FOREMAN, 1994; EGBERT; EROFEEVA, 2002). O TPXO gera constantes harmônicas em todo o globo a partir da assimilação de dados altimétricos de satélite em um modelo hidrodinâmico (BRASIL, 2018c). A série temporal de um dos pontos da malha da base de dados GOT (Figura 14.2) na costa catarinense foi utilizada neste trabalho. A distribuição acumulada de frequência da série para a zona de estudo está apresentada na Figura 14.5. Valores máximos de elevação apresentados na série chegam a 0,47 m.

Dados de maré meteorológica (GOS)

A base de dados de maré meteorológica do SMC-Brasil, denominada *Global Ocean Surge* (GOS), consiste em séries temporais horárias de variação do nível do mar decorrente de fatores atmosféricos também para o período de 1948 a 2008. Os dados foram gerados a partir de simulações com o modelo de circulação regional ROMS (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2003, 2005). Dados de batimetria do modelo ETOPO2 (NOAA), pressão ao nível do mar e ventos globais (a 10 m de altura) da Reanálise 1 (NCEP/NCAR) foram os dados utilizados como forçante do modelo. Vinte e quatro pontos distribuídos ao longo da costa brasileira compõem a base de dados GOS do SMC-Brasil (BRASIL, 2018c). A distribuição acumulada de frequência da série de dados GOS para a área de estudo (ver localização do ponto utilizado na Figura 14.2) está apresentada na Figura 14.5. Elevações máximas decorrentes da maré meteorológica chegam a atingir 1,22 m.

Figura 14.5 – Distribuição acumulada de frequência das séries de maré astronômica e maré meteorológica das bases GOT e GOS



Fonte: Dos autores (2018).

As bases de dados GOT e GOS foram validadas com dados de marégrafos ao longo de toda a costa do país. Detalhes da geração e validação dos dados podem ser verificados em Brasil (2018c).

Dados de nível médio do mar (CEPAL)

Para o cálculo final da cota de inundação, foram utilizados valores de estimativas apresentados no documento da CEPAL-ONU (2011). De acordo com tal estudo, a taxa de elevação linear do nível médio do mar é de 2 mm/ano na costa sul do Brasil. O mesmo estudo indica ainda que essa elevação vem sofrendo uma aceleração global nas últimas décadas correspondente a 0,0083 mm/ano². Com base nisso, os valores adotados para o cálculo em 5, 25 e 50 anos estão apresentados no Quadro 14.1.

Quadro 14.1 – Valores de nível do mar adotados para o cálculo da cota de inundação

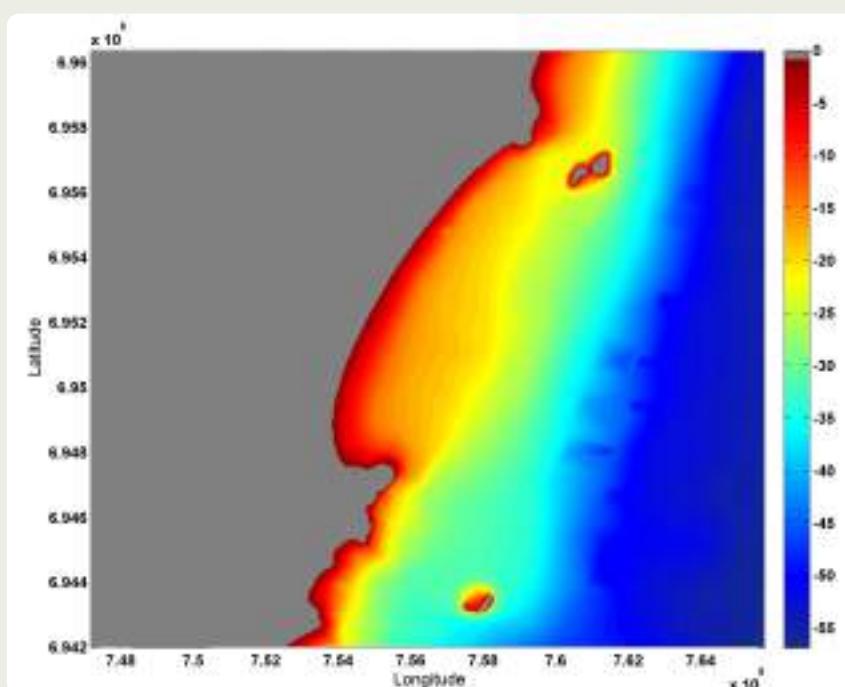
Cenário	Elevação do nível do mar (m)
5 anos	0,01
25 anos	0,05
50 anos	0,1

Fonte: CEPAL-ONU (2011).

Batimetria e declividade da face da praia

Dados de batimetria da base de dados do SMC-Brasil foram utilizados para a propagação de ondas até a costa. Trata-se de dados digitalizados de cartas náuticas e folhas de bordo da DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil). Tais dados estão referenciados conforme a altimetria da DHN (nível médio das baixamaras de sizígia). Na falta de uma batimetria de detalhe, e a fim de evitar instabilidades do modelo, foi realizado o processamento da batimetria através da inserção de pontos de profundidade onde os dados se apresentaram escassos. A batimetria final utilizada nas propagações está apresentada na Figura 14.6.

Figura 14.6 – Batimetria da área de estudo



Fonte: Dos autores (2018).

Já os valores de declividade da face foram disponibilizados pelo Laboratório de Oceanografia Costeira da UFSC e utilizados na etapa de cálculo do *runup*.

Setorização da praia

O cálculo do *runup* proposto por Vieira da Silva (2012) (explicado em detalhe mais adiante) é realizado com formulação diferente para cada setor de uma praia de enseada, de acordo com a exposição do setor às ondas incidentes. Dessa forma, a área de estudo deste trabalho foi dividida em três setores e, de acordo com a exposição de ondas em cada um deles, o *runup* foi calculado.

A setorização foi realizada com base em dados de H_s e declividade da face ao longo de toda a praia. Para isso, foi necessário um processo realizado em quatro etapas:

- 1) três estados de mar extremos ($H_s > 3$ m) representativos do mar local (optou-se por utilizar valores reais das séries de reanálises) de distintas direções (S, E e N) foram propagados até a área de estudo;
- 2) valores de H_s foram obtidos em pontos equidistantes ao longo de toda a praia em profundidade aproximada de 5 m;
- 3) valores de declividade da face foram obtidos para pontos da praia correspondentes a cada ponto de onda (pontos na costa mais próximos aos pontos de ondas);
- 4) os valores das “quatro variáveis” ($H_s S$, $H_s E$, $H_s N$ e declividade da face) foram representados graficamente e, a partir de uma análise visual, foram determinados os três setores e o grau de exposição de cada um deles.

Propagação de ondas

Para a propagação de ondas até a costa, foi utilizada a metodologia proposta por Camus et al. (2013) e recomendada para utilização no projeto SMC-Brasil. Essa metodologia consiste na seleção de casos da série de ondas em águas intermediárias, propagação dos casos selecionados até águas rasas e reconstrução da série temporal nos pontos de interesse. Para que se tenha em conta o nível do mar nas propagações, os casos selecionados devem ser propagados em dois níveis distintos: baixamar e preamar. Após a reconstrução das séries, elas são então interpoladas ao nível (MA + MM) real de cada estado de mar.

Os dados do ponto DOW D1 (Figura 14.2) foram utilizados nas propagações. Da série temporal do ponto D1 foram desconsiderados no processo de seleção os casos com direção provenientes do continente ($0^\circ < \theta_m < 190^\circ$). A seguir, na impossibilidade de propagar todos os casos da série (alto custo computacional), foi necessária a seleção de uma subamostra de estados de mar representativos para serem propagados. Com base nessa subamostra, as séries foram reconstruídas posteriormente nos pontos de interesse em águas rasas. Detalhes de cada uma dessas etapas estão descritos a seguir.

Seleção de casos a propagar

A seleção dos casos de ondas foi realizada através da técnica MaxDiss (Máxima Dissimilaridade) proposta por Camus, Mendez e Medina (2011). De acordo com testes realizados pelos autores, após um N amostral igual a 100, os erros referentes à seleção passam a ser pouco representativos. Dessa forma, foram selecionados 100 casos da série para propagação.

Propagação dos casos selecionados até a costa

Os casos selecionados foram propagados do ponto D1 até a costa. Para isso, utilizou-se o modelo OLUCA-SP.

Modelo OLUCA-SP

O modelo OLUCA-SP faz parte do Sistema de Modelagem Costeira (SMC), desenvolvido pelo Instituto de Hidráulica da Cantabria (IH-Cantabria) (GONZÁLEZ et al., 2007). Na simulação o modelo possibilita a propagação de ondas espectrais (SP) calculando os processos de empinamento, refração, difração e dissipação por quebra. A discretização espacial se dá através de um esquema de diferenças finitas.

A equação governante da propagação de ondas desse modelo é a Equação Parabólica da Declividade Suave (*Parabolic Mild Slope*), desenvolvida por Radder (1979), que é uma adaptação da Equação Elíptica da Declividade Suave (BERKOFF, 1972). A aproximação de Radder impõe uma restrição ao modelo parabólico: o modelo não é capaz de propagar ondas com direções maiores que 45° com relação à direção principal de propagação da malha. Dessa forma, para que todos os casos possam ser propagados, é necessária a utilização de distintas malhas com diferentes direções de propagação. Booij (1981) adaptou ainda o modelo de forma a permitir a entrada de ondas com direções de até 50° com relação ao eixo principal da malha. A formulação proposta por este último autor é a utilizada no modelo OLUCA-SP para a propagação das ondas (Eq. 14.1) (BRASIL, no prelo):

$$C_g \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial y} + i(\bar{k} - k)C_g A + \frac{\sigma}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{C_g}{\sigma} \right) A - \frac{i}{2\sigma} \frac{\partial}{\partial y} \left[p \frac{\partial A}{\partial y} \right] - \frac{i\sigma k^2 N |A|^2 A}{2} = 0. \quad (\text{Eq. 14.1})$$

Onde C_g é a celeridade de grupo, A é a amplitude da onda, $p = CC_g$, k é o número de onda e \bar{k} é o número de onda de referência, tomado como a média ao longo do eixo y , e N faz parte do termo não linear e é definido por (Eq. 14.2):

$$N = \frac{\cosh(4kh) + 8 - 2\tanh^2(kh)}{8 \operatorname{senh}^4(kh)} \quad (\text{Eq. 14.2})$$

onde h é a profundidade no ponto do domínio.

Em um trabalho realizado na Praia de Piçarras, litoral centro-norte do estado de Santa Catarina, o modelo foi calibrado com base em dados medidos em campo (OLIVEIRA, 2013).

Malhas de cálculo

As malhas de propagação foram geradas com diferentes ângulos e diferentes resoluções de forma que todos os casos selecionados pudessem ser propagados. No total foram geradas sete malhas para Moçambique/Barra da Lagoa (duas acopladas). As características das malhas de propagação estão apresentadas no Quadro 14.2.

Quadro 14.2 – Descrição das malhas de cálculo

Malha	Origem (WGS84 22S)		Espaçamento (m)		Direção (Nº)
	x	y	x	y	
M1	757178,34	6962430,54	38	38	25
M2	793103,18	6980375,64	200	200	90
M3 (acoplada a M2)	770367,38	6960501,96	491	491	90
M4	780541,79	6946578,76	41	41	155
M5	785723,14	6965633,87	35	35	90
M6 (acoplada a M5)	765530,33	6959229,49	14	17	90
M7	763066,13	6957649,20	10	15	90

Fonte: Dos autores (2018).

Reconstrução da série em águas rasas

Após a propagação dos casos selecionados, as séries foram reconstruídas em águas rasas a 15 m de profundidade em frente a cada um dos setores estabelecidos anteriormente. Para a reconstrução da série, foi utilizada a metodologia RBF (*Radial Basis Function*) (CAMUS; MENDEZ; MEDINA, 2011). Trata-se de uma técnica de interpolação baseada em funções de bases radiais gaussianas. O método consiste em uma soma ponderada de funções básicas radiais simétricas localizadas nos pontos de dados. A série é reconstruída no ponto escolhido em águas rasas, em função dos casos selecionados e dos valores em águas profundas para cada parâmetro de onda.

Os valores de H_s das séries propagadas em nível de baixamar e preamar foram reconstruídos nos pontos de interesse e interpolados ao nível real de cada estado de mar.

Cálculo do *runup*

O cálculo do *runup* em praia é normalmente realizado através de formulações empíricas que relacionam a elevação do *runup* com parâmetros de ondas (H_s e T_p) e a declividade da face da praia (NIELSEN; HANSLOW, 1991; STOCKDON et al., 2006; HOLMAN, 1986). Grande parte das formulações apresentadas até o momento foram obtidas com base em dados de praias oceânicas expostas, sem diferenciar zonas abrigadas de zonas expostas (VOUSDOUSKAS et al., 2009). Tais formulações podem gerar superestimações dos valores de *runup* em praias abrigadas por promontórios (praias de enseada e *pocket beaches*) e ilhas.

Dessa forma, o modelo proposto por Vieira da Silva (2012) foi escolhido para o cálculo do *runup* por ser o único modelo apresentado até o momento para aplicação em praias de enseada, onde se observam variações longitudinais de altura de onda e *runup*.

Modelo empírico Vieira da Silva (2012)

A formulação apresentada por Vieira da Silva (2012) foi obtida a partir da calibração do modelo proposto por Nielsen e Hanslow (1991) (para praias oceânicas) com base em dados medidos de onda (a 15 m de profundidade) e *runup* para uma praia de enseada no litoral centro-norte de Santa Catarina. Em tal modelo, o cálculo do *runup* superado por 2% das ondas ($R_{2\%}$) é realizado de forma diferente para cada setor da praia, de acordo ao grau de exposição que o setor apresenta:

- Setor exposto:

$$R_{2\%e} = 0,601 * R_{2\%Nielsen \text{ e } Hanlow(1991)} + 0,603 \quad (\text{Eq. 14.3})$$

- Setor semiexposto:

$$R_{2\%se} = 0,529 * R_{2\%Nielsen \text{ e } Hanlow(1991)} + 0,421 \quad (\text{Eq. 14.4})$$

- Setor semiprotegido:

$$R_{2\%sp} = 0,195 * R_{2\%Nielsen \text{ e } Hanlow(1991)} + 0,59 \quad (\text{Eq. 14.5})$$

- Setor protegido:

$$R_{2\%p} = 0,269 * R_{2\%Nielsen \text{ e } Hanlow(1991)} + 0,360 \quad (\text{Eq. 14.6})$$

onde

$$R_{2\% Nielsen \text{ e } Hanslow(1991)} = 1,98L \quad (\text{Eq. 14.7})$$

$$L \sim 0,6(H_{s15}L_{15})^{0,5} \tan\beta_F \text{ para } \tan\beta_F > 0,1 \quad (\text{Eq. 14.8})$$

$$L \sim 0,05 (H_{s15}L_{15})^{0,5} \text{ para } \tan\beta_F < 0,1 \quad (\text{Eq. 14.9})$$

Onde $R_{2\%}$ Nielsen e Hanslow (1991) é o *runup* calculado de acordo com a formulação de Nielsen e Hanslow (1991). Na calibração apresentada por Vieira da Silva (2012), H_{s15} e L_{15} são a altura significativa e o comprimento de onda a 15 m de profundidade, e $\tan\beta_F$ a declividade da face da praia.

Cálculo do *runup*

O cálculo do *runup* foi realizado utilizando o modelo proposto por Vieira da Silva (2012). Para tanto, foram utilizados os valores de H_{s15} e L_{15} das séries reconstruídas nos pontos a 15 m de profundidade, e declividade média da face da praia de cada setor. Dessa forma, a série de *runup* ($R_{2\%}$) foi calculada para cada setor da praia.

Cálculo da cota de inundação

As séries de 60 anos de dados de MA, MM e *runup* foram somadas para gerar a série de mesmo tamanho e resolução de CI instantânea (cota de inundação sem considerar a elevação do nível do mar) para cada setor.

$$CI_{inst} = MA + MM + Ru \quad (\text{Eq. 14.10})$$

As séries de cota de inundação instantânea foram ajustadas à distribuição de Gumbel de Máximos utilizando o método de Máximos Anuais, e os percentis para cada cenário (5, 25 e 50 anos) foram obtidos. Por fim, aos valores obtidos na análise de regime extremo somou-se o valor de elevação do nível médio do mar (NM) previsto para 5, 25 e 50 anos:

$$CI_{5\text{ anos}} = NM_{5\text{ anos}} + CI_{inst(PR=5\text{ anos})} \quad (\text{Eq. 14.11})$$

$$CI_{25\text{ anos}} = NM_{25\text{ anos}} + CI_{inst(PR=25\text{ anos})} \quad (\text{Eq. 14.12})$$

$$CI_{50\text{ anos}} = NM_{50\text{ anos}} + CI_{inst(PR=50\text{ anos})} \quad (\text{Eq. 14.13})$$

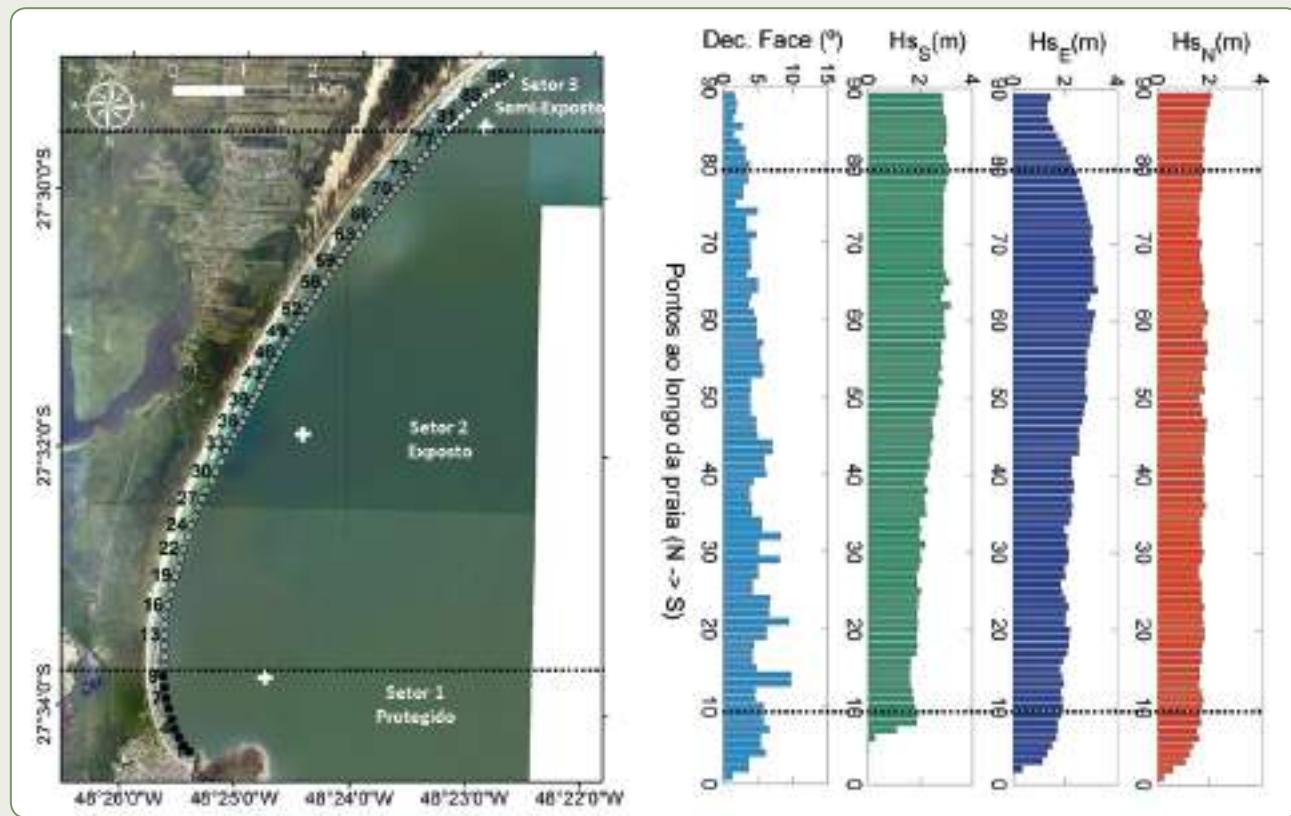
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Setorização da praia

Os valores de H_sS , H_sE , H_sN e declividade da face obtidos nos pontos ao longo da costa estão representados na Figura 14.7. De acordo com os valores apresentados, optou-se por dividir a praia em três setores:

- **Setor 1:** zona com menores valores de H_sS devido à proteção oferecida pela Ponta da Galheta. Além disso é a zona onde se verifica um valor crescente (em direção a norte) de H_sN e declividade da face.
Classificação: Protegido
- **Setor 2:** zona com valores relativamente constantes e altos para todas as variáveis.
Classificação: Exposto
- **Setor 3:** zona onde se verifica uma redução representativa nos valores de H_sE e declividade da face devido à presença da Ilha das Aranhas, o que torna este setor um pouco mais abrigado que o anterior.
Classificação: Semiexposto

Figura 14.7 – Setorização da área de estudo de acordo com o grau de exposição às ondas



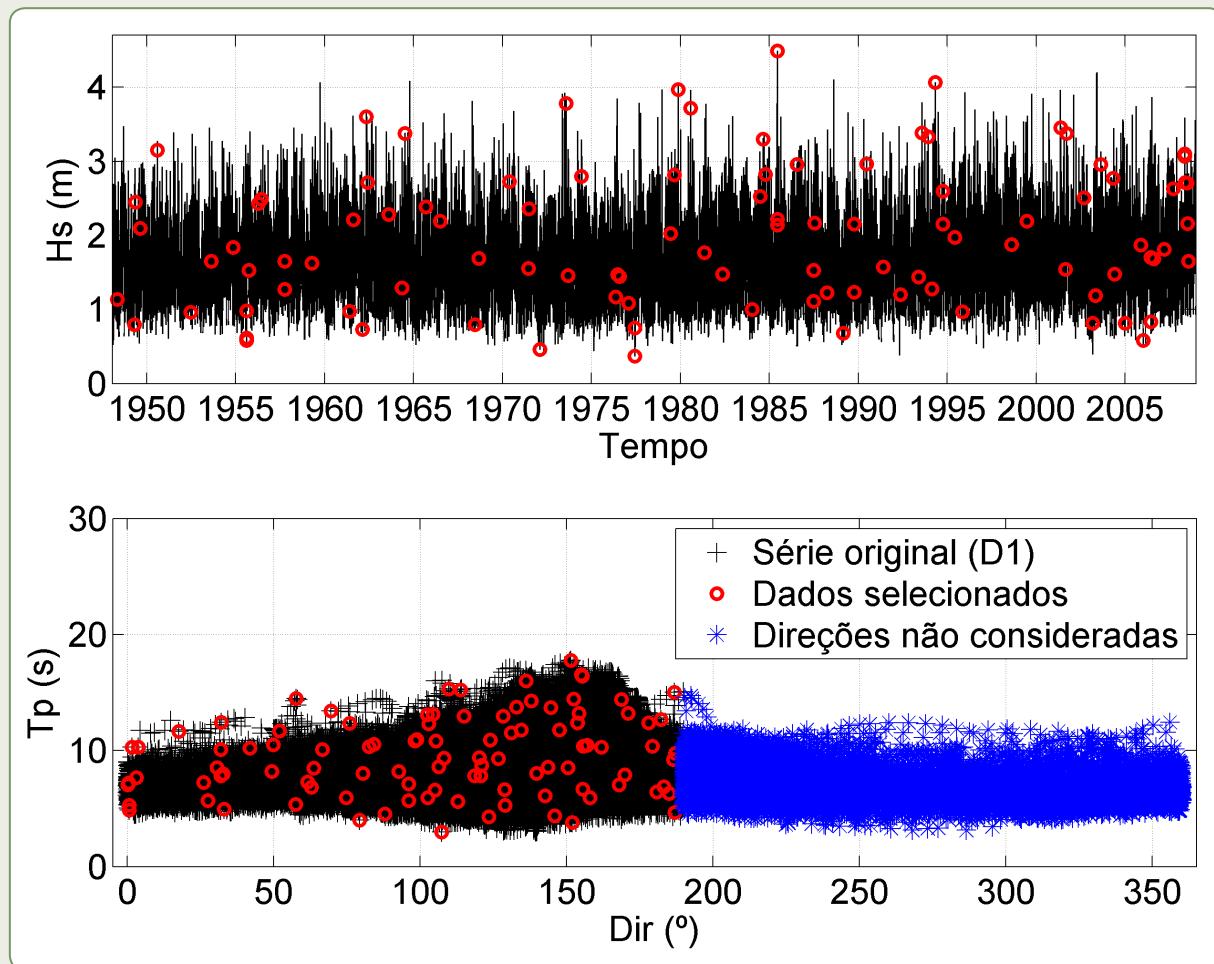
Legenda: Os pontos próximos à linha de costa indicam os pontos de H_s utilizados para a setorização. Nos gráficos à direita, estão representados os valores de cada variável em todos os pontos analisados. As cruzes indicam os pontos a 15 m de profundidade onde foram extraídos os valores de H_s propagados, utilizados para o cálculo do *runup*

Fonte: Dos autores (2018). Foto: Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (2010).

Casos selecionados para propagação

De um total de 533.944 estados de mar da série original, 524.067 foram utilizados no processo de seleção (casos com direção $0^\circ < \theta_m < 190^\circ$). Com base na série já truncada, foram selecionados 100 casos para propagação até águas rasas (Figura 14.8).

Figura 14.8 – Dados do ponto D1



Legenda: Acima, a série completa e os pontos selecionados para propagação; abaixo, os valores de T_p e Dir da série total, os casos desconsiderados provenientes do continente e os casos selecionados para propagação

Fonte: Dos autores (2018).

Análise ao longo da praia

Ondas

O Quadro 14.3 mostra a estatística das séries de H_s nos três pontos a 15 m de profundidade em frente a cada setor da praia. A distribuição acumulada de frequência (regime médio) e a análise de regime extremo de cada setor estão apresentadas na Figura 14.9. As estatísticas de regime extremo (PR5, PR25 e R50) de H_s indicam maiores valores de H_s na porção central da praia (PR50 igual a 4,22 m) quando comparados aos valores de H_s próximos às extremidades do arco praial. Menores valores de H_s (PR50 igual a 3,49 m) são observados no Setor 1 (protegido), e valores intermediários são observados no Setor 3 (PR50 igual a 4,0 m). Os valores extremos de H_s apresentados corroboram a classificação realizada no item “Setorização da praia” deste trabalho, ou seja, maior exposição às ondas foi atribuída ao setor com maiores valores de H_s em regime extremo.

Os valores de regime médio (Figura 14.9), no entanto, mostram um padrão diferente de variação longitudinal, se comparados aos valores obtidos da análise de regime extremo. Nesse caso,

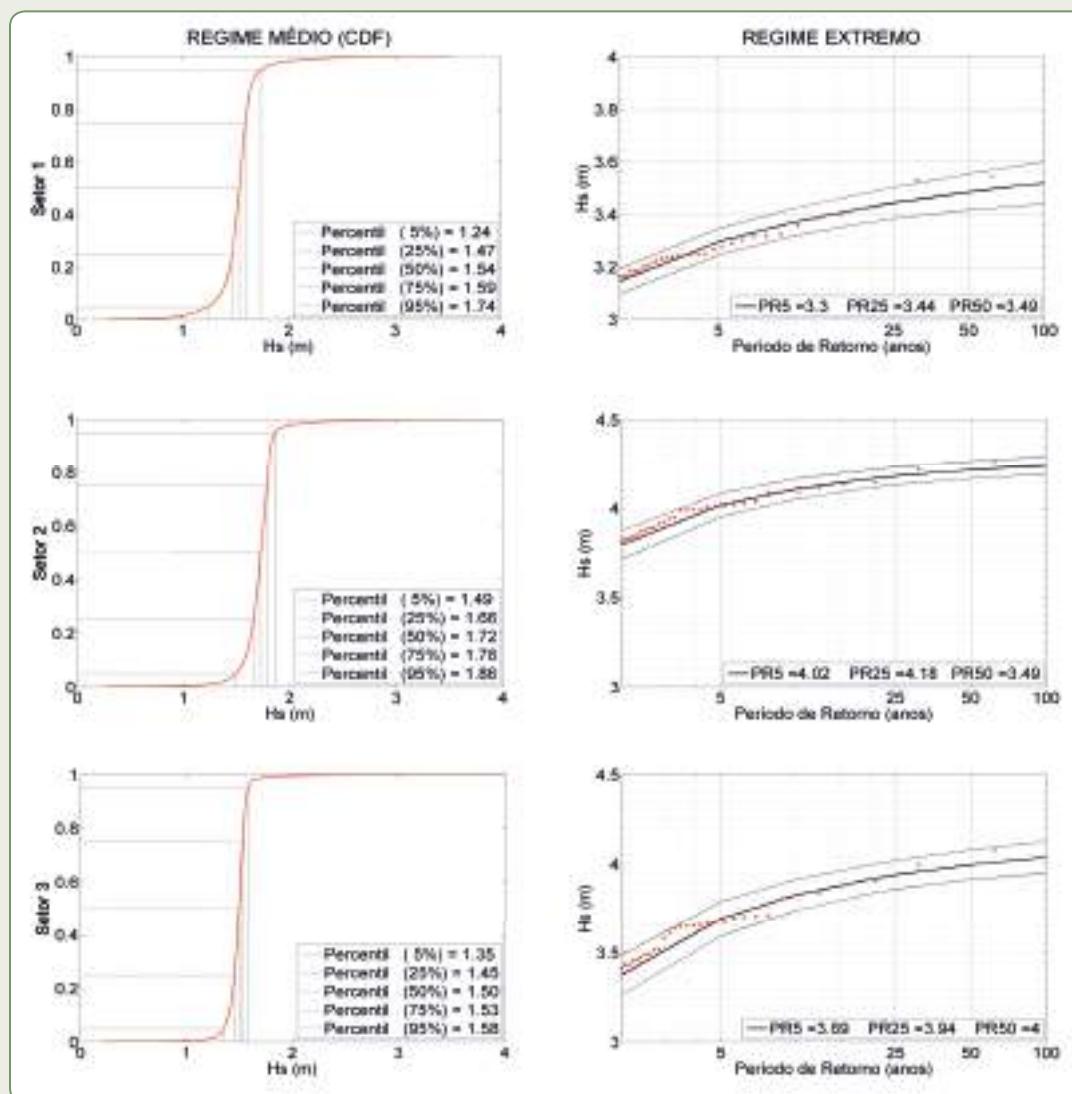
foram observados valores maiores de percentis de H_s no Setor 1 que no Setor 3. Dita diferença sugere que, em regime médio, a exposição às ondas ao longo da praia é diferente e que a classificação adotada não corresponde a tais situações. Como o enfoque do presente estudo é a análise de regime extremo, optou-se por manter a classificação adotada anteriormente.

Quadro 14.3 – Estatística de H_s nos pontos de reconstrução da série de ondas em águas rasas (15 m de profundidade em frente a cada setor) e PR correspondente ao ajuste de regime extremo

H_s (m)						
Setor	Moda	Média	Perc. 50%	PR 5 anos	PR 25 anos	PR 50 anos
1	1,49	1,52	1,54	3,3	3,44	3,49
2	1,70	1,71	1,72	4,02	4,18	4,22
3	1,50	1,49	1,50	3,69	3,94	4,00

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 14.9 – Regime médio (à esquerda) e extremo (à direita) de H_s a 15 m de profundidade em frente a cada um dos setores da praia



Fonte: Dos autores (2018).

Runup

Os valores estatísticos obtidos da série de *runup* ($R_{2\%}$) para cada setor das praias analisadas estão apresentados no Quadro 14.4. Menores valores foram obtidos no setor protegido, enquanto os maiores foram apresentados no setor exposto. O Setor 3, semiexposto, apresentou valores intermediários.

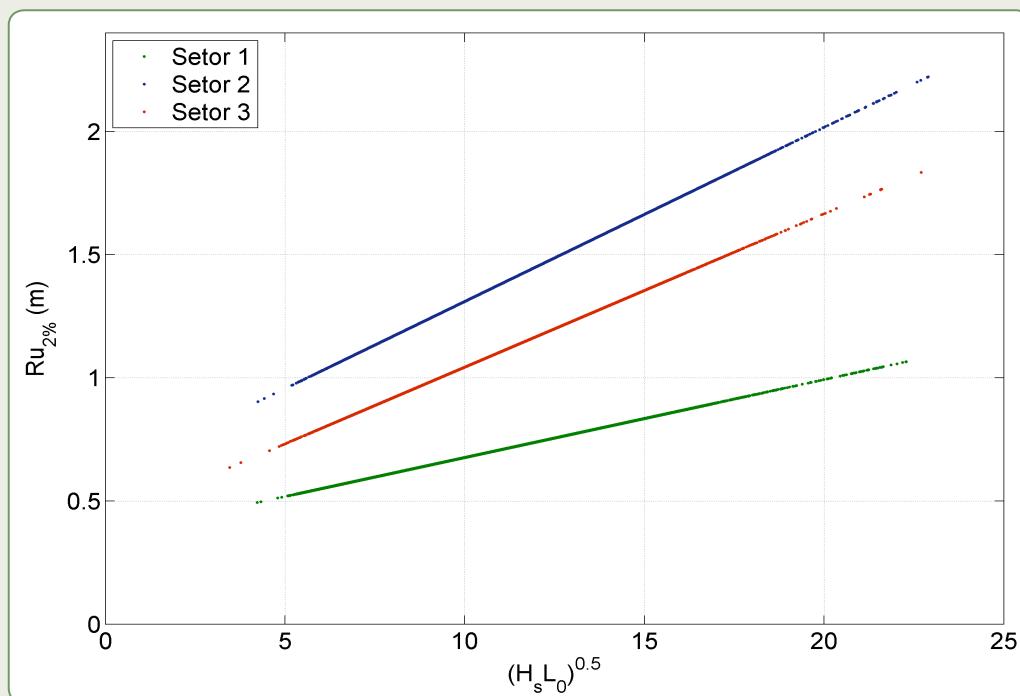
Quadro 14.4 – Estatística das séries de *runup* em cada setor das praias analisadas e PR correspondente ao ajuste de regime extremo

$R_{2\%}(\text{m})$						
Setor	Moda	Média	Perc. 50%	PR 5 anos	PR 25 anos	PR 50 anos
1	0,70	0,71	0,71	1,01	1,19	1,36
2	1,38	1,43	1,43	2,06	2,17	2,23
3	1,06	1,10	1,10	1,63	1,73	1,79

Fonte: Dos autores (2018).

A Figura 14.10 apresenta os valores de $R_{2\%}$ com relação ao parâmetro $(H_s L_0)^{0.5}$ para os três setores da praia. Com base na formulação utilizada se observa a dependência linear entre os parâmetros analisados. No entanto, estudos anteriores baseados em registros obtidos em campo apontam a ocorrência da saturação dos maiores valores de *runup* com relação aos valores de H_s , ou seja, a partir de determinados valores de H_s , as elevações do *runup* não variam (RUGGIERO; HOLMAN; BEACH, 2004; BRYAN; COCO, 2010). Isso ocorre porque o *runup* junto à praia é controlado não só pela energia de ondas incidente, mas também pelos processos que ocorrem dentro da zona de surf, removendo e transferindo energia entre frequências. Nesses casos, formulações do tipo hiperbólicas representariam melhor o processo (VOUSDOUKAS et al., 2009; BRYAN; COCO, 2010).

Figura 14.10 – Valores de $R_{2\%}$ com relação ao parâmetro $(H_s L_0)^{0.5}$ nos três setores da praia



Fonte: Dos autores (2018).

Cota de inundação

A estatística da série de cota de inundação instantânea (cota de inundação sem considerar a elevação do NMM) está apresentada no Quadro 14.5. Os valores de H_s de percentil 50% (regime médio) variaram de 0,72 m no Setor 1 a 1,44 m no Setor 2 e por fim, a 1,12 m no Setor 3.

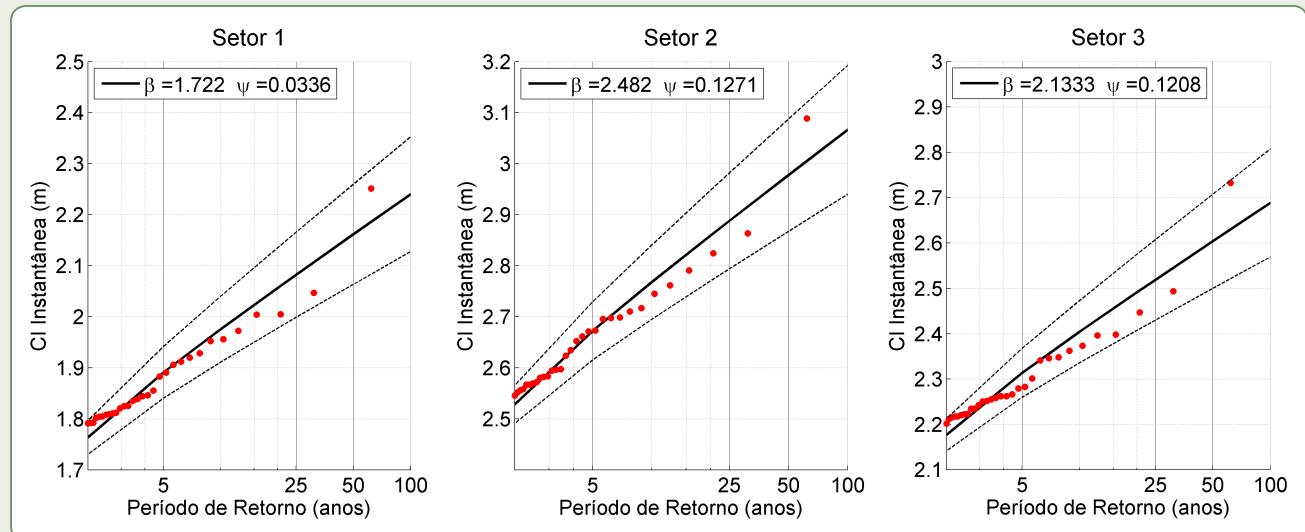
Quadro 14.5 – Estatística das séries de cota de inundação instantânea em cada setor

Cota de inundação instantânea (m)			
Setor	Moda	Média	Perc. 50%
1	0,65	0,72	0,72
2	1,16	1,45	1,44
3	0,97	1,12	1,12

Fonte: Dos autores (2018).

Com base na análise de regime extremo de cota de inundação instantânea (Figura 14.11), foram obtidos os valores de CI para os períodos de retorno de 5, 25 e 50 anos. A estes foram somados os valores de elevação no NM (Quadro 14.1). Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 14.6. Os valores mais extremos, referentes ao período de retorno de 50 anos, variaram de 2,26 a 3,0 m ao longo da praia.

Figura 14.11 – Regime extremo de cota de inundação instantânea (ajuste à distribuição de Gumbel de máximos)



Legenda: β e ψ são os parâmetros de localização e escala da distribuição, respectivamente. A linha pontilhada indica o limite de confiança de 95%

Fonte: Dos autores (2018).

Quadro 14.6 – Valores de período de retorno de CI (m) obtidos para as praias de Moçambique e Barra da Lagoa

Cota de Inundação (m)			
Setor	PR (5)	PR (25)	PR (50)
1	1,90	2,13	2,26
2	2,68	2,93	3,0
3	2,31	2,52	2,60

Legenda: Valores CI_{inst} + NMM de cada cenário

Fonte: Dos autores (2018).

Valores de cota de inundação em regime extremo foram calculados para toda a costa do Brasil em trabalho realizado pelo Projeto SMC-Brasil (BRASIL, 2018a). Os valores de cota de inundação instantânea com período de retorno igual a 5, 25 e 50 anos para o Setor 1 de Moçambique/Barra da Lagoa obtidos no presente estudo e aqueles apresentados em Brasil (2018a) estão demonstrados no Quadro 14.7 para comparação.

Quadro 14.7 – Resultados de CI instantânea obtidos no presente estudo e apresentados em Brasil (2018a) para o Setor 1 de Moçambique/Barra da Lagoa

Cenário	CI Instantânea Setor 1 (m)	
	Presente estudo	BRASIL (2018a)
PR(5)	1,89	3,6
PR(25)	2,09	3,9
PR(50)	2,16	4,0

Fonte: Dos autores (2018).

Como é possível observar, os valores apresentados por Brasil (2018a) para a área de estudo apontam valores aproximadamente duas vezes maiores que estes calculados no presente estudo. Isso se deve ao fato de que o estudo apresentado por Brasil (2018a) teve por objetivo a geração de dados em grande escala ao longo de toda a costa do Brasil e que servem de base para uma análise preliminar em fase de pré-projeto. As diferenças verificadas se devem a três principais causas:

- 1) Base de dados de ondas utilizadas: com o intuito de gerar dados regionais, a base de dados de reanálise de ondas utilizada em Brasil (2018a) foi a base GOW. Diferente da base DOW utilizada no presente estudo, a base GOW não considera os processos de transformação de águas intermediária para águas rasas.
- 2) Método de propagação de ondas utilizado: os valores de cota de inundação apresentados por Brasil (2018a) foram calculados a partir de alturas de ondas propagadas com o método de Snell da refração. Esse método calcula a transformação das ondas ao longo de raios de propagação em que são considerados apenas os processos de refração e empinamento da onda, desconsiderando a difração e a dissipação de energia por atrito e pela quebra, resultando em maiores valores de H_s .

- 3) Método de cálculo de *runup*: o cálculo do *runup* em Brasil (2018a) é realizado com base na formulação proposta por Nielsen e Hanslow (1991) gerada para aplicação em praias expostas, que não é o caso de Moçambique/Barra da Lagoa.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a aplicação de uma metodologia de cálculo de cota de inundação em praias de enseada levando em conta os diferentes graus de exposição às ondas.

Variações no grau de exposição às ondas em regime médio e extremo foram observadas na porção norte do arco praial Moçambique/Barra da Lagoa. Esse fato sugere que um mesmo setor pode apresentar comportamento diferente em análises de regime médio e regime extremo, fato que deve ser levado em consideração nesse tipo de análise.

Cabe advertir, no entanto, algumas limitações da metodologia aplicada:

- Os dados de *runup* utilizados para o cálculo da cota de inundação foram obtidos a partir de propagações de ondas. Para representar de forma real o comportamento das ondas até águas rasas considera-se ideal utilizar dados de batimetria de detalhe. No entanto, tais dados não estavam disponíveis para uso até o momento da realização deste trabalho.
- Não havia disponíveis dados de ondas medidos em águas rasas na área de estudo e, por esse motivo, a validação do modelo não pôde ser realizada. Ainda assim, as validações realizadas por Gomes da Silva et al. (2015) demonstraram o ajuste da base de dados utilizada. Por outro lado, a calibração do modelo OLUCA em uma praia no norte do estado (OLIVEIRA, 2013) mostrou sua eficiência em simular as transformações de ondas na costa catarinense.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério do Meio Ambiente e ao Fundo Clima do Brasil, à Agência Brasileira de Cooperação, e à CAPES (Projeto Rede de Riscos Costeiros – Edital 03/2009) pelo suporte financeiro a esta pesquisa. Este projeto faz parte da Rede Costeira INCT CLIMA.

REFERÊNCIAS

ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, E. Wave regime characteristics of the Southern Brazilian Coast. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES – COPEDEC, 6., *Proceedings...* Colombo, Sri Lanka, 2003. p. 15.

BERKHOFF, J. C. W. Computation of combined refraction-diffraction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 13., *Proceedings...* Vancouver, 1972. p. 471-490.

BONETTI, J.; KLEIN, A. H. F.; MULER, M.; DE LUCA, C. B.; SILVA, G. V.; TOLDO JUNIOR, E. E.; GONZÁLEZ, M. Spatial and numerical methodologies on coastal erosion and flooding risk assessment. In: FINKL, C. (Ed.). *Coastal hazards*. Dordrecht: Coastal Research Library Series, Springer 2012. Chapter 16. (ISBN 978-94-00-5233-7).

- BOOIJ, N. **Gravity waves on water with non-uniform depth and current.** 1981. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Geociências) – Delft University of Technology, Delft, 1981.
- BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H.; RIS, R. C. A third-generation wave model for coastal regions. Part 1: Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2018a.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC:** Documento temático – Ondas. Brasília: MMA, 2018b.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC:** Documento temático – Níveis. Brasília: MMA, 2018c.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Sistema de Modelagem Costeira, SMC:** Manual do usuário – OLUCA-SP. Brasília: MMA, no prelo.
- BRYAN, K. R.; COCO, G. Observations of nonlinear runup patterns on plane and rhythmic beach morphology. **Journal of Geophysical Research**, v. 15, n. C9, 2010. DOI 10.1029/2009JC005721.
- CAMUS, P.; MÉNDEZ, F. J.; MEDINA, R.; TOMAS, A.; IZAGUIRRE, C. High resolution Downscaled Ocean Waves (DOW) reanalysis in coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 72, p. 56-68, 2013.
- CAMUS, P.; MENDEZ, F. J.; MEDINA, R. A hybrid method to downscale wave climate to coastal areas. **Coastal Engineering**, v. 58, p. 851-862, 2011.
- CARRASCO, A. R.; FERREIRA, O.; MATIAS, A.; FREITE, P. Flood hazard assessment and management of fetch-limited coastal environments. **Ocean and Coastal Management**, v. 65, p. 15-25, 2012.
- CARTER, R. W. G. **Coastal environments: an introduction to physical, ecological, and cultural systems of coastlines.** Londres: Academic Press, 1988. 617 p. (ISBN 0-12-161855-2).
- COMISSION ECONÔMICA PARA AMÉRICA LATINA E CARIBE (CEPAL-ONU). **Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe**, 2011. Disponível em: <www.cepal.org/cgi-bin/getProd.asp?xml=/dmaah/noticias/paginas/5/48025/P48025.xml&xsl=/dmaah/tpl/p18f.xsl&base=/dmaah/tpl/top-bottom.xsl>. Acesso em: ago. 2105.
- CHEUNG, K. F.; PHADKE, A. C.; WEI, Y.; ROJAS, R.; DOUYERE, Y. J. M.; MARTINO, C. D.; HOUSTON, S. H.; LIU, P. L.-F.; LYNETT, P. J.; DODD, N.; LIAO, S.; NAKAZAKI, E. Modeling of storm-induced coastal flooding for emergency management. **Ocean Engineering**, v. 30, p. 1353-1386, 2003.
- DALINGHAUS, C.; SILVA, P. G.; MULER, M.; CAMARGO, R. S. V.; PRADO, M. F. V.; BOSE, M. A.; GUTIÉRREZ, O.; GONZÁLEZ, M.; ESPEJO, A.; ABASCAL, A.; KLEIN, A. H. F. Regimes probabilísticos de cota de inundação costeira do Brasil – exemplo de aplicação no arco praial Barra da Lagoa-Moçambique, Florianópolis, SC, Brasil. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM ZONAS COSTEIRAS, 3., *Anais...* 2013, Florianópolis, Brasil. 1 CD-ROM. Sem paginação.
- EGBERT G. D.; EROFEEVA, S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 183-204, 2002.
- EGBERT, G. D.; BENNETT, A. F.; FOREMAN, M. G. G. TOPEX/Poseidon tides estimated using a global inverse model. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, p. 24821-24852, 1994.
- FRANCO, D.; MELO FILHO, E. Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina, SC (2002-2005). In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 3., *Anais...* 2008, Rio Grande, Brasil, 2008. 1 CD-ROM. Sem paginação.
- GOMES DA SILVA, P.; KLEIN, A. H. F.; GONZÁLEZ, M.; GUTIÉRREZ, O.; ESPEJO, A. Performance assessment of the database downscale ocean waves (DOW) on Santa Catarina coast, South Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 2, p. 623-634, 2015.

GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R.; GONZÁLEZ-ONDINA, J.; OSORIO, A.; MÉNDEZ, F. J.; GARCÍA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. *Computers and Geosciences*, v. 33, p. 916-931, 2007.

HOLMAN, R. A. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. *Coastal Engineering*, v. 9, p. 527-544, 1986.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

HORN FILHO, N. Granulometria das praias arenosas da Ilha de Santa Catarina, SC. *Gravel*, n. 4, p. 1-21, 2006.

KLEIN, A. H. F. **Morphodynamics of headland bay beaches**: examples from the coast of Santa Catarina State, Brazil. Tese (Doutorado em Ciências do Mar) – Universidade do Algarve, Faro, 2004. 257 p.

LEAL, P. C.; HORN FILHO, N. O.; OLIVEIRA, J. S. Granulometria do arco praial Moçambique-Barra da Lagoa, Ilha de Santa Catarina, SC – Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE PRAIAS ARENOSAS; MORFODINÂMICA, ECOLOGIA, USOS, RISCOS E GESTÃO, 2000, Itajaí, *Anais...* Itajaí, 2000. p. 166-167.

MEDINA, R.; MÉNDEZ, F. J. Inundación costera originada por la dinámica marina. *Ingeniería y territorio*, v. 74, p. 68-75, 2006.

MELO FILHO, E.; HAMMES, G. R.; FRANCO, D. Estudo de caso: a ressaca de agosto de 2005 em Santa Catarina. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 3., 2006, *Anais...* 2006, Rio Grande, Brasil, 2006. 1 CD-ROM. Sem paginação.

MULER, M.; CAMARGO, R.; PRADO, M. F.; ROCHA, R.; BORGES, M.; BOSE, M.; VIEIRA DA SILVA, G.; GOMES DA SILVA, P.; DALINGHAUS, C.; BONETTI, J.; KLEIN, A. H. F. **Metodologia para quantificação de riscos costeiros e projeção de linhas de costa futuras como subsídio para estudos de adaptação das zonas costeiras do litoral norte da Ilha de Santa Catarina e regiões de entorno**. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS EM ZONAS COSTEIRAS, 3., 2013, Florianópolis, Brasil. 1 CD-ROM. Sem paginação.

NICHOLLS, R. J.; SMALL, C. Improved estimates of coastal population and exposure to hazards released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 83, n. 28, p. 301-305, 2002.

NIELSEN, P.; HANSLOW, D. J. Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, v. 7, n. 4, p. 1139-1152, 1991.

OLIVEIRA, J. G. **Modelagem numérica das respostas do perfil praial a eventos extremos em praias de enseada**: estudo de caso da Enseada do Itapocorói, Santa Catarina, Brasil. 163 p. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

RADDER, A. C. On the parabolic equation method for water-wave propagation. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 95, p. 159-176, 1979.

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

RUGGIERO, P.; HOLMAN, R. A.; BEACH, R. A. Wave run-up on a high-energy dissipative beach. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, n. C6, 2004. DOI 10.1029/2003JC002160.

SEMINÁRIO INTERNACIONAL BRASIL-ESPAÑA: A EXPERIÊNCIA ESPANHOLA E A APLICAÇÃO DO SMC BRASIL NO APOIO À GESTÃO DA COSTA BRASILEIRA, 2., *Resumo executivo...* Brasília: IABS, abr. 2013.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysics Research*, v. 108, n. C3, 2003. DOI 10.1029/2001JC001047.

SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional ocean modeling system: a split-explicit, freesurface, topography following coordinates ocean model. *Ocean Modeling*, v. 9, p. 347-404, 2005.

SIGNORIN, M. Análise e comparação do clima de ondas do norte, centro e sul de Santa Catarina utilizando modelagem numérica. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2010, 167 p.

MIOT DA SILVA, G.; MOUSAVI, S. M. S.; JOSE, F. Wave-driven sediment transport and beach-dune dynamics in a headland bay beach. **Marine Geology**, v. 323-325, p. 29-46, 2012.

MIOT DA SILVA, G.; **Orientação da linha de costa e dinâmica dos sistemas praia e duna: praia de Moçambique**, Florianópolis, SC. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

SILVEIRA, L. F.; KLEIN, A. H. F.; TESSLER, M. G. Classificação morfodinâmica das praias do estado de Santa Catarina e do litoral norte do estado de São Paulo utilizando sensoriamento remoto. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 15, n. 2, p. 13-28, 2011.

SIMÓ, D. H.; HORN FILHO, N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **Gravel**, n. 2, p. 93-103, 2004.

STOCKDON, H. F.; HOLMAN, R. A.; HOWD, P. A.; SALLINGER JUNIOR, A. H. Empirical parametrization of setup, swash and runup. **Coastal Engineering**, v. 53, p. 573-588, 2006.

TANK, A. M. G.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X. Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation. **WMO-TD**, n. 1500, 2009. 56 p.

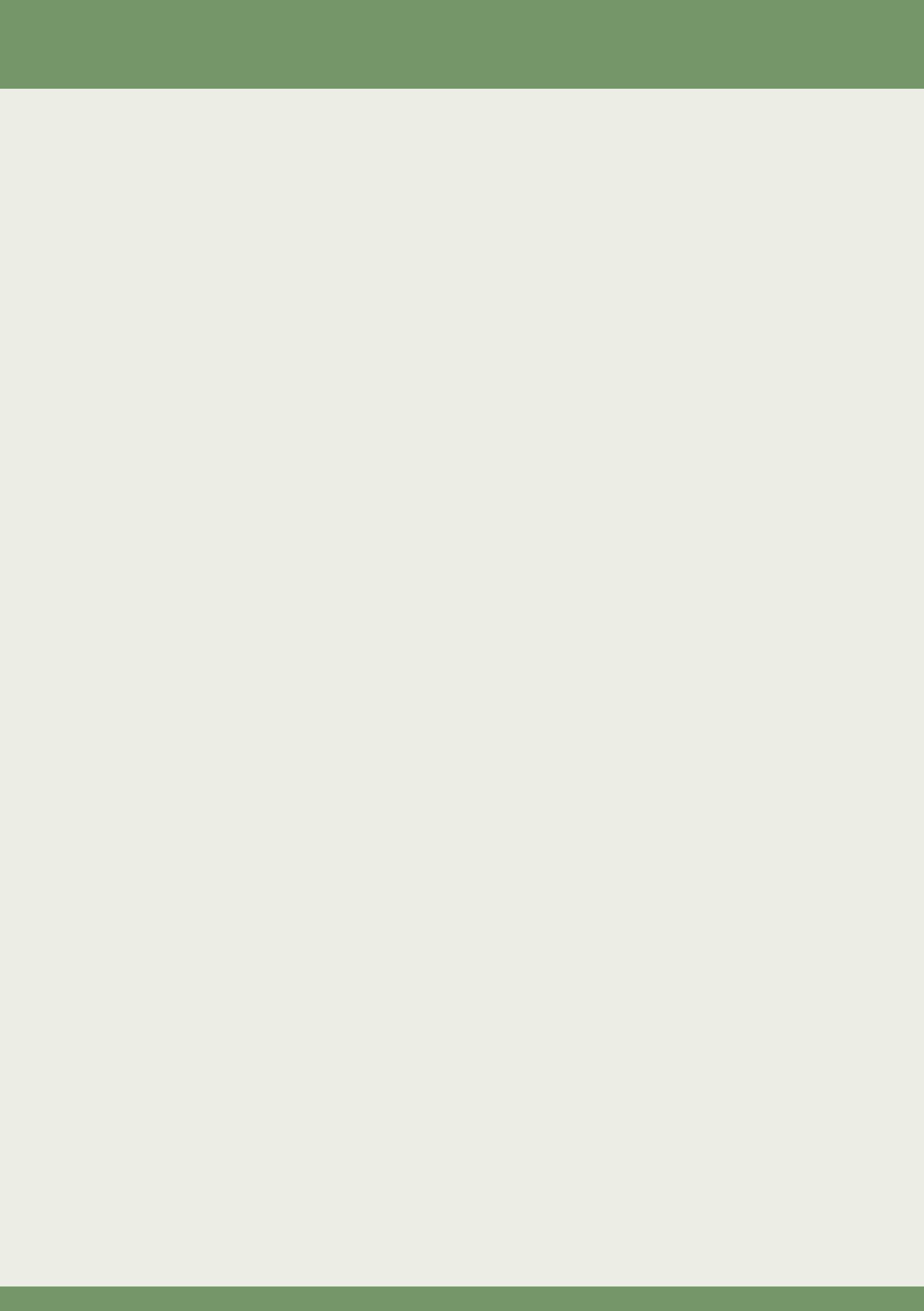
TOLMAN, H. L. A third-generation model for wind waves on slowly varying unsteady and inhomogeneous depths and currents. **Journal of Physical Oceanography**, v. 21, p. 782-797, 1991.

TRUCCOLO, E. C., FRANCO, D.; SCHETTINI, C. A. F. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 39, p. 547-552, 2006.

VIEIRA DA SILVA, G. Cota de inundação e recorrência para a enseada do Itapocorói e praia de Morro dos Conventos, Santa Catarina. 98 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

VILLATORO, M.; SILVA, R.; MÉNDEZ, F. J.; ZANUTTIGH, B.; PAN, S.; TRIFONOVA, E.; LOSADA, I. J.; IZAQUIRRE, C.; SIMMONDS, D.; REEVE, D. E.; MENDOZA, E.; MARTINELLI, L.; FORMENTIN, S. M.; GALIATSATOU, P.; EFTIMOVA, P. An approach to assess flooding and erosion risk for open beaches in a changing climate. **Coastal Engineering**, v. 87, p. 50-76, 2014.

VOUSDOUKAS, M. I.; VELEGRAKIS, A. F.; DIMOU, K; ZERVAKIS, V.; CONLEY, D. C. Wave run-up observations in microtidal, sediment-starved pocket beaches of the Eastern Mediterranean. **Journal of Marine Science System**, v. 78, p. S37-S47, 2009.



ANÁLISE HIDRODINÂMICA E DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS PARA ELABORAÇÃO DE ALTERNATIVAS DE RECUPERAÇÃO DA PRAIA DA ARMAÇÃO DO PÂNTANO DO SUL – FLORIANÓPOLIS (SC)

Rodrigo Barletta
Stephanie Thiesen
Ana Paula Sueli Nicolau
Rafael Bonanata da Rocha
Marcos Aurélio Marques Noronha

RESUMO

Durante os meses de abril e maio de 2010, a Praia da Armação do Pântano do Sul foi submetida a forte agitação marítima gerada por ciclones extratropicais que ocorreram seguidamente. Localizada na costa sudeste de Florianópolis (SC), a praia foi submetida a severa erosão costeira, com perdas de patrimônio público e privado. Com base no contexto apresentado, o presente trabalho teve por objetivo entender e avaliar os processos hidrodinâmicos e de padrões de transporte de sedimentos atuais na praia e, posteriormente, testar soluções de engenharia costeira para a mitigação da erosão e recuperação da praia. As análises foram realizadas com auxílio exclusivo das ferramentas SMC. Inicialmente buscou-se compreender a condição de equilíbrio em planta da praia, utilizando formulações do Modelo Parabólico de Hsu e Evans (1989). Em seguida, o modelo OLUCA, integrante

do módulo MOPLA, foi utilizado para a realização de simulações numéricas de propagação de ondas em águas rasas para três estados de mar representativos para essa praia. Combinando as informações de variação de tamanho de grão na praia aos resultados das simulações, foram obtidas as correntes de deriva, tensões de radiação e a intensidade e direção do transporte de sedimentos para cada cenário oceanográfico. A frequência de ocorrência analisada de cada cenário tornou possível formular um modelo conceitual de comportamento hidrodinâmico e de padrão de transporte de sedimentos da praia. Posteriormente foram testadas numericamente e comparadas alternativas de soluções de engenharia para mitigação da erosão costeira, combinando alimentação artificial de praia com estruturas de contenção de erosão. As alternativas testadas foram: (i) engordamento artificial no setor sul da praia com a construção de um espigão na Ilha das Campanhas, (ii) primeira alternativa combinada a um pequeno espigão na zona de maior erosão costeira e (iii) primeira alternativa combinada a um campo de três quebra-mares destacados no lugar do pequeno espigão. Os resultados apontaram esta última alternativa como a mais eficiente. O uso do SMC mostrou-se assim uma ferramenta efetiva para auxiliar a tomada de decisão.

Palavras-chave: Mitigação da erosão. Recuperação da praia. Processos hidrodinâmicos. Padrões de transporte de sedimentos. SMC. Armação do Pântano do Sul.

INTRODUÇÃO

A zona costeira é constituída por sistemas dinâmicos de interação entre ventos, água e sedimento, resultando em processos hidrodinâmicos, erosivos e deposicionais complexos (BROWN; MCLACHLAN, 1990). A ocupação e o crescimento urbano em direção ao mar, associados ao aumento do nível relativo deste, proporcionam muitos desafios de gestão, uso e ocupação da zona costeira. A ocupação em áreas impróprias, estimulada pelo desenvolvimento de atividades como turismo, transporte, pesca e indústria, tem desencadeado e até acelerado processos erosivos ao longo da costa (WISNER et al., 2004). Praias estão sujeitas à ação erosiva durante eventos de alta energia e a deposições durante períodos de menor energia (KOMAR, 1983). Eventos de alta energia têm como característica a ação conjunta de ondas, correntes e elevação do nível do mar como forçantes de remobilização e transporte sedimentar. Estes eventos aliados à urbanização desordenada fazem com que a grande maioria das praias apresente alguma suscetibilidade à erosão (SIMÓ; HORN, 2004).

Segundo Polette, Souza e Mazzer (1995), no estado de Santa Catarina, onde 68% da população encontra-se na zona costeira, a erosão praial também é um desafio aos gestores, que precisam lidar com os prejuízos econômicos e sociais causados por tal fenômeno. Em abril e maio de 2010, a Praia da Armação do Pântano do Sul sofreu um acelerado processo de erosão devido aos eventos seguidos de ressaca, ocasionados por ciclones extratropicais que se formaram entre o Uruguai e o sul do Brasil. Esses eventos ocasionaram chuvas e ventos intensos, forte agitação marítima caracterizada por estados de mar que persistiram por mais de duas semanas com alturas significativas de onda de até 4 m. O resultado para a orla da Armação foi a erosão, fragilização de encostas, movimentação de massas de terra e destruição de patrimônio privado e público.

Como medida emergencial, em junho de 2010, a Prefeitura de Florianópolis executou uma obra de contenção de erosão na praia. Essa estrutura foi construída na forma de um enrocamento longitudinal que se estende ao longo da área onde a erosão foi mais crítica, trecho de aproximadamente 1.600 m, coincidente com a área de maior concentração demográfica da região. O enrocamento construído no trecho sul da Praia da Armação do Pântano do Sul possui altura máxima de 5 m (Figura 15.1).

Figura 15.1 – Enrocamento construído na área urbanizada da Praia da Armação



Fonte: Dos autores (2018).

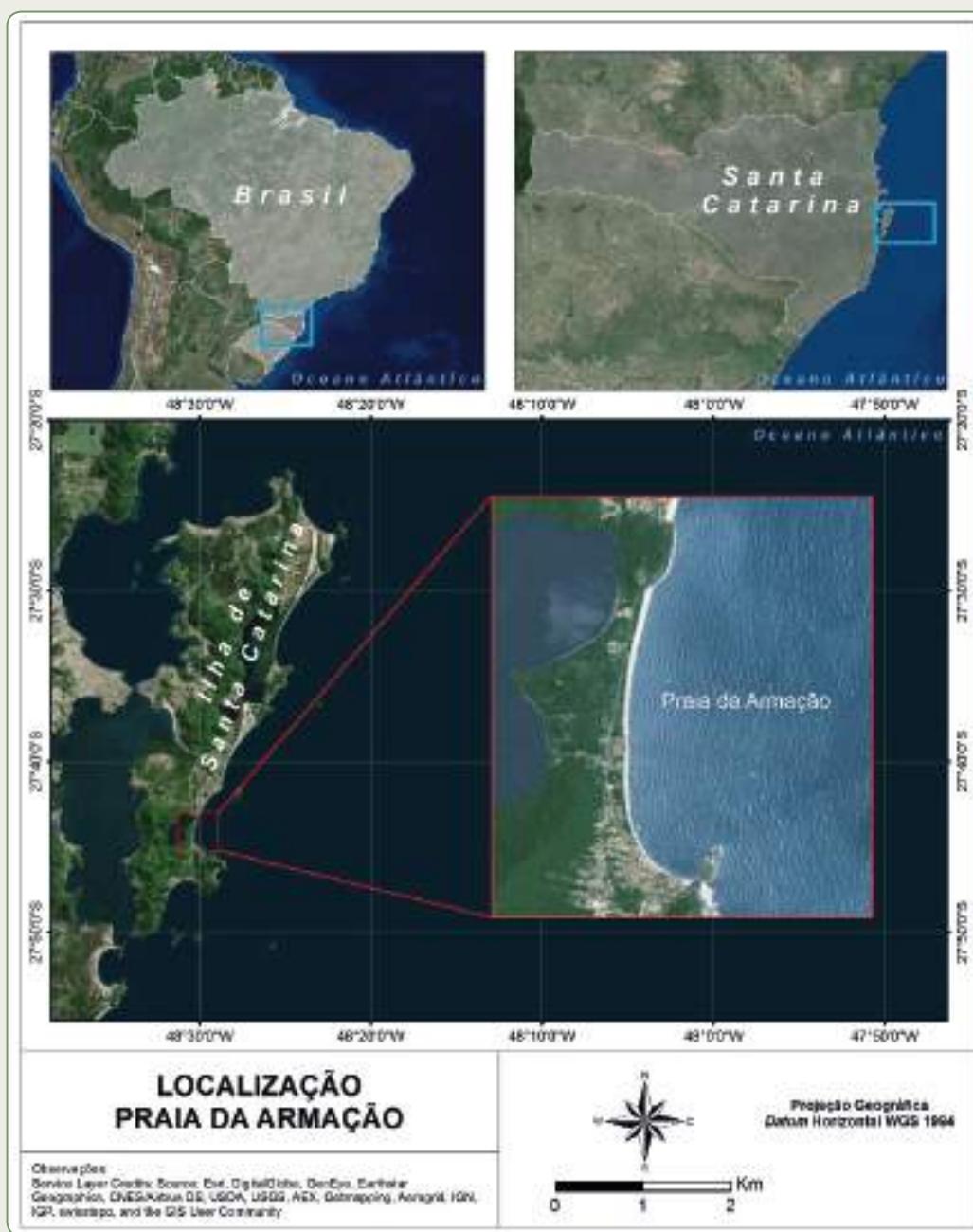
Os problemas de erosão costeira da Praia da Armação do Pântano do Sul já são observados há algumas décadas por moradores e também por órgãos públicos municipais e estaduais. Nos últimos dez anos o balanço entre períodos erosivos e acrecionais aparenta ser negativo no trecho mais urbanizado da Armação. Essa hipótese advém das características desse trecho, cuja largura de praia é pequena com grande proximidade da urbanização em relação à linha d'água. Para a Praia da Armação, os eventos de outono de 2010 representaram um pico de intensidade de energia e de efeitos da erosão costeira na área urbanizada.

Em vista do exposto, o presente trabalho tem por finalidade a elaboração de um modelo conceitual dos processos hidrodinâmicos e dos padrões de transporte de sedimentos atuantes na Praia da Armação utilizando a ferramenta Sistema de Modelagem Costeira (SMC) desenvolvida pelo Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria da Universidade de Cantábria na Espanha em conjunto com o Ministério do Meio Ambiente. Após esse diagnóstico, alternativas conceituais de intervenções de engenharia costeira são avaliadas, para fins de recuperação da porção de praia suscetível à erosão e de medidas de proteção para futuros eventos meteorológicos e oceanográficos de intensificada energia.

ÁREA DE ESTUDO

A Praia da Armação do Pântano do Sul, situada entre as coordenadas geográficas 27°45'02"S/48°30'03"W e 27°43'24"S/48°30'15"W, está localizada na região sudeste da Ilha de Santa Catarina, Florianópolis (Figura 15.2). A praia possui uma extensão aproximada de 3.500 m e é limitada na porção norte pelo promontório rochoso do Morro das Pedras e na porção sul pelo tômbolo formado entre a praia e a Ilha das Campanhas e pelo rio Quinca Antônio (sangradouro da Lagoa do Peri), formando uma enseada em espiral. Destaca-se a Lagoa do Peri, a qual representa expressivo manancial de água doce. A Figura 15.3 mostra uma visualização da geomorfologia da costa na Praia da Armação.

Figura 15.2 – Localização da Ilha de Santa Catarina – Florianópolis, e da Praia da Armação do Pântano do Sul



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 15.3 – Geomorfologia da Praia da Armação



Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2011).

Clima e meteorologia

A Ilha de Santa Catarina apresenta clima do tipo subtropical úmido, com temperatura média oscilando entre 15 e 18 °C no inverno e entre 24 e 26 °C no verão. Dados climáticos indicam temperatura média anual de 21,5 °C, precipitação média anual de 1492 mm, ventos com velocidade média de 3,31 m/s e umidade relativa do ar de 80% em média (NIMER, 1979). Esse autor esclarece que as características climáticas da região ocorrem pela influência de quatro principais sistemas atmosféricos: Baixa Pressão Móvel Polar, Anticiclone do Atlântico Sul, Anticiclone do Pacífico Sul e Centro de Baixa Pressão do “Chaco”. Os ventos provenientes das direções norte e nordeste são os mais frequentes (47%) e os advindos do quadrante sul os mais intensos (32,5%), alcançando até 6,50 m/s.

Marés

Na região de Florianópolis predominam o regime de micromarés (amplitude menor que 2 m) e o regime semidiurno com desigualdades diurnas, de acordo com a tábua de marés da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN, 2005). Um levantamento mareográfico recente na Praia da Armação do Pântano do Sul foi realizado pela Diretoria de Obras Hídricas (DIOH) entre 26 de março e 28 de dezembro de 2001, no qual o nível do mar máximo observado foi de +1,99 m e o mínimo, de -0,72 m.

Regime de ondas

O regime de ondas na região foi estudado e documentado por Araújo et al. (2003), utilizando dados levantados por um ondógrafo direcional Datawell Waverider Mark II entre 2002 e 2003. Esse equipamento foi fundeado a 35 km de distância da Armação mar adentro, em uma profundidade aproximada de 80 m, pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (LAHIMAR) da Universidade Federal de

Santa Catarina (UFSC). Esse estudo mostrou que condições de alta energia de onda geralmente provêm de ondulações de sul/sudeste, com períodos de pico acima de 11 s, podendo ocorrer ondas maiores que 4 m em águas profundas. Essas condições costumam ocorrer nos períodos de outono e inverno, entretanto ondas grandes podem ser encontradas em todas as estações do ano. As condições de baixa energia são associadas a vagas de leste/nordeste. Realizando uma análise estatística e no domínio do tempo e da frequência dos dados citados, Araújo et al. (2003) encontraram cinco principais sistemas (estados de mar). O Quadro 15.1 mostra os sistemas identificados, bem como suas respectivas características, como período de pico espectral médio, direção média de propagação em águas profundas, altura significativa e a distribuição de frequência de ocorrência de alturas significativas de onda por intervalo de altura de onda desses sistemas. Araújo et al. (2003) mostram que os sistemas de onda mencionados podem ocorrer simultaneamente e salientam que as ondulações de sudeste, ondulações de sul e vagas de leste ocorrem durante todo o ano na região.

Características morfodinâmicas e vulnerabilidade a erosão

Durante os últimos anos foram realizados estudos destinados a descrever os aspectos morfodinâmicos das praias de Santa Catarina. Horn (2006) identificou as principais características granulométricas das areias praiais da Ilha de Santa Catarina, incluindo as da Armação do Pântano do Sul (Quadro 15.2).

Quadro 15.1 – Sistemas de ondas para o litoral de Santa Catarina

Denominação	Direção em águas profundas (θ)	Período de pico (Tp)	Altura significativa de onda (Hs)	Fr*	Frequência (%) por intervalo de altura de onda				
					0-2 m	1-2 m	2-3 m	3-4 m	4-5 m
Ondulação de Sudeste	146°	14,2s	1,50 a 2,9 m	16,0	19,4	40,5	24,6	9,9	3,5
Ondulação de Sul	162°	11,4s	1,25 a 2,0 m	11,0	13,8	38,0	27,8	12,7	4,8
Vagas de Leste	92°	8,5s	0,75 a 1,75 m	10,0	22,2	42,0	23,0	8,5	> 3,0
Vagas de Nordeste	27°	4,7s	> 0,75 m	20,5	23,9	43,2	21,8	7,5	> 3,0
Vagas de Sul	188°	6,4s	> 1,0 m	10,0	-	-	-	-	-

Fonte: Araújo et al. (2003).

Quadro 15.2 – Características granulométricas da Praia da Armação

DADOS GRANULOMÉTRICOS DA PRAIA DA ARMAÇÃO							
Amostra	Localização		Diâmetro médio do grão		Classificação	Desvio padrão	
	Latitude	Longitude	phi	mm		phi	mm
1	27°43'25,4"	48°30'18,6"	0,13	0,91	areia grossa	0,58	0,67
2	27°44'17,3"	48°30'27,4"	0,22	0,86	areia grossa	0,63	0,65
3	27°44"58,4"	48°30'08,9"	2,07	0,24	areia fina	0,74	0,60

* Classificação pelo diâmetro do grão

Fonte: Horn (2006).

Nesse trabalho, Horn (2006) confirma o que outros autores como Abreu de Castilhos (1995) já haviam reportado: a Praia da Armação apresenta, no setor sul, perfil dissipativo, com menor energia de onda, onde se verifica granulometria fina. Do centro para o norte, o perfil vai mudando de intermediário a reflexivo, com o aumento de energia de onda média e o aumento da granulometria e declividade da face da praia em direção ao trecho norte da praia.

Através de uma análise de variação histórica de linha de costa entre 1938 e 2002, Mazzer (2007) destaca que a Praia da Armação apresenta recuo médio de 0,52 m/ano, onde alguns trechos sofreram recuo de mais de 60 m da linha de costa. No trecho central da praia ocorrem as maiores taxas de variação negativa, associadas a uma maior exposição às ondulações. O autor conclui que a vulnerabilidade à erosão diminui nos trechos onde o perfil é reflexivo, aumenta nos perfis intermediários, voltando a diminuir na porção dissipativa, mais abrigada. Dalbosco (2013) realizou uma criteriosa análise histórica de linha de costa com imagens aéreas entre 1938 e 2011. Essa autora conclui que nos últimos 30 anos o trecho norte da praia sofreu progradação e o trecho sul retrogradação, corroborando a análise de vulnerabilidade apontada por Mazzer (2007).

METODOLOGIA

Modelo empírico – Parábola de Hsu

A primeira etapa da metodologia foi caracterizar as condições de equilíbrio em planta da Praia da Armação do Pântano do Sul. Tal verificação foi realizada com a aplicação do Modelo Parabólico de Hsu e Evans (1989), constante no SMC. O estudo de estabilidade praial em planta foi realizado em dois momentos. O primeiro teve como meta avaliar a estabilidade atual da Praia da Armação, verificando se ela apresenta-se em equilíbrio estático ou dinâmico. Em um segundo momento, o modelo empírico foi utilizado como uma ferramenta auxiliar na definição das propostas de intervenção para a recuperação da praia.

Modelo numérico

Além do estudo de estabilidade praial em planta, a análise computacional foi realizada com o auxílio do *software* SMC. Para tal, foi utilizado o módulo MOPLA (Morfodinâmica de Praias), que contém os modelos OLUCA, COPLA e EROS. O OLUCA resolve as transformações de ondas incidindo de águas profundas para intermediárias e rasas pela equação do declive suave a partir de sua aproximação parabólica, sobre uma malha ortogonal com um esquema de diferenças finitas. É um modelo combinado de refração e difração, permitindo o estudo de zonas onde o efeito desses processos é importante. Seus resultados são utilizados pelo COPLA para calcular as tensões de radiação geradas pela incidência oblíqua e pela quebra de ondas e para calcular as correntes resultantes. Com os resultados do COPLA, o modelo EROS calcula o transporte de sedimentos gerado pelas correntes. O tamanho de grão utilizado para a estimativa de transporte de sedimentos foi de 24 mm, D_{50} referente à porção sul da Armação, trecho que mais sofreu erosão nos eventos de 2010. Esse valor foi utilizado para toda a praia, levando em consideração o caráter conceitual do estudo. A formulação de transporte utilizada no modelo foi de Soulsby et al. (1993).

Pré-processamento da batimetria

Para as simulações numéricas, duas fontes de informações batimétricas foram utilizadas. A primeira foi obtida a partir da digitalização da Carta Náutica nº 1904, na qual está contemplada a região sul da Ilha de Santa Catarina e a Praia da Armação do Pântano do Sul. Essa carta é atualmente a mais detalhada para a região. A segunda foram os dados de batimetria levantados em 2009 pelo Departamento de Edificações e Obras Hidráulicas de Santa Catarina (DEOH). Esses dados, obtidos junto ao DEOH, foram complementados com os dados da Carta Náutica nº 1904, todavia são referentes apenas ao trecho sul da praia, onde o fenômeno de erosão está mais acentuado. A digitalização dos pontos da Carta Náutica 1904 contou com auxílio do *software* SMS (*Surface-Water Modeling System*) da Aquaveo®. Os dados batimétricos foram padronizados para o *datum* horizontal SAD-69, projeção UTM, zona 22 e *datum* vertical do IBGE, com base em informações obtidas junto ao DEOH. Em seguida, os dados foram consolidados em um arquivo único para utilização nas simulações numéricas. A linha de costa da praia, produzida pelo DEOH, também foi utilizada nas simulações.

Definição dos casos de ondas para as simulações numéricas

Os casos de ondas foram selecionados referenciando o estudo de Araújo et al. (2003). Optou-se por três estados de mar representativos para a realização da modelagem numérica: (i) ondulação de sudeste, (ii) vagas de leste e (iii) vagas de nordeste. Dos padrões de ondas incidentes do quadrante sul e sudeste, optou-se pela ondulação de sudeste por esta ser a mais energética, além de estar associada a eventos de alta energia. A opção pelas vagas de leste se deu pelo fato de a linha de costa retilínea da praia ser moldada transversalmente à direção resultante de incidência dessas ondas. Por fim, as vagas de nordeste são as mais frequentes na região, possibilitando assim a modelagem dos padrões de ondas oriundos de diferentes quadrantes de maneira a garantir qualidade na representatividade

do comportamento hidrodinâmico dessa praia. No Quadro 15.3 estão apresentados os parâmetros relacionados aos casos de onda utilizados na modelagem.

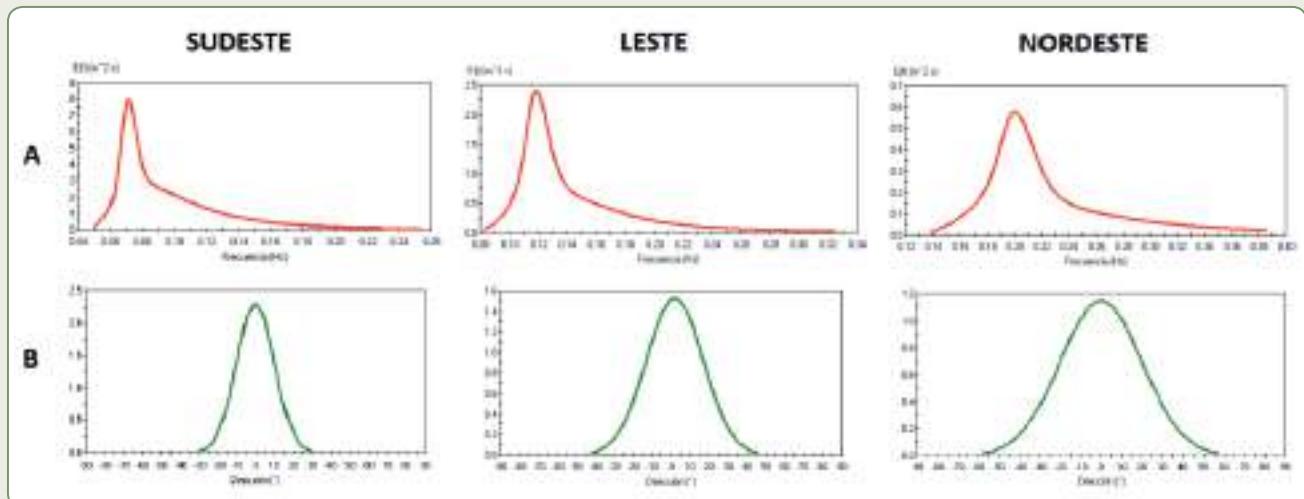
Quadro 15.3 – Parâmetros de ondas utilizados na modelagem

Classificação	PADRÕES DE ONDAS UTILIZADOS NA MODELAGEM			
	Direção em águas profundas (θ)	Período de pico (Tp)	Altura significativa de onda (Hs)	Espalhamento direcional (θ)
Ondulação de Sudeste	146°	14,2 s	2,0 m	10°
Vagas de Leste	92°	8,5 s	1,25 m	15°
Vagas de Nordeste	27°	5 s	0,75 m	20°

Fonte: Dos autores (2018).

Na Figura 15.4 estão ilustrados os espectros TMA (HUGHES, 1984) configurados no modelo utilizando os dados paramétricos do Quadro 15.3, possibilitando uma comparação direta entre os três casos modelados (sudeste, leste e nordeste) com relação à energia, frequência e direção inerente a cada estado de mar simulado.

Figura 15.4 – Ondulações de SE e vagas de E e NE



Legenda: a) espectros de frequência; b) espectros direacionais

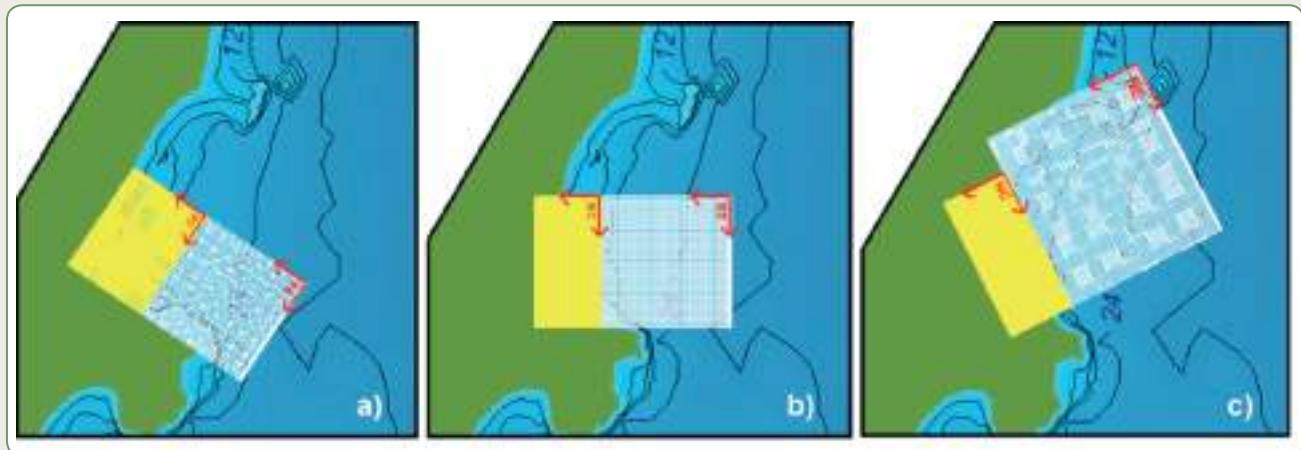
Fonte: Dos autores (2018).

Malhas numéricas

Para a propagação dos casos de onda no *software* SMC, diferentes malhas numéricas foram construídas. Para isso realizou-se um estudo de discretização delas, de forma a balancear o tempo necessário para o processamento de dados e a exatidão numérica dos resultados.

Uma vez conhecidas as limitações do *software* quanto à quantidade de elementos de malha, optou-se pelo aninhamento de duas malhas com discretização diferenciada (Figura 15.5). A malha menos refinada (80×80 m) foi posicionada na área de maior profundidade (em branco na Figura 15.5), local no qual a batimetria possui menor detalhamento. Por outro lado, a mais refinada (10×10 m) foi posicionada nas proximidades da costa (em amarelo na Figura 15.5), devido à maior quantidade de dados batimétricos nessa região.

Figura 15.5 – Malhas numéricas construídas para ondas de SE, E e NE



Legenda: a) SE; b) E; e c) NE

Fonte: Dos autores (2018).

Observa-se que a orientação de cada par de malhas aninhadas foi escolhida com base nas limitações da aplicação da equação do declive suave na forma parabólica, onde o ângulo de incidência inicial de onda não pode ser maior que certo limite (em geral 45°) em relação ao eixo x de cálculo da malha numérica. Cada malha foi definida com dimensões próprias (abrangendo a plataforma interna da Praia da Armação), de acordo com as singulares características de cada caso de onda selecionado.

A rotação utilizada para cada uma das combinações de malhas numéricas aninhadas procurou deixar a fronteira externa das grades ortogonal à direção de incidência de cada estado de mar incidente simulado. Essa definição visa reduzir erros numéricos relativos às variações existentes entre a inclinação da malha e o ângulo de incidência inicial da ondulação a ser propagada.

RESULTADOS

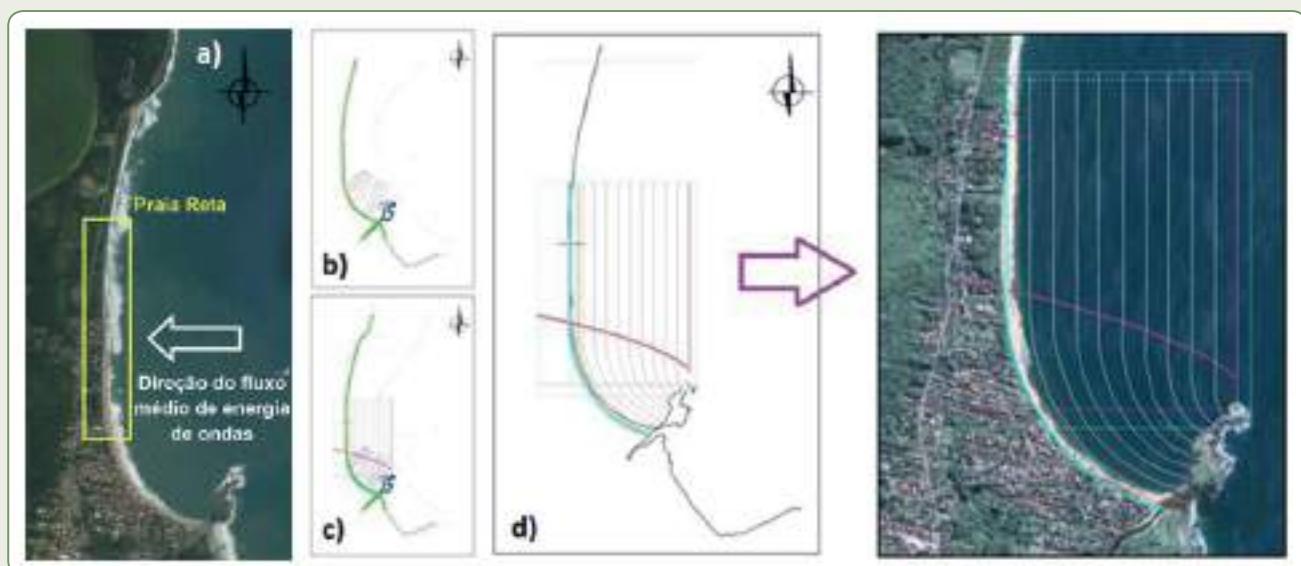
Os resultados serão apresentados em duas etapas: na primeira, serão apresentados os campos de saída das simulações numéricas de ondas, correntes e transporte de sedimentos para o cenário “condições atuais”. Na segunda, serão formuladas propostas conceituais de recuperação da praia, tipos de intervenções a serem adotadas, bem como será apresentado o impacto da escolha destas últimas no regime hidrodinâmico.

Modelo parabólico – caracterização da praia

Para a aplicação do Modelo Parabólico proposto por Hsu e Evans (1989), utilizou-se o desenho em planta da Praia da Armação do Pântano do Sul. Utilizando uma das hipóteses básicas do modelo, as ondas de leste foram assumidas como sendo representativas do fluxo médio de energia incidente na praia, uma vez que, conforme a teoria, a linha de costa tende a assumir a forma e a orientação das cristas resultantes do regime de ondas incidente (Figura 15.6a). De posse dos contornos da linha de costa da praia e da batimetria (Figura 15.6b), identificou-se o ponto onde ocorre a difração das ondas, localizado na extremidade da Ilha das Campanhas (Figura 15.6c). Esse costão é responsável por difratar as cristas das ondas que chegam à praia. Unindo esse ponto de difração (ponto de controle no modelo) ao início da seção retilínea da praia definiu-se a linha de controle ($R\beta = 808$ m).

Na sequência, traçou-se graficamente a direção resultante da incidência de ondas (direção leste) obtendo o ângulo β de $69,8^\circ$ entre a linha de controle e a direção do fluxo médio de energia de onda. Finalmente, realizaram-se os ajustes finos no Modelo Parabólico de maneira a identificar, por exemplo, o período das ondas incidentes (8,5 s) e a profundidade do ponto de difração (10 m). A aplicação do Modelo Parabólico obtido para o cenário atual pode ser visualizada na Figura 15.6.

Figura 15.6 – Etapas da aplicação do Modelo Parabólico



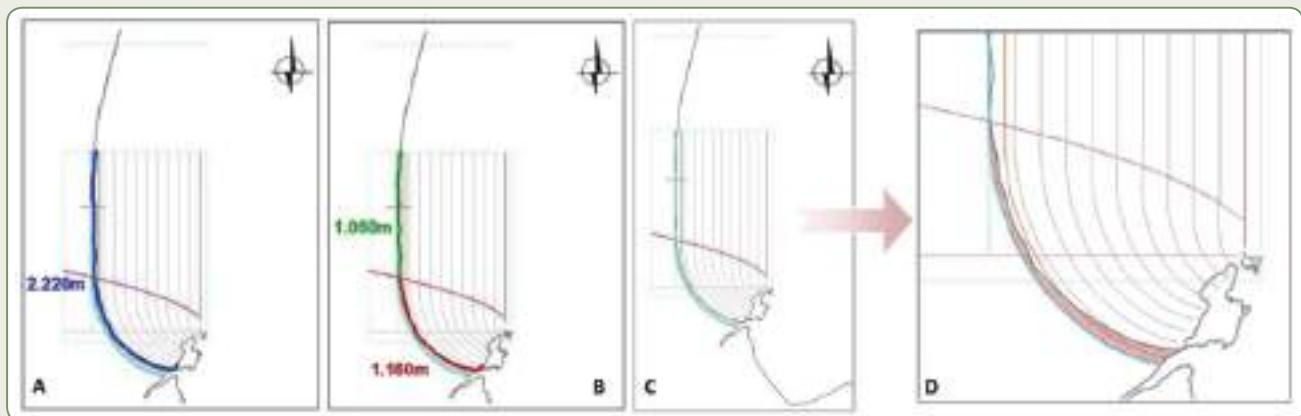
Legenda: a) identificação de ondas que representam o fluxo médio de energia incidente na Armação; b) entrada de dados – linha de costa e batimetria; c) aplicação e ajuste do Modelo Parabólico; e d) determinação da geometria de equilíbrio de praia

Fonte: Dos autores (2018).

Por meio da Figura 15.7 é possível visualizar a linha de costa calculada pelo Modelo Parabólico, com o comprimento total de 2220 m, abrangendo as zonas urbanizadas da praia e mais vulneráveis à erosão (trecho sul). A figura detalha a extensão dos trechos de linha de costa aderentes e não aderentes ao resultado obtido após a aplicação do Modelo Parabólico (Figuras 15.7a e b). A seção retilínea modelada pela equação parabólica de Hsu e Evans (1989) totalizou 1060 m, enquanto 1160 m foram referentes à seção curva da praia, localizada na zona de sombra causada pela Ilha das Campanhas. Comparando a linha de costa da imagem (linha azul-escura da Figura 15.7a) com a linha de costa obtida pela aplicação do modelo (linha azul-clara da Figura 15.7a) foi possível caracterizar o trecho

de praia em equilíbrio dinâmico da Praia da Armação. As Figura 15.7(c e d) ilustram a zona da praia em equilíbrio dinâmico (hachurada em vermelho). De acordo com o ponto de difração adotado, o modelo demonstra que a praia atualmente busca se ajustar às variações de energia hidrodinâmica ou ao volume de sedimentos disponíveis, variando a largura da parte emersa na área mais interna da parábola. Essa busca pelo equilíbrio pode ser natural e esperada, todavia a urbanização existente na região influencia uma nova situação de equilíbrio em situações de alta energia hidrodinâmica, pois a zona natural de recuo da linha de costa está fixada pela urbanização, potencializando os problemas de erosão costeira nesse setor.

Figura 15.7 – Modelo Parabólico



Legenda: a) linha de costa calculada (azul-claro); b) extensão do trecho retilíneo da praia e aderente à linha de costa digitalizada (verde) e extensão do trecho não aderente (vermelho); c e d) trecho em equilíbrio dinâmico (hachura vermelha)

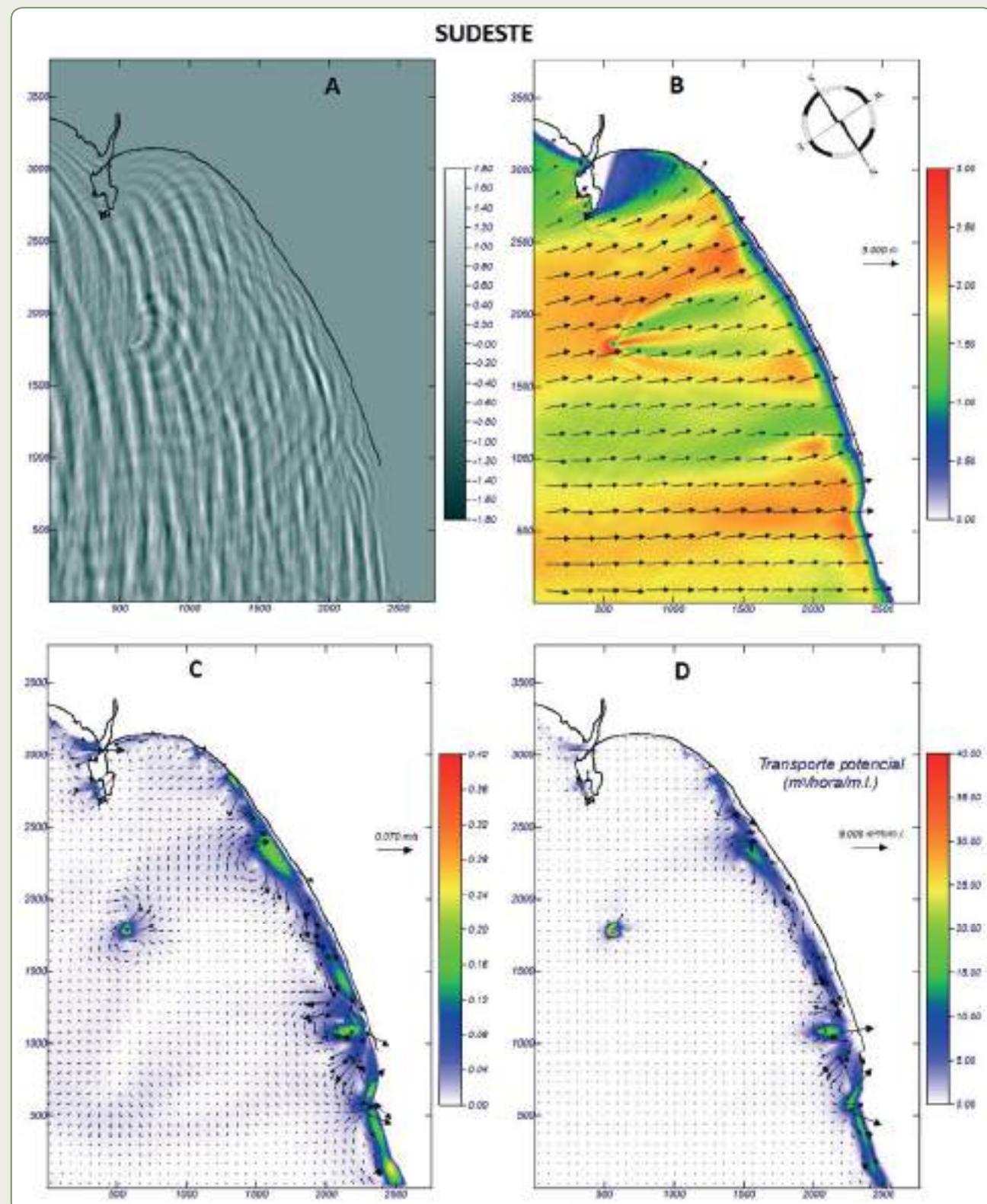
Fonte: Dos autores (2018).

Modelagem numérica – situação atual

Nas Figuras 15.8 a 15.10 são apresentados os diagramas de cristas e cavas, altura significativa de onda, correntes e transporte de sedimentos, obtidos pela ação das ondas para cada um dos três casos de ondas selecionados (sudeste, leste e nordeste). As diferenças nas dimensões das figuras resultam das diferentes malhas numéricas utilizadas para cada estado de mar simulado.

Os resultados permitem determinar o funcionamento da praia e propor um modelo conceitual de comportamento hidrodinâmico e de transporte de sedimentos a partir de certos padrões. O promontório da Ilha das Campanhas gera uma zona de sombra de energia de ondas no setor sul da praia devido à difração das ondas incidentes. Ao encontrar o promontório, a energia das ondas é distribuída e atenuada na zona de sombra, resultando em ondas de menor altura (conforme pode ser visualizado nas Figuras 15.8b e 15.9b). Essa característica ocorre para todos os padrões de ondas selecionados, porém menor difração ocorre para ondulações de nordeste, uma vez que as mesmas incidem mais diretamente na zona de sombra e de forma geral apresentam menor período e menor energia (Figura 15.10b). A batimetria da plataforma interna também exerce importante influência na distribuição de energia de ondas na zona de arrebentação.

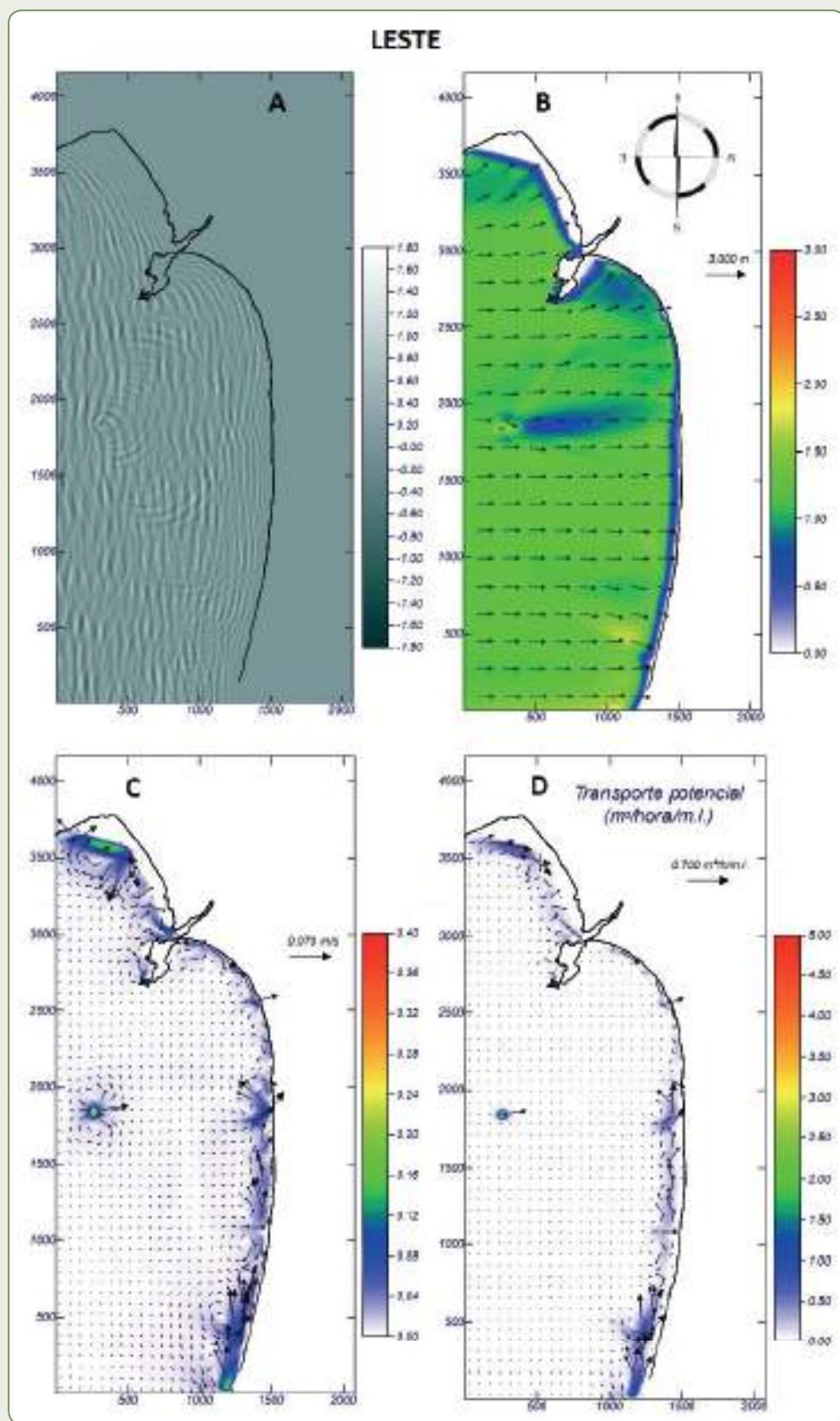
Figura 15.8 – Ondulação de sudeste



Legenda: a) diagrama de cristas e cavas (m); b) altura significativa de onda (m); c) correntes geradas pela onda (m/s); d) transporte de sedimentos ($m^3/\text{hora}/\text{m.l.}$). Observar que nesta e nas demais ilustrações as figuras estão rotacionadas em relação ao norte geográfico

Fonte: Dos autores (2018).

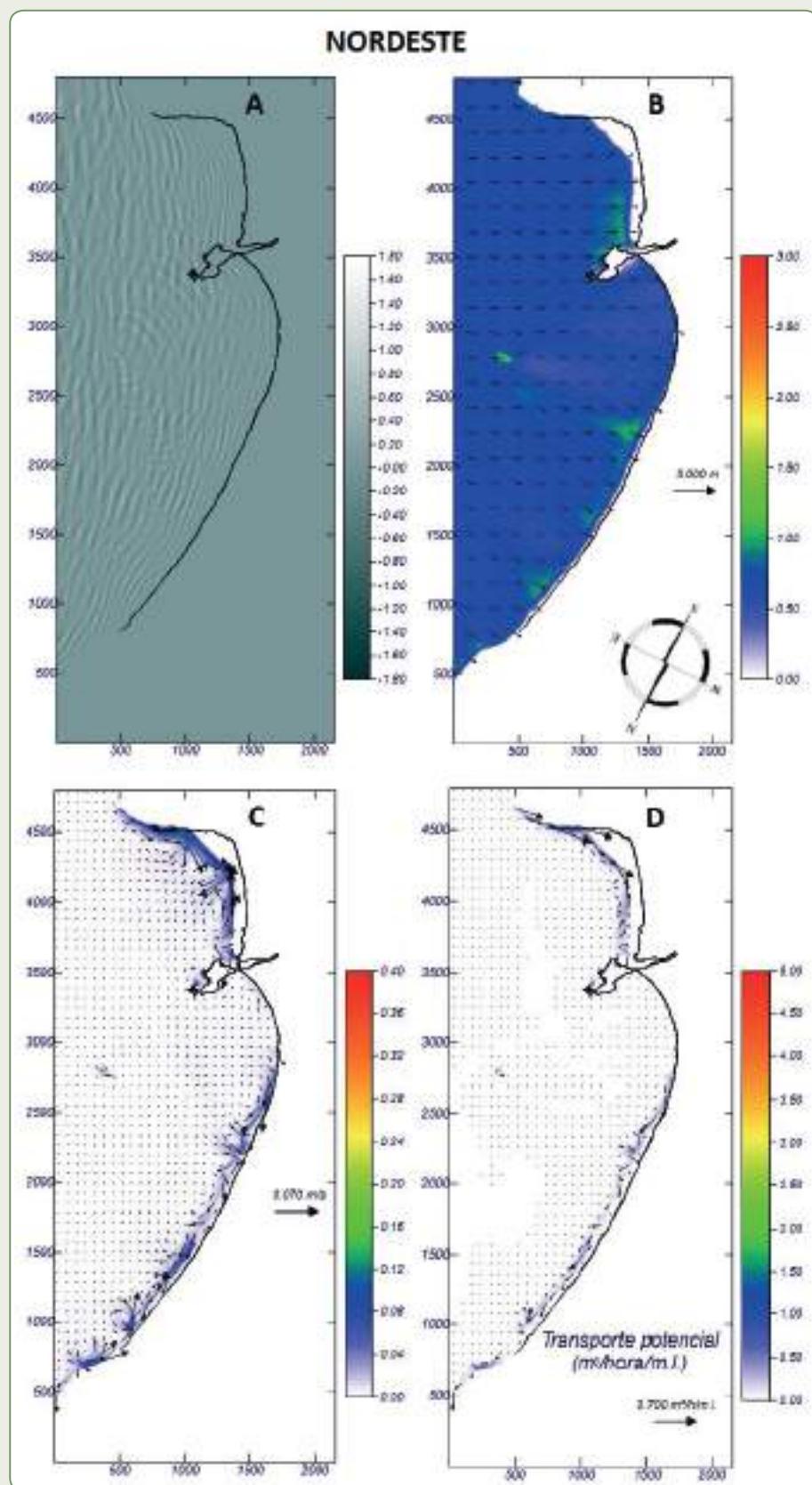
Figura 15.9 – Vagas de leste



Legenda: a) diagrama de cristas e cavas (m); b) altura significativa de onda (m); c) correntes geradas pela onda (m/s); d) transporte de sedimentos ($m^3/hora/m.l.$)

Fonte: Dos autores (2018).

Figura 15.10 – Vagas de nordeste



Legenda: a) diagrama de cristas e cavas (m); b) altura significativa de onda (m); c) correntes geradas pela onda (m/s); d) transporte de sedimentos ($m^3/hora/m.l.$)

Fonte: Dos autores (2018).

Um parcel existente em águas rasas age como lente de focalização de energia de ondas em setores diferentes na Praia da Armação. As ondulações de leste e nordeste geram uma zona de redução de energia na sombra do parcel. Já nas adjacências (zonas laterais) ocorre aumento de altura das ondas, principalmente no setor central da praia (Figuras 15.9b e 15.10b). Já as ondas de SE (condição mais energética) apresentam um padrão de focalização de energia na sombra do parcel associada a duas zonas de redução de altura localizadas nas adjacências do foco energético. Nessas condições também é possível identificar focalização de energia na região urbanizada e na porção norte da praia (Figura 15.8b). Essa focalização de energia é caracterizada como uma zona migrante que varia de acordo com o ângulo de incidência das ondulações. Esse comportamento hidrodinâmico causado pelo parcel, por sua vez, causa gradientes hidráulicos na zona de arrebentação que são responsáveis pela variação das correntes de deriva geradas pelas ondas (Figuras 15.8c, 15.9c e 15.10c) e, consequentemente definem padrões de transporte de sedimento na Praia da Armação. Nas Figuras 15.8b, 15.9b e 15.10b é possível visualizar diferenças de altura de onda na zona de arrebentação causadas pela difração das ondas (na zona de sombra no trecho sul da praia) e pelas alterações (refração, empinamento e difração) causadas pela propagação das ondas sobre a batimetria (na zona centro-sul, onde está o parcel ao largo). Essas diferenças geram gradientes hidráulicos que forçam a movimentação dos sedimentos no sentido sul para norte para ondas incidentes de SE (Figura 15.8d). Esse transporte residual é intensificado a partir do limite norte da urbanização da praia, resultando na saída de sedimentos do trecho sul da praia. Para ondas incidentes de E (Figura 15.9b), as correntes e o transporte residual (Figuras 15.9c e 15.9d) levam sedimentos para esta área (trecho sul). É interessante notar que a zona de surfe do trecho sul e central (praia urbanizada) tem menor intensidade de transporte. Neste setor pode ser observada divergência de correntes, ocorrendo transporte para dentro da zona de sombra e para norte, todavia com pouca intensidade. A célula de transporte que segue para o norte encontra uma área de convergência de correntes cuja contribuição de sedimentos vindos do norte é mais intensa. Esta região se localiza em frente ao parcel e no limite norte da praia urbanizada. Outra área que apresenta divergência de correntes e transporte para este cenário hidrodinâmico simulado se situa mais ao norte, onde a praia tem maior capacidade de suportar eventos mais extremos devido ao estoque de sedimentos emersos. Já para ondas que incidem de NE (Figura 15.10b), foram observadas, como característica geral, células de circulação com correntes (Figura 15.10c) de moderada a pequena intensidade (se comparadas com os outros cenários hidrodinâmicos). O transporte residual (Figura 15.10d) gerado por essa configuração de correntes segue em direção ao norte a partir do limite norte da praia urbanizada.

Como resumo dos resultados encontrados pelas simulações numéricas, pode-se apontar que as características hidrodinâmicas da zona de arrebentação no trecho sul e centro-sul da praia são controladas pela presença do costão rochoso e do parcel. Esse trecho urbanizado recebe pouco aporte sedimentar, o que pode ser confirmado através da largura reduzida da praia mesmo no período subsequente aos eventos erosivos de 2010, após recuperação de sedimentos. A influência da batimetria da antepraia na modificação das ondas que incidem na Armação resulta em uma zona de surfe com diferenças de alturas de ondas para os três estados de mar predominantes. Os estados de mar de maior energia (SE) e de maior frequência (NE) transportam sedimentos em direção ao norte enquanto que a condição que mistura intensidade e frequência (E) mostra transporte residual em direção ao trecho centro-sul da praia. Residualmente, o transporte para o norte é predominante de maneira geral, indicando a grande importância das ondas incidentes de SE com maior energia. Esse transporte residual também é verificado pelos resultados de transporte de sedimentos dos modelos, no qual pode ser visto que o transporte para resultante de ondas de SE (valores atingindo $9 \text{ m}^3/\text{hora/m.l}$) é pelo menos dez vezes maior, se comparado com o transporte gerado por ondas de E ($0,7 \text{ m}^3/\text{hora/m.l}$), e maior

ainda se comparado com a contribuição de condições de NE. Essa afirmação é ainda corroborada pela morfologia da praia, cuja largura e estoque sedimentar emerso aumentam de sul para norte.

Com base nesses resultados, a Figura 15.11 possibilita visualizar, de forma esquemática, o modelo conceitual proposto para o funcionamento morfodinâmico da Praia da Armação, sob a luz da hidrodinâmica e do transporte de sedimentos associado. Uma questão que deve ser levada em consideração é o fato de a modelagem ter sido realizada considerando uma única granulometria para toda a praia (24 mm), o que não condiz com a realidade, pois essa praia apresenta variações consideráveis de tamanho de grão em seus diferentes trechos. A zona norte da praia tem areia consideravelmente mais grossa, e os valores de transporte são calculados pelo modelo como se a praia tivesse a mesma granulometria. Apesar de os resultados da modelagem indicarem mais transporte potencial nesse trecho central e norte da praia, este pode ser consideravelmente menor que na zona com menor granulometria, pois o sedimento é mais grosso e necessita mais energia para ser transportado. Por outro lado esse trecho norte recebe bem mais energia hidráulica de diferentes estados de mar do que as partes mais protegidas do setor sul.

Figura 15.11 – Modelo conceitual proposto para o funcionamento morfodinâmico da Praia da Armação



Fonte: Dos autores (2018).

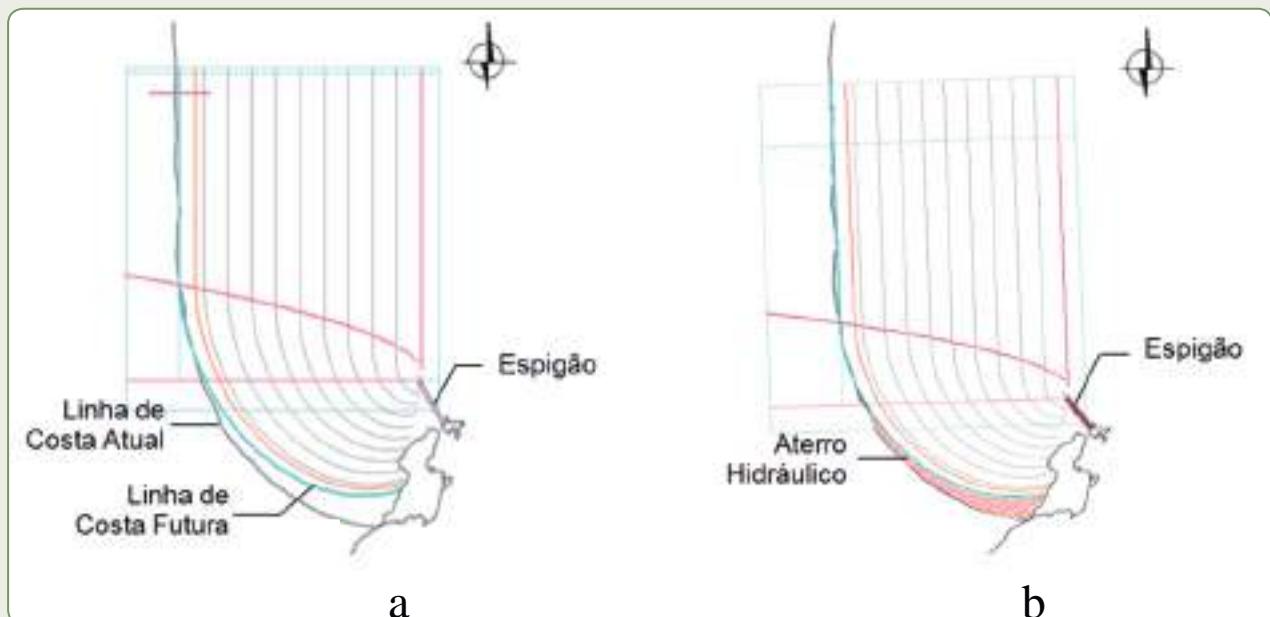
Simulações das propostas de intervenções

A partir da condição de equilíbrio dinâmico verificado por meio da aplicação do Modelo Parabólico de Hsu e Evans (1989) e do modelo conceitual proposto através do uso de modelagem numérica, foram propostas alternativas conceituais de engenharia costeira para recuperação e estabilização da linha de costa da Praia da Armação. As propostas foram testadas utilizando a modelagem numérica do SMC.

Proposta 1 – Espigão na Ilha das Campanhas combinado com aterro hidráulico

Inicialmente foi proposto um espigão na parte mais externa da Ilha das Campanhas, visando modificar o ponto de difração de ondas para a ponta do espigão e consequentemente mudar o equilíbrio em planta de forma a aumentar a largura média da praia emersa. A ampliação da zona de sombra da região curva da praia favoreceria a deposição de sedimentos e o aumento da largura da parte emersa da praia de modo lento e gradual ao longo do tempo. O local e as dimensões do espigão foram definidos por meio do Modelo Parabólico conforme Figura 15.12a. Todavia, observando os resultados do modelo numérico para essa alternativa, é notável a contribuição da implantação de um espigão na Ilha das Campanhas para o aumento da área de sombra já existente. Embora tenha havido redução da energia hidrodinâmica na zona de sombra, as modificações nas alturas de ondas, correntes e transporte de sedimentos não foram significativas para a região mais ao norte da seção curva da praia em relação ao cenário de “situação atual”, mantendo a vulnerabilidade do trecho a eventos de alta intensidade, como os ocorridos em 2010. Dessa maneira, para aprimorar a alternativa do espigão, foi proposto um aterro hidráulico combinado (zona hachurada em vermelho na Figura 15.12b), visando obter de forma rápida uma maior área de praia emersa, além de contribuir para a manutenção do equilíbrio da linha de costa. O aterro hidráulico foi planejado tendo como base o Modelo Parabólico (Figura 15.12).

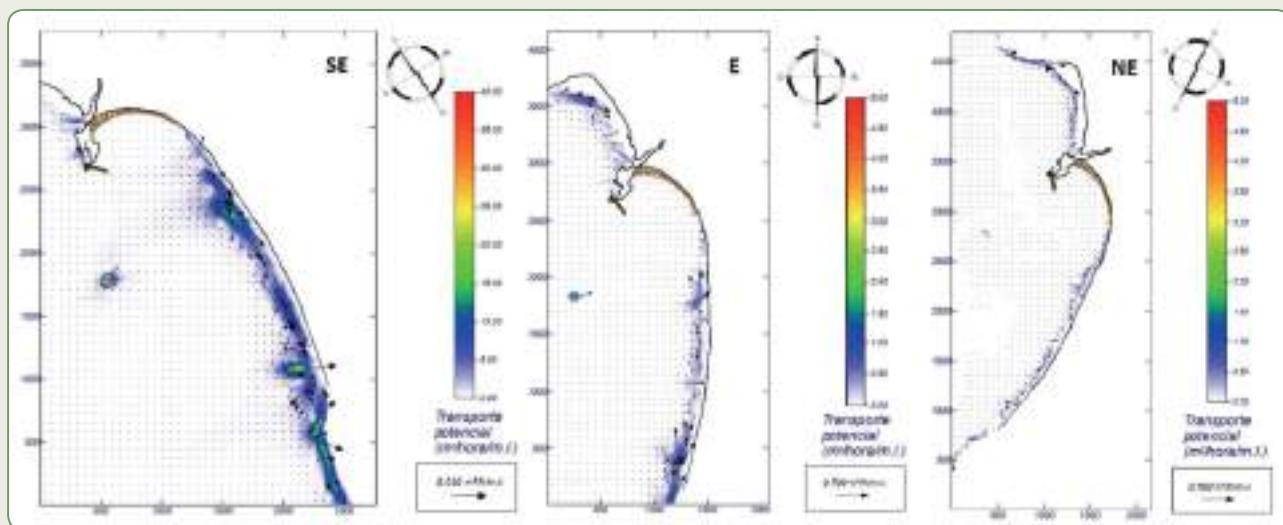
Figura 15.12 – Proposta 1: Implantação de: a) espigão para aumento da zona de sombra com (b) aterro hidráulico para recuperação do trecho de praia erodida utilizando o Modelo Parabólico via SMC



Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados do modelo numérico da Proposta 1 (Figura 15.13) mostraram que o aterro hidráulico resultou em uma redução de intensidade nas correntes e no transporte longitudinal de sedimentos no flanco curvo da praia, mas novamente não ocorreram muitas modificações na hidrodinâmica e no transporte de sedimentos da área mais ao norte após a adição do engordamento artificial. A solução é potencialmente eficaz no trecho centro-sul da praia, no sentido de recompor uma maior área de praia emersa, o que garante que o equilíbrio da praia seja estabelecido mais rapidamente se comparado com uma recuperação por deposição natural de sedimentos. Com o aumento da zona de sombra causado pela implantação do espigão na Ilha das Campanhas, este acumula a função de estabilizar o engordamento de praia. Entretanto, os resultados mostraram que na zona de surfe em frente ao parcel, num ponto situado ao final da zona urbanizada da praia, ocorre a saída significativa dos sedimentos do trecho, transportados para o norte. Dessa maneira optou-se por uma segunda alternativa descrita a seguir.

Figura 15.13 – Proposta 1: Transporte residual de sedimentos ($m^3/hora/m.l$) com espigão na Ilha das Campanhas e aterro hidráulico no flanco sul da praia

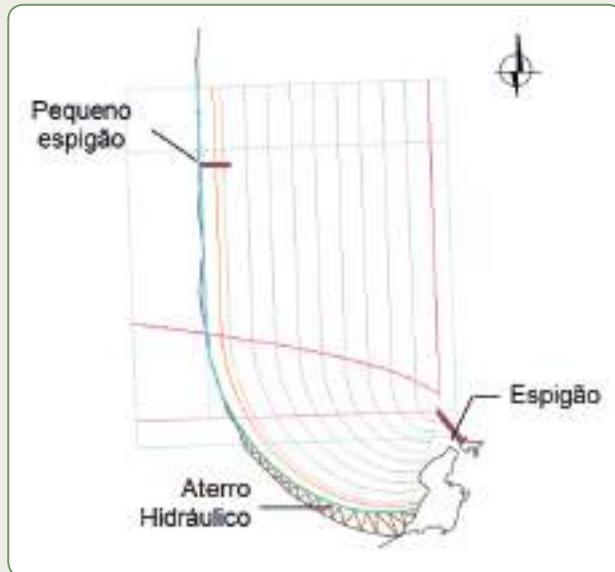


Fonte: Dos autores (2018).

Proposta 2 – Espigão na Ilha das Campanhas combinado com aterro hidráulico e pequeno espigão na praia

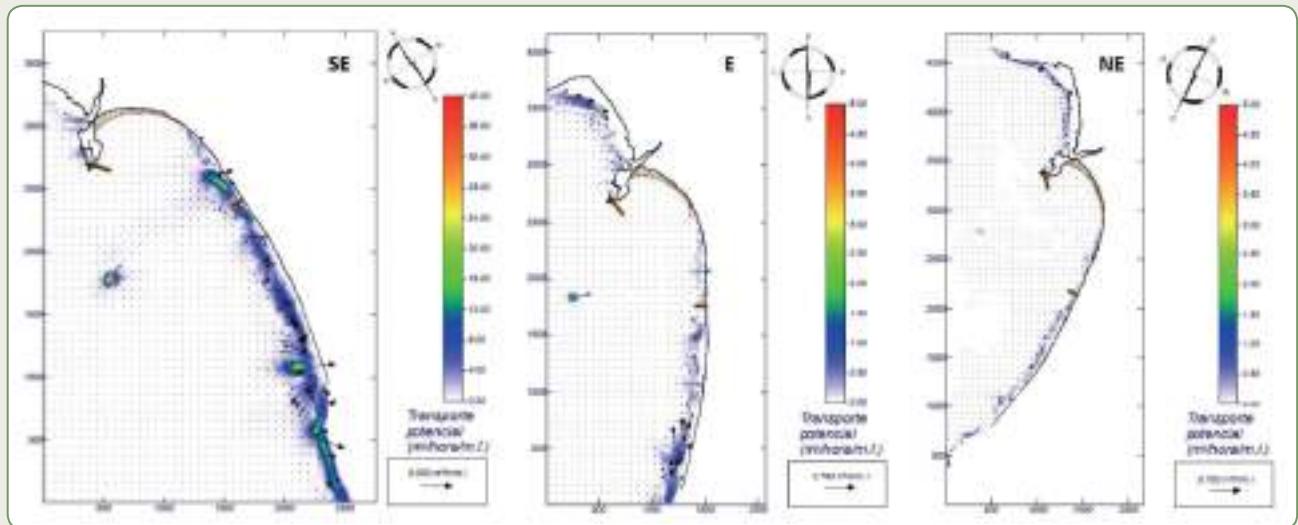
Essa segunda proposta visou analisar os efeitos da implantação de um pequeno espigão de perfil baixo na praia, na zona de saída de sedimentos mencionada acima, resultante da característica das ondas e correntes na zona de surfe após propagação sobre o parcel presente na antepraia da Armação, principalmente para ondas de SE. Essa proposição teve por finalidade reduzir a velocidade das correntes e consequentemente diminuir as taxas de transporte de sedimento da praia para direções opostas, principalmente para o norte, objetivando uma maior vida útil para o aterro hidráulico (Figura 15.14). Os resultados da modelagem numérica (Figura 15.15) confirmaram uma diminuição da saída de sedimentos da área urbanizada da praia, no qual a célula de circulação existente na área onde foi implantado o espigão manteve sedimentos ao sul da estrutura para condições energéticas de SE. Essa alternativa não teve a intenção de interromper totalmente o transporte de sedimentos, mas de reduzir a intensidade das taxas de perda. Por isso a dimensão reduzida dessa nova estrutura, a qual não se estende até o fim da zona de surfe e tampouco até a profundidade de fechamento.

Figura 15.14 – Proposta 2: Espigões na Ilha das Campanhas e na praia combinados com o aterro hidráulico



Fonte: Dos autores (2018).

Figura 15.15 – Proposta 2: Transporte residual de sedimentos ($\text{m}^3/\text{hora}/\text{m.l.}$) com espigão na Ilha das Campanhas e na praia e aterro hidráulico no flanco sul da praia



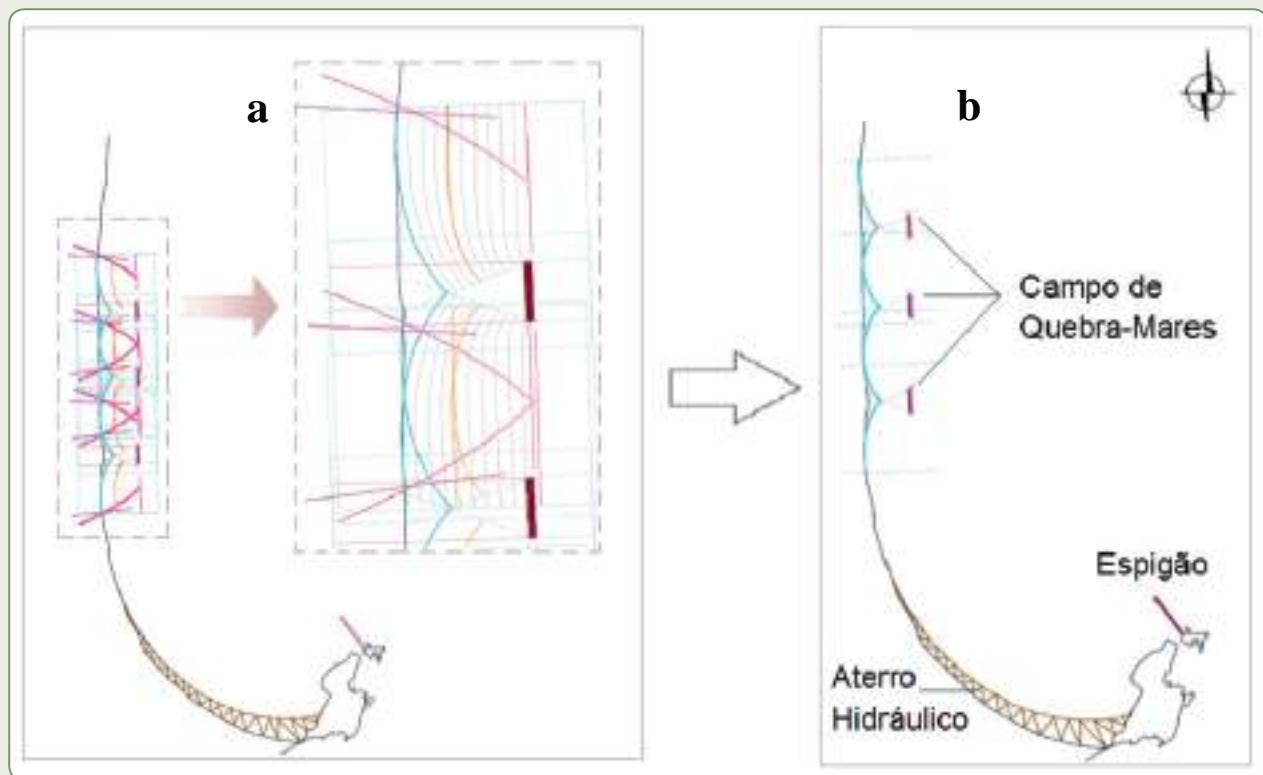
Fonte: Dos autores (2018).

Para os demais estados de mar (E e NE) simulados, os resultados também apontam para a redução dos padrões de transporte em comparação ao observado para o cenário de “situação atual”. Após analisar os resultados encontrados para essa proposta, decidiu-se testar uma variação que possibilitasse a redução da taxa de transporte e consequente diminuição da perda de sedimentos em um trecho maior de praia urbanizada. Essa opção teve como objetivo também a diminuição do risco potencial de interrupção de transporte de sedimentos representada por espigões ortogonais à linha de costa.

Proposta 3 – Espigão na Ilha das Campanhas combinado com aterro hidráulico e campo de três quebra-mares destacados

A definição da terceira proposta objetivou uma redução na intensidade do transporte de sedimentos em uma região maior, se comparada à Proposta 2. Para tal foi desenvolvido um campo de três quebra-mares destacados fundamentado no Modelo Parabólico. O conceito tratou da implantação dos quebra-mares na região de maior concentração urbana, onde se verifica a saída de sedimentos para o norte em condições de maior energia e onde os efeitos erosivos das ressacas de 2010 foram mais notáveis. Optou-se pela adoção de três quebra-mares destacados distribuídos ao largo da região de divergência de correntes e posicionamento do vórtice na zona de surfe. O campo de quebra-mares destacados visou a diminuição de energia de ondas e consequente formação de saliências na linha de costa, na sombra das estruturas. As linhas de costa das saliências foram estimadas de forma conceitual utilizando o Modelo Parabólico com as extremidades dos quebra-mares atuando como pontos de difração. O efeito desejado das saliências é diminuir a velocidade do fluxo, reduzindo assim a taxa de perda de sedimentos para o setor norte da praia sem interromper o caminho natural do sedimento. A configuração do cenário proposto está ilustrada na Figura 15.16.

Figura 15.16 – Proposta 3: a) Projeto conceitual de quebra-mares destacados para formação de saliências por meio do Modelo Parabólico; b) Arranjo final da Proposta 3

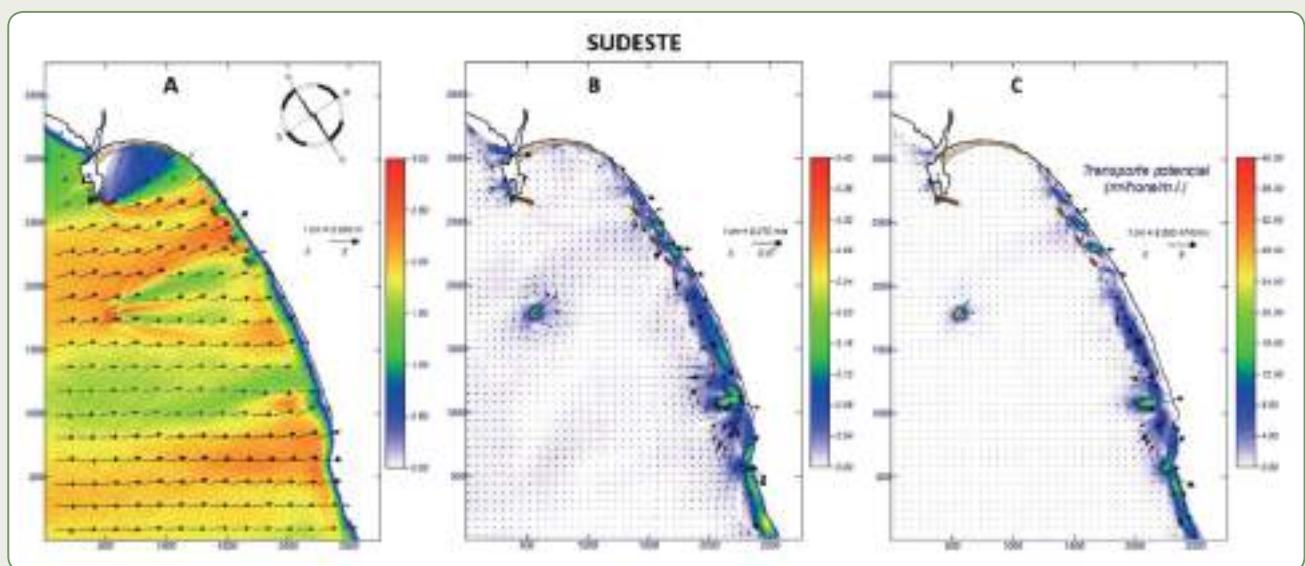


Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados da modelagem dessa alternativa para ondas de SE, caso mais extremo, podem ser observados na Figura 15.17. Estes novamente são ilustrados na forma de campos de cristas e cavas, altura significativa de onda, de correntes e transporte de sedimentos gerado pela ação das ondas. Nas

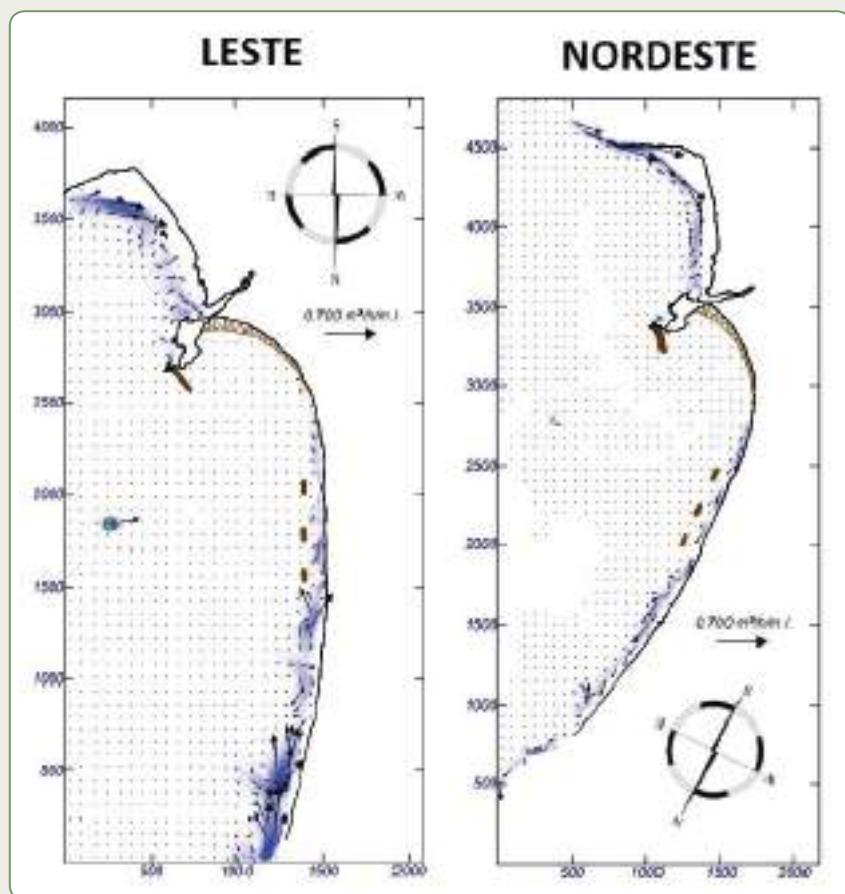
Figura 15.17b e 15.18 podem ser observadas células de circulação na sombra dos quebra-mares e a diminuição do transporte de sedimentos na zona de foco de energia de onda, atenuada pela presença das estruturas rígidas. Essa variabilidade ocorre devido à difração das ondas nas extremidades dos quebra-mares, causando áreas de menor e maior energia de onda na sombra desses quebra-mares, possibilitando a formação de células de correntes e transporte de sedimentos. Forma-se um regime hidrodinâmico e de transporte seccionado na área afetada pelos quebra-mares, com consequente redução nas velocidades das correntes e potencial redução do transporte de sedimentos. Do ponto de vista morfodinâmico, essa condição hidrodinâmica proporcionada pelo campo de quebra-mares destacados possibilita a formação das saliências na linha de costa.

Figura 15.17 – Ondulação de SE – Proposta 3: a) altura significativa de onda (m); b) correntes geradas pela onda (m/s); c) transporte de sedimentos ($\text{m}^3/\text{hora/m.l}$)



Fonte: Dos autores (2018).

Para os demais estados de mar simulados, os resultados de correntes e transporte de sedimentos estão ilustrados na Figura 15.18. Comparando o cenário atual (Figura 15.9d e 15.10d) com a Proposta 3 (Figura 15.18), observa-se que de maneira geral a proposição diminui o transporte de sedimentos na zona de sombra dos quebra-mares destacados para todos os cenários hidrodinâmicos simulados.

Figura 15.18 – Proposta 3: Transporte residual de sedimentos ($\text{m}^3/\text{hora/m.l.}$). Ondas de E e NE

Fonte: Dos autores (2018).

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

A partir do diagnóstico de equilíbrio de praia em planta obtido por meio do Modelo Parabólico de Hsu e Evans (1989) e da modelagem numérica utilizando o SMC, foi possível a elaboração de um modelo conceitual do comportamento morfodinâmico da Praia da Armação do Pântano do Sul sob influência de três estados de mar mais frequentes. O modelo conceitual aponta para uma movimentação resultante de sedimentos para o setor norte da praia, principalmente sob regime mais energético de SE. Essa característica mostra a importância dos eventos meteoceanográficos pontuais de alta energia que muitas vezes ocorrem no outono e desencadeiam erosão costeira. Essa erosão se faz mais sentida no trecho centro-sul da praia, zona mais urbanizada. A saída de sedimentos desse setor ocorre devido aos gradientes hidráulicos resultantes da presença de uma zona de sombra gerada pelo promontório rochoso e devido à focalização de energia de ondas pela presença de um parcel na antepraia da Armação. Padrões de focalização de energia de ondas similares aos observados na Armação foram testados por modelagem numérica de casos hipotéticos e descritos em detalhe por Barletta (2006). Na Armação, esse foco de energia na praia se desloca dependendo da direção de incidência de onda. A intensidade da focalização varia com a energia da ondulação. Ondas de E contribuem para o fornecimento de sedimentos para a área mais vulnerável à erosão, enquanto as ondulações de NE tendem a formar correntes e transporte que levam sedimento para o norte.

Todavia, o transporte gerado por essas condições tem ordem de grandeza pelo menos dez vezes menor que o transporte gerado por ondas de SE.

Considerando a tendência do transporte de sedimentos para o norte, um dos questionamentos ainda não respondido é a contribuição do volume de sedimentos da Praia do Matadeiro juntamente com a desembocadura do rio Quinca Antônio, para a praia da Armação, uma vez que estas já tiveram comunicação direta. Trata-se de uma antiga fonte de sedimentos atualmente obstruída pelo enrocamento existente entre a praia da Armação e a Ilha das Campanhas (Figura 15.19). Esse cenário não foi simulado e deve ser contemplado em atividade subsequente para um melhor entendimento sobre possíveis fontes de sedimento e soluções de engenharia para a mitigação da erosão no trecho centro-sul da Armação. Ressalta-se ainda que os dados batimétricos mais atuais existentes para a região foram coletados em 2009 e representam a situação da praia um ano antes das ressacas e da intervenção emergencial realizada na região (construção do enrocamento).

Figura 15.19 – Potenciais fontes de sedimento para a praia da Armação a serem consideradas em simulações futuras



Fonte: Dos autores (2018).

Sob a luz da engenharia costeira, o modelo conceitual produzido mostra a importância de eventos de alta energia na erosão da linha de costa. A área mais crítica do ponto de vista de erosão costeira é a seção da praia atingida pela focalização de energia de ondas de SE, que também é a zona urbanizada. A modelagem de três alternativas para recuperação do trecho erodido da praia da Armação do Pântano do Sul e diminuição da perda de sedimentos desse setor para o norte foi realizada. Essas alternativas são caracterizadas pela combinação de estruturas rígidas de proteção com engordamento artificial da praia na forma de aterro hidráulico. Mesmo que a determinação do comportamento natural da praia e a proposição e análise de soluções de engenharia tenham sido realizadas de forma conceitual, o estudo abre o caminho para conceitos de manejo da erosão da praia da Armação. Procurou-se entender o ambiente para posteriormente propor soluções que operem em conjunto com a natureza,

sinergizando o desempenho dessas soluções para recuperação e aumento da proteção em situações de eventos extremos. Os resultados apontam para uma melhoria gradativa de desempenho da Proposta 1 à Proposta 3. A análise das soluções obedeceu a um processo interativo, em que o resultado de uma proposta era utilizado para elaborar as melhorias nas propostas seguintes. Preliminarmente a Proposta 3 mostrou melhor desempenho. A distância entre os quebra-mares e a linha de costa e entre os quebra-mares vizinhos foi determinada através do Modelo Parabólico de Hsu e Evans (1989). Outras alternativas passíveis de serem testadas não foram apresentadas neste trabalho, mas podem ser encontradas em Nicolau e Thiesen (2011). Um exemplo é adotar as saliências estimadas pelo Modelo Parabólico como linha de costa de entrada no SMC, para modelar a hidrodinâmica e o transporte de sedimentos na presença dessas feições.

As soluções de engenharia propostas têm a finalidade de aumentar a vida útil da praia hipoteticamente recuperada pelo aterro hidráulico, diminuindo as taxas de perdas, resultando em menor frequência de manutenção. Tendo em vista o entendimento do comportamento hidrodinâmico da praia da Armação do Pântano do Sul e a proposição de soluções possíveis para a mitigação da erosão costeira e recuperação de trechos de praia, a metodologia utilizada se mostrou adequada para formular soluções e realizar estudos preliminares essenciais na abordagem de problemas de erosão costeira. Nesse sentido o SMC se mostrou uma eficaz ferramenta para auxiliar na tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave regime characteristics of the southern Brazilian coast. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL AND PORT ENGINEERING IN DEVELOPING COUNTRIES, 6., 15th to 19th September 2003, Colombo, Sri Lanka, *Proceedings...*, Colombo, Sri Lanka, 2003. p. 15. 1 CD-ROM.
- BARLETTA, R. C. *Teste e aplicação de modelos parabólicos de refração-difração com ênfase na propagação de ondas sobre parcéis*. 2006. 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- BROWN, A. C.; MCLACHLAN, A. *Ecology of sandy shores*. Amsterdam: Elsevier, 1990. 327 p.
- ABREU DE CASTILHOS, J. *Estudo evolutivo, sedimentológico e morfodinâmico da planície costeira e praia da Armação, Ilha de Santa Catarina, SC*. 1995. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.
- DALBOSCO, A. L. P. *Análise histórica da linha de costa e dos padrões hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos da Praia da Armação, Ilha de Santa Catarina, SC*. 2013. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DNH). *Porto de Florianópolis*. Tábua da maré. 2005. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>>. Acesso em: ago. 2015.
- HORN, F. N. O. Granulometria das praias arenosas de Santa Catarina, SC. *Gravel*, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, v. 4, n. 4, p. 1-21, dez. 2006.
- HSU, J. R. C.; EVANS, C. Parabolic bay shapes and applications. *Proceedings of Institution of Civil Engineers*, London, England, v. 87, p. 557-570, 1989.
- HUGHES, S. A. *The TMA shallow-water spectrum description and applications*. Tech. Rept. CERC-84-7. Vicksburg, Miss.: Coast. Eng. Res. Center, Waterways Experiment Station, 1984. 42 p.

- KOMAR, P. D. **CRC Handbook of coastal processes and erosion**. Florida, USA: CRC Press Inc., 1983. 320 p.
- MAZZER, A. M. **Proposta metodológica para análise de vulnerabilidade da orla marítima à erosão costeira: aplicação em praias arenosas da costa sudeste da Ilha de Santa Catarina (Florianópolis, Santa Catarina-Brasil)**. 2007. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- NICOLAU, A. P. S; THIESEN, S. **Análise hidrodinâmica e de padrões de transporte de sedimentos e propostas para a recuperação da praia da Armação do Pântano do Sul – Florianópolis/SC**. 2011. 131 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.
- NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422 p.
- POLLETE, M.; SOUZA, J. G.; MAZZER, A. M. Geoecologia da paisagem costeira do Estado de Santa Catarina. In: REGIONAL CONFERENCE OF LATIN AMERICAN AND CARIBBEAN COUNTRIES – INTERNATIONAL GEOGRAPHICAL UNION, LATIN AMERICAN IN THE WORLD: ENVIRONMENT SOCIETY AND DEVELOPMENT, 1995. Havana, Cuba, 1995. **Resumos...** Havana, p. 200.
- SIMÓ, D. H.; HORN, F. N. O. Caracterização e distribuição espacial das “ressacas” e áreas de risco na Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. **Gravel**, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, v. 2, n. 1, p. 93-103, out. 2004.
- SOULSBY, R. L.; HAMM, L.; KLOPMAN, G.; MYRHAUG, D.; SIMONS, R. R.; THOMAS, G. P. Wave-Current Interaction Within and Outside the bottom Boundary Layer. **Coastal Engineering**, n. 21, p. 41-69, 1993.
- WISNER, B.; BLAIKIE, P.; CANNON, T.; DAVIS, I. **At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters**. 2. ed. New York, USA: Routledge, 2004.

AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO POTENCIAL HIDRODINÂMICO E DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA PRAIA DO CASSINO E MOLHE OESTE DA BARRA DE RIO GRANDE (RS)

Felipe Sprovieri
José Antonio Scotti Fontoura

RESUMO

A modelagem de ondas, correntes e transporte de sedimentos requer elevado esforço computacional, exigindo demasiado tempo no processamento dos cálculos. Para tornar esse tipo de simulação viável existe a necessidade de reduzir as séries temporais de dados de ondas em um conjunto de casos representativos para modelagem. A aplicação de técnicas visando utilizar casos representativos do clima de ondas em águas rasas é uma alternativa de grande potencial para a modelagem do transporte de sedimentos em praias. A modelagem numérica aliada a essas técnicas possibilita reduzir o tempo computacional necessário para as simulações, permitindo assim a viabilidade de estudos de transporte de sedimentos a médio e/ou curto prazo. A série temporal de dados de ondas para águas rasas foi reconstruída a partir da metodologia do Hipercubo. A redução dos casos de ondas representativos para modelagem do transporte de sedimentos foi conduzida para a Praia do Cassino, Rio Grande (RS), através do método do fluxo de energia, na qual 12 casos de onda representativos foram selecionados. O Sistema de Modelagem Costeira (SMC) desenvolvido na Universidad de Cantabria, Espanha, foi usado para simular a propagação de ondas, correntes e transporte de sedimentos na Praia do Cassino. Os resultados evidenciam que o banco localizado a sudoeste (SO) dos molhes da Barra de Rio Grande é

responsável pela convergência da energia de onda incidente na Praia do Cassino, governando as alturas de ondas observadas na linha de praia. A variação espacial das correntes longitudinais e transversais presentes na Praia do Cassino é função da direção de incidência das ondas, sendo que as maiores intensidades de correntes calculadas estão associadas aos locais em que as ondas apresentam maiores alturas. O potencial do transporte longitudinal de sedimentos resultante na Praia do Cassino é para nordeste, com taxa média de 124.159 m³/ano. A maior taxa de transporte ocorre próximo ao molhe oeste, onde 518.696 m³/ano de sedimentos são transportados para nordeste. Embora o potencial de transporte resultante ao longo da praia seja para nordeste, existe um potencial de transporte resultante para sudoeste em três setores da praia, onde a taxa de transporte máxima é de 103.147 m³/ano.

Palavras-chave: Hipercubo. Fluxo de energia. SMC. Modelagem numérica e transporte de sedimentos.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a abordagem dos estudos envolvendo o transporte de sedimentos deixou de ser apenas descritiva, partindo de simples modelos analíticos para sofisticados modelos numéricos (FREDØE; DEIGAARD, 1992). Embora o nível tecnológico atual possibilite o uso de computadores mais potentes, aliado a novas técnicas numéricas, o estudo do transporte de sedimentos em praias ainda apresenta incertezas consideráveis. Isso é explicado pelo complexo comportamento hidrodinâmico das ondas e correntes, associado aos mecanismos de transporte de sedimentos, atuantes na zona de surfe e espraiamento das praias (ELFRINK, 1996).

Os mecanismos que governam o processo de transporte sedimentar e as taxas que regem esse transporte afetam diretamente a qualidade, a durabilidade, a segurança e os custos (gerenciamento) envolvidos em obras costeiras (SPROVIERI; FONTOURA, 2012), por isso é imprescindível aprimorar ainda mais as técnicas utilizadas nesta área do conhecimento. Partindo desse pressuposto, o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) desenvolvido pelo antigo Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (atual Instituto Hidráulico) da Universidad de Cantabria, Espanha, para o Ministerio de Medio Ambiente da Espanha em 2002, foi utilizado para avaliar o potencial hidrodinâmico e do transporte de sedimentos na Praia do Cassino e Molhe Oeste da Barra de Rio Grande (RS).

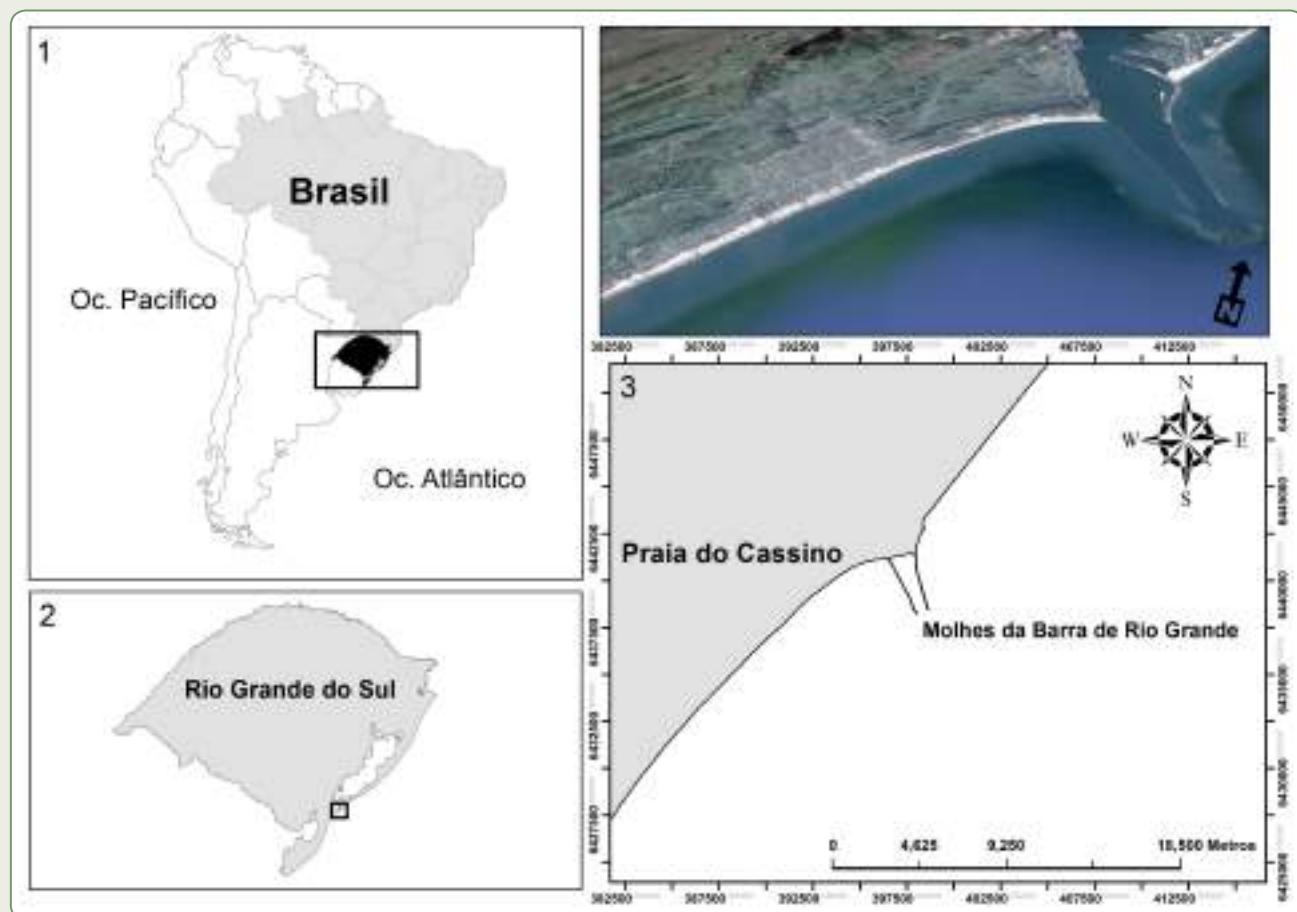
O SMC é uma interface gráfica que integra diversos modelos numéricos, os quais fornecem suporte prático para a correta aplicação de metodologias desenvolvidas para ambientes costeiros, sendo uma ferramenta numérica orientada especificamente para engenheiros/técnicos que desenvolvem suas atividades no âmbito costeiro. O sistema contempla embasamento teórico específico para os usuários, possibilitando a unificação de critérios técnicos e organização sistemática dos modelos numéricos, incrementando a qualidade dos estudos e, portanto, facilitando a tomada de decisões (GONZÁLEZ et al., 2007).

Como o estudo do transporte de sedimentos através de experimentos de modelagem numérica demonstra alto potencial na avaliação e compreensão dos processos que governam o ambiente costeiro, e como a disponibilidade de dados de ondas medidos em águas rasas é escassa, torna-se importante aplicar a metodologia aqui descrita para a costa do estado do Rio Grande do Sul, especialmente para a Praia do Cassino, localizada no município de Rio Grande (RS), onde a presença dos molhes da Barra de Rio Grande exerce importante papel na hidrodinâmica local, influenciando diretamente os padrões de transporte de sedimentos na praia (SPROVIERI et al., 2010).

ÁREA DE ESTUDO

A Praia do Cassino está localizada na porção centro-sul da Planície Costeira do estado do Rio Grande do Sul, no município de Rio Grande e, está situada ao sul da desembocadura da Lagoa dos Patos (Figura 16.1).

Figura 16.1 – Localização da área de estudo, mostrando a Praia do Cassino e os Molhes da Barra de Rio Grande (Datum WGS – 84. Zona 22 S (UTM))



Fonte: Dos autores (2018). Foto: Google Earth® (2007).

A linha de costa do estado do Rio Grande do Sul se estende por 630 km, apresentando características homogêneas ao longo de sua extensão. A ausência de promontórios rochosos e/ou baías no decorrer de sua trajetória a torna singular, sendo uma costa arenosa totalmente exposta à energia incidente do ambiente oceânico adjacente.

A porção inicial da Praia do Cassino, nos primeiros 15 km de praia, é demasiadamente influenciada pela desembocadura da Lagoa dos Patos, onde a presença dos molhes da Barra de Rio Grande exerce papel fundamental no comportamento hidráulico da praia. Nesse setor, a linha de costa possui orientação segundo o eixo nordeste-sudoeste (NE-SO), enquanto o eixo central da desembocadura da Lagoa dos Patos, nos molhes da Barra de Rio Grande, segue orientação noroeste-sudeste (NO-SE), formando um ângulo de aproximadamente 73° com o prolongamento da linha de praia ao sul (FONTOURA, 2004).

METODOLOGIA

A metodologia de estudo consistiu em três fases principais:

- 1) reconstrução da série temporal de ondas em águas rasas;
- 2) redução da série temporal de ondas em casos representativos; e
- 3) modelagem numérica de ondas, correntes e transporte de sedimentos com base nos casos de ondas representativos. A seguir o detalhamento da metodologia é apresentado.

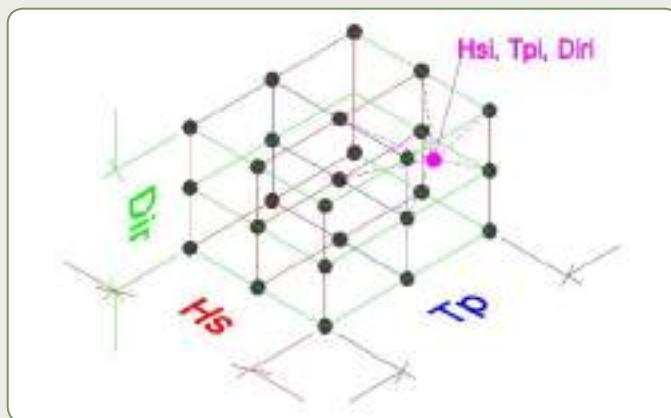
Reconstrução da série temporal de ondas em águas rasas

A grande maioria das regiões ao redor do mundo, principalmente nos países em desenvolvimento, carece de longas séries temporais de dados de ondas medidos em águas rasas. Para suprir essa deficiência, Camus et al. (2010) desenvolveram uma metodologia baseada no uso de séries temporais de dados de onda, provenientes dos programas de reanálise em águas profundas (e.g. *Wave Watch III – WWIII*), modelos de propagação em águas rasas, assim como técnicas de interpolação que permitem gerar uma série temporal de dados de ondas em águas rasas com igual comprimento da série temporal original de águas profundas.

Essa metodologia de transferência da série original de águas profundas para águas rasas, denominada Hipercubo, funciona como uma técnica de interpolação linear em três dimensões (H_s , T_p e Dir), aplicada aos parâmetros de onda e coeficientes de propagação com características direcionais. Possibilita construir a série temporal de águas rasas com o mesmo número de casos da série temporal original em águas profundas. Essa metodologia é utilizada em ambiente MATLAB®, através da aplicação das funções INTERP(N), onde N é o número de variáveis a serem interpoladas e, da função GRIDDATA, que interpola pontos específicos ((X_i, Y_i)) na superfície interpolada (INTERP(N)), buscando como produto os valores de Z_i nos respectivos pontos específicos.

O conceito do método é apresentado na Figura 16.2, representando esquematicamente o funcionamento da técnica, que permite obter os parâmetros de onda em um determinado ponto ($H_{s,i}$, $T_{p,i}$, Dir_i), a partir da interpolação dos resultados de diferentes combinações de H_s , T_p , Dir .

Figura 16.2 – Esquema da metodologia do Hipercubo, que permite obter os parâmetros de onda no ponto de estudo para um dado estado de mar ($H_{s,i}$, $T_{p,i}$ e Dir_i), a partir da interpolação dos resultados da propagação de casos com diferentes combinações de H_s , T_p e Dir



Fonte: Dos autores (2018).

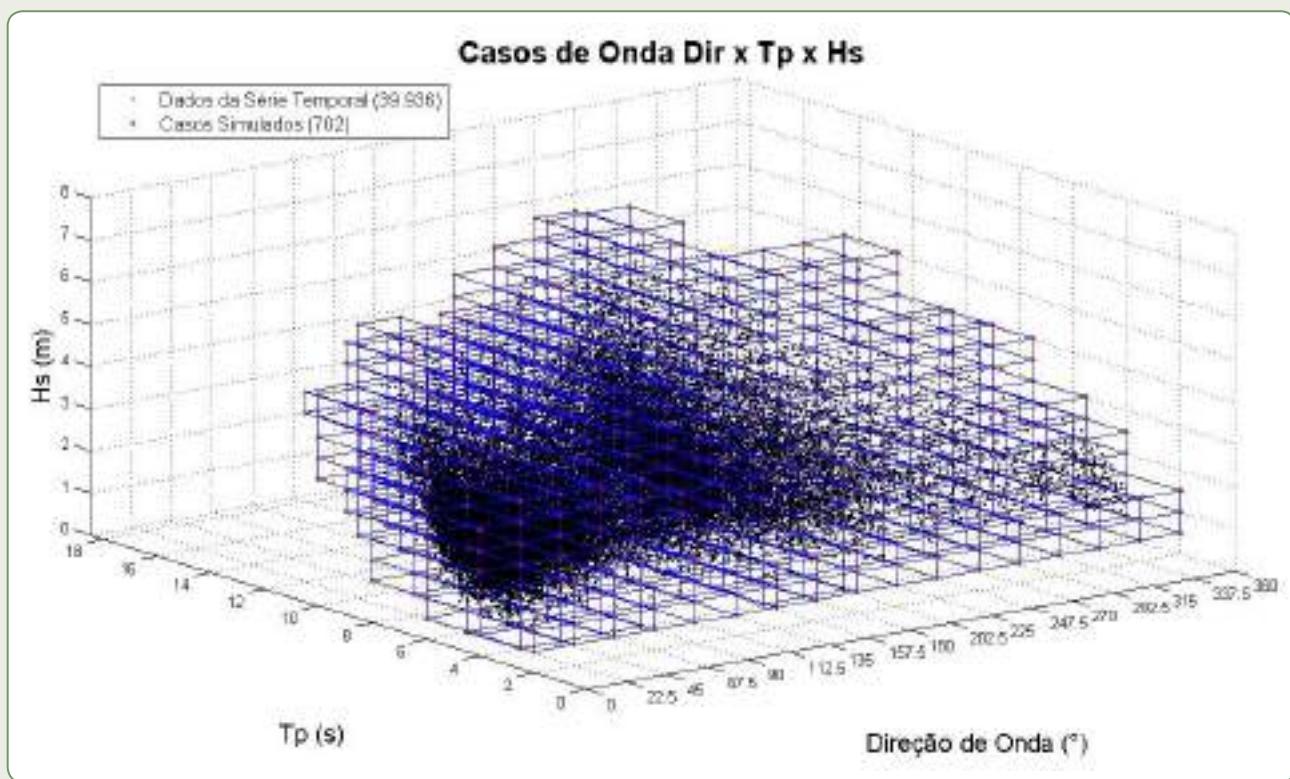
Seleção dos casos

A série temporal de dados de ondas utilizada na aplicação do Hipercubo, obtida através dos dados de reanálise da NOAA, foi utilizada para a aplicação da metodologia citada. O número total de registros contidos na série temporal é de 39.936 casos de onda (13 anos e oito meses).

Devido à inviabilidade computacional de propagar todos os 39.936 casos de onda (estados de mar) extraídos do modelo WWIII desde águas profundas até águas rasas, foi realizada uma seleção dos casos de ondas da série temporal a serem propagados.

O critério adotado na escolha dos casos de propagação foi selecionar todos os casos de onda possíveis de ocorrer na área de estudo. Para isso os 39.936 casos foram visualizados, conforme Figura 16.3, e a partir dessa visualização foram escolhidos limites de seleção para cada classe de 0,5 m na distribuição das alturas de ondas (H_s), 2 segundos na distribuição dos períodos de onda (T_p) e 22,5 graus na distribuição das direções de ondas incidentes (Dir_p). Os casos foram selecionados no intervalo das classes, ou seja, a cada 0,5 m, a cada 2 segundos e a cada 22,5 graus foi marcado um caso de onda. Esses casos foram representados pelos pontos vermelhos simbolizados na Figura 16.3.

Figura 16.3 – Combinações de direções (Dir_p), altura significativa (H_s) e período de pico (T_p) representativos selecionados para as simulações de propagação de ondas



Legenda: Os pontos em preto indicam os dados de reanálise NWW3 (1.000 m) e a linha pontilhada preta delimita a área considerada na interpolação para a transferência

Fonte: Dos autores (2018).

Os 702 casos que foram definidos para permitir a interpolação de todas as combinações de $H_s - T_p - Dir$ que ocorrem na série temporal em águas profundas são representativos para as direções mais frequentes, de N até SSO (0-225°). As direções de SSO até NNO (225-360°) não foram utilizadas

na interpolação dos casos para a aplicação do Hipercubo, pois as ondas incidentes dessas direções não atingem o ponto de interesse e, dessa maneira, o resultado de altura significativa (H_s) das propagações tende a zero nesse caso (situações de calmarias e ondas em direção ao mar).

Propagação dos casos

Para reconstruir a série temporal em águas rasas, a partir da série temporal original em águas profundas obtidas do modelo WAVEWATCH III, foram selecionados 702 casos representativos de ondas para serem propagados com o modelo numérico SWAN (*Simulating Waves Nearshore*). A propagação dos casos ocorreu desde águas profundas, a uma profundidade de 1.000 m, até águas rasas, a uma profundidade de 15 m, conforme Figura 16.4.

O SWAN computa a evolução de um campo de ondas de cristas curtas aleatório, em águas profundas, intermediárias e rasas, assim como em ambientes com presença de correntes (e.g. desembocaduras). O modelo calcula os processos de refração provocados por correntes ou por mudanças na profundidade e representa os processos de geração de ondas pelo vento, dissipação por *whitecapping*, fricção com o fundo e quebra induzida pela profundidade, assim como interações não lineares onda-onda (*quadruplets* e *triads*), explicitamente, com as formulações que representam o “estado da arte” em modelagem de ondas. Ondas bloqueadas por correntes são também representadas explicitamente no modelo. Processos de difração, transmissão, bloqueio e reflexão em obstáculos também estão incluídos nas formulações do modelo, estes muito importantes em estudos de engenharia costeira e portuária. O SWAN tem sido validado e verificado com sucesso em uma gama de experimentos complexos de campo e laboratório (RIS; BOOIJ; HOLTHUIJSEN, 1999; WL-DELFT HYDRAULICS, 1999, 2000).

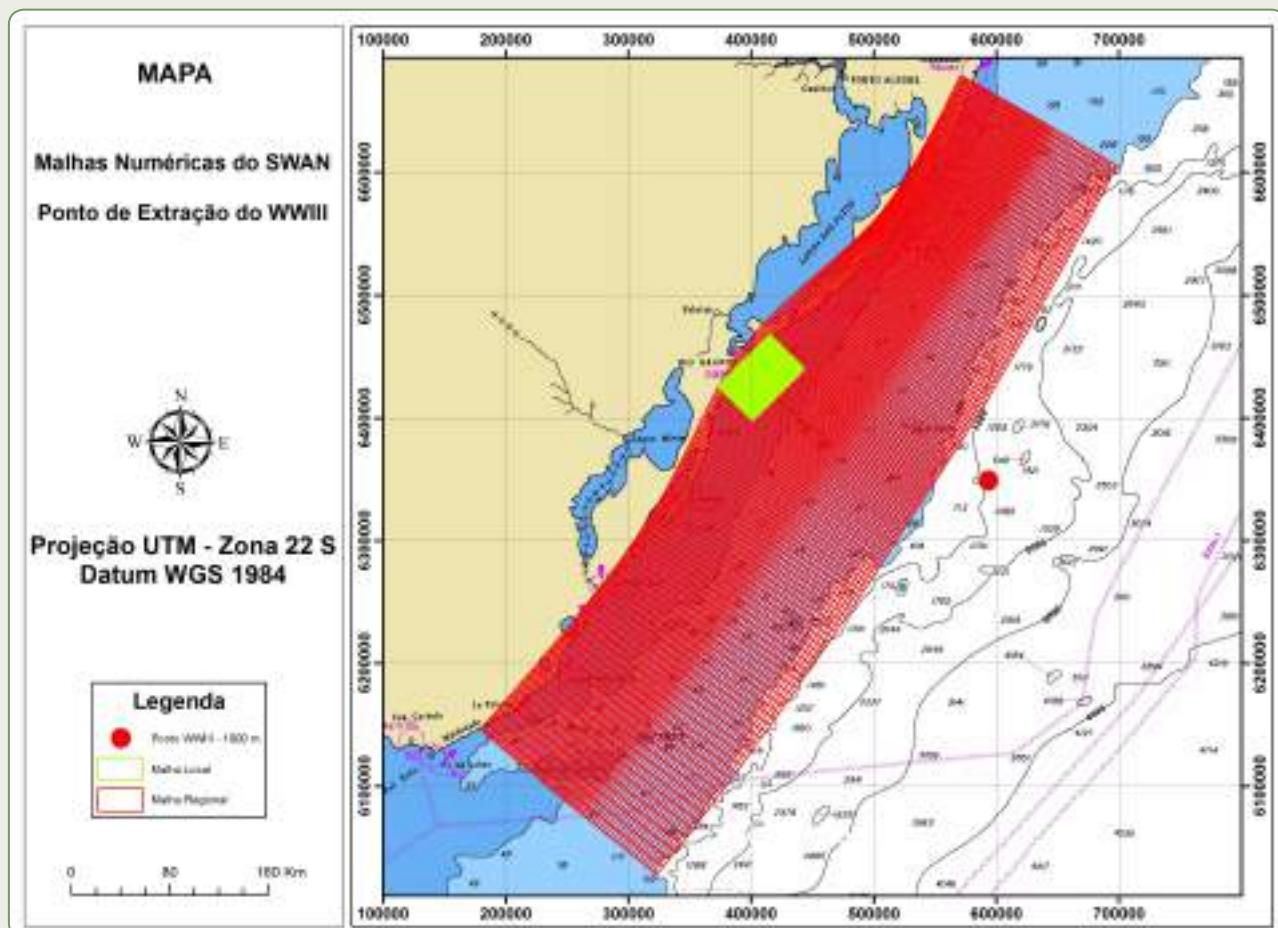
Os 702 casos de ondas representativos foram propagados em modo estacionário, considerando os efeitos de refração, difração, dissipação com o fundo e dissipação por quebra (coeficientes definidos como padrão). Os espectros de entrada foram definidos com os dados de H_s , T_p e Dir_p dos casos, adotando um espetro JONSWAP com parâmetro gama de agudeza de pico do espetro igual a 3,3. O espalhamento direcional foi definido com base no período de pico. Ondas com maior período (marulhos ou *swell*) apresentam um menor espalhamento direcional (4 até 15) e ondas com menor período (vagas ou *wind sea*) possuem maior espalhamento direcional (15 até 25). O espetro foi discretizado em 24 componentes de frequência e 72 componentes direcionais. Os contornos nordeste, sudeste e sudoeste da malha foram forçados com estado de mar constante para todos os casos de onda propagados.

Malha computacional

Para simular os processos de propagação das ondas desde o ponto de reanálise do modelo WWIII até as proximidades da costa de Rio Grande, foram criadas duas malhas de cálculos acopladas (aninhadas), com resoluções distintas, como apresentado na Figura 16.4. A malha regional é uma malha curvilínea composta por 149 x 78 elementos de cálculo, que apresenta seu contorno sudeste aproximadamente paralelo à isóbata de 1.000 m, permitindo que a fronteira externa da malha represente uma profundidade aproximadamente constante ao longo do domínio computacional. O espaçamento da malha regional é de aproximadamente 3.000 m, sendo que esse valor diminui com a aproximação da costa. A malha local é uma malha ortogonal regular composta por 122 x 183 elementos de cálculo com espaçamento de 250 m x 250 m, posicionada na região da Praia

do Cassino, garantindo dessa forma o maior detalhamento dos resultados nas proximidades do ponto de interesse. O modelo SWAN transfere os resultados obtidos na malha regional automaticamente para a fronteira da malha local.

Figura 16.4 – Malhas de cálculo acopladas utilizadas para propagação das ondas de águas profundas até o ponto de interesse em águas rasas



Legenda: Malha regional em vermelho e malha local em verde

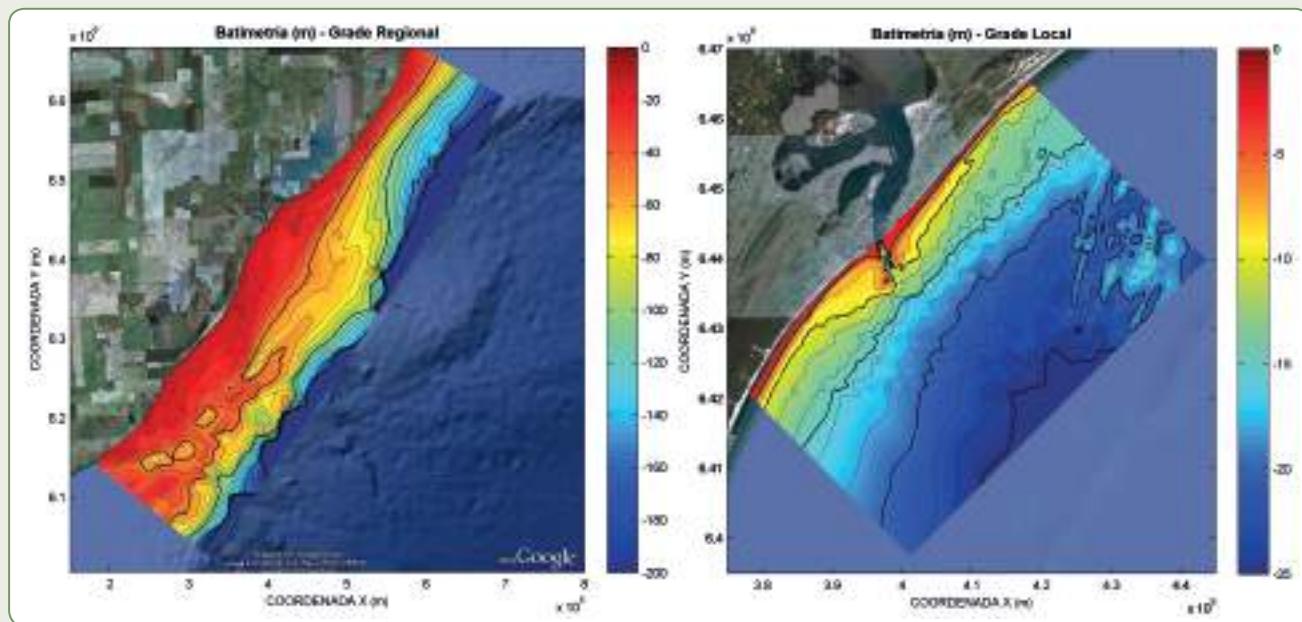
Fonte: Dos autores (2018).

Base batimétrica

Os valores de profundidade na área de estudo foram obtidos através da digitalização das cartas náuticas nº 2.200, 2.100, 90 e 30, digitalizadas e disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) em formato digital *raster*. Para a base batimétrica de detalhe da Praia do Cassino e região adjacente ao Molhe Oeste da Barra de Rio Grande, foram utilizados dados batimétricos disponibilizados pelo Laboratório de Oceanografia Geológica – LOG/FURG.

A base batimétrica regional e local utilizada na propagação dos casos de onda são apresentadas na Figura 16.5.

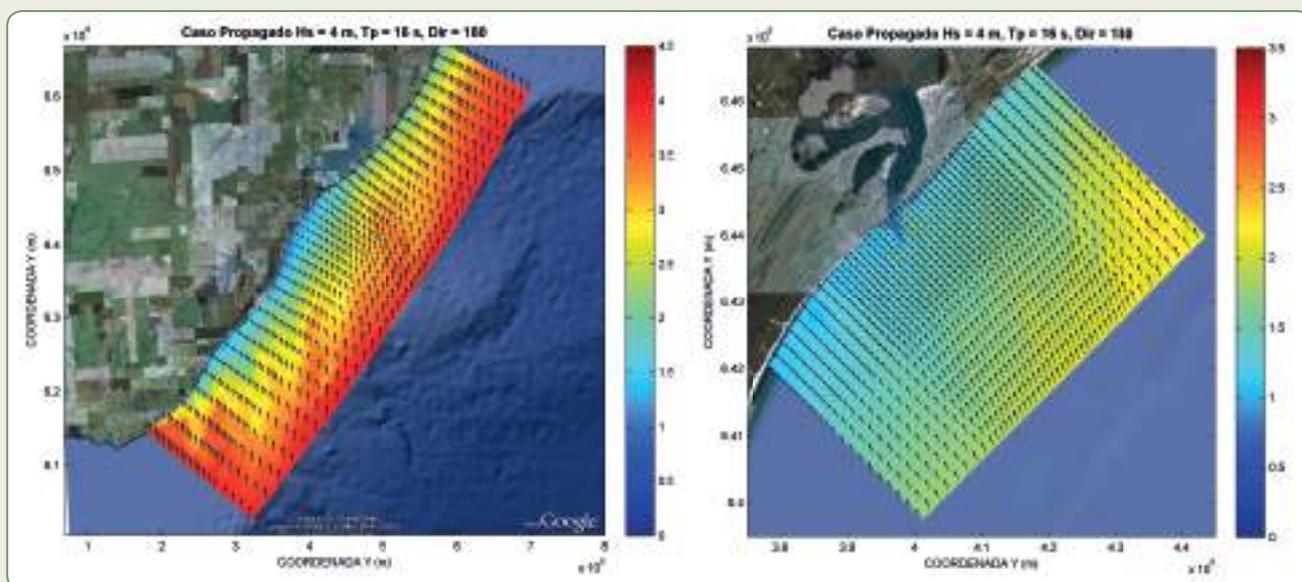
Figura 16.5 – Base batimétrica regional e local utilizada na propagação dos casos com o modelo SWAN (Datum WGS – 84. Zona 22 S (UTM))



Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2007).

Exemplos de resultados das propagações de onda realizadas com o modelo SWAN, para as respectivas malhas regional e local, são apresentados na Figura 16.6.

Figura 16.6 – Resultado de propagação de onda com o modelo SWAN sobre base batimétrica regional. Caso $H_s = 4$ m, $T_p = 16$ s e $\text{Dir} = 180^\circ$ (Datum WGS – 84. Zona 22 S (UTM))



Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2007).

Reconstrução da série temporal

Com os resultados de H_s , T_p e Dir_p obtidos na propagação dos 702 casos de onda (SWAN) (*e.g.* Figura 16.6) selecionados para o Hipercubo foram calculados os coeficientes de propagação de ondas (Eq. 16.1) e as direções de ondas associadas a cada um dos casos propagados. Com os valores dos coeficientes de propagação (K_p) correspondentes a cada caso propagado, juntamente com a direção de onda do caso, é realizada a interpolação na série temporal de águas profundas. Conhecendo o coeficiente de propagação (K_p), é possível obter o valor de altura de onda no ponto de interesse (Eq. 16.2).

$$\kappa_p = \frac{H_{ponto}}{H_0} \quad (\text{Eq. } 16.1)$$

$$H_{ponto} = K_p \times H_0 \quad (\text{Eq. } 16.2)$$

O ponto escolhido para reconstrução está localizado a 15 m de profundidade, nas coordenadas 52°05'30,27" W e 32°16'0,23" S (DATUM WGS-84). O ponto escolhido é propositalmente localizado na fronteira externa da malha numérica utilizada pelo SMC, a qual é utilizada para simular o transporte de sedimentos.

Redução da série temporal

O método de redução do clima de ondas para modelagem do padrão de transporte resultante de sedimentos a médio/longo prazo seleciona um grupo limitado de condições de ondas representativas, buscando representar as características da série original na seleção (DOBROCHINSKI, 2009).

A escolha dos casos representativos de onda para modelagem é fundamentada no conceito de fluxo de energia de ondas. O fluxo de energia de cada condição de onda da série temporal de dados é calculado através da Eq. 16.3:

$$E_{total} = \sum_{i=1}^j E_{f_i} = \sum_{i=1}^j \left(\frac{1}{8} \rho g H_{s_i}^2 * C_g \right) \quad (\text{Eq. } 16.3)$$

onde ρ é a densidade da água (1025 g/m³), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), H_{s_i} é a altura significativa de onda (m) e C_g é a celeridade de grupo de ondas (m/s), em águas profundas obtida pela Eq. 16.4:

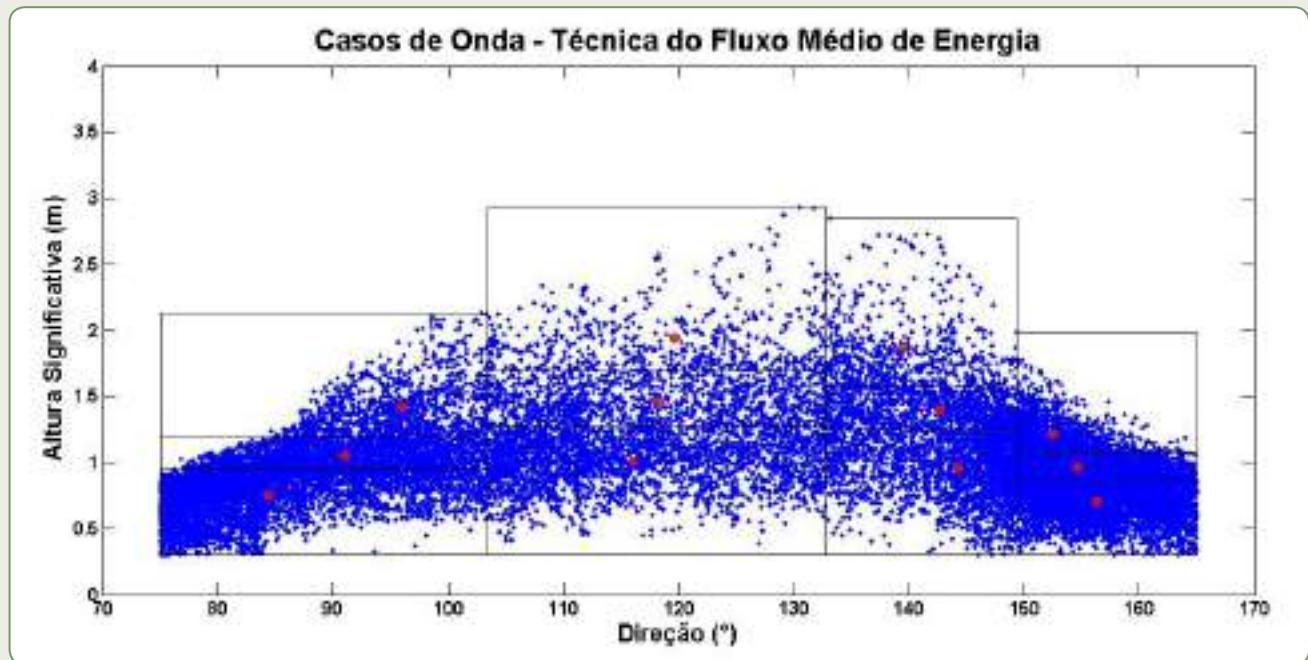
$$C_g = 1,56 \frac{T}{2} \quad (\text{Eq. } 16.4)$$

onde T é o período da onda (s).

As classes definidas no método representam uma condição de energia (Fluxo de Energia) para um determinado número de casos de ondas (H_s , T_p e Dir_p). O número de classes de direção e altura de onda é escolhido de acordo com a distribuição dos dados analisados. No caso deste trabalho,

foram escolhidas três classes para altura de onda e quatro classes para direção de incidência da onda, dessa forma totalizando 12 casos representativos (Figura 16.7), os pontos azuis distribuídos no gráfico representam os casos de onda (H_s , T_p e Dir_p) obtidos para águas rasas, os quadriláteros (12) representam as classes com energia média e o ponto vermelho central dentro de cada quadrilátero é o caso de onda representativo da classe.

Figura 16.7 – Seleção dos casos representativos de onda



Legenda: Os pontos azuis representam os dados da série temporal em águas rasas. Os pontos vermelhos são os casos representativos de cada classe obtidos pela técnica do fluxo de energia

Fonte: Dos autores (2018).

Os valores obtidos para os casos representativos são apresentados no Quadro 16.1.

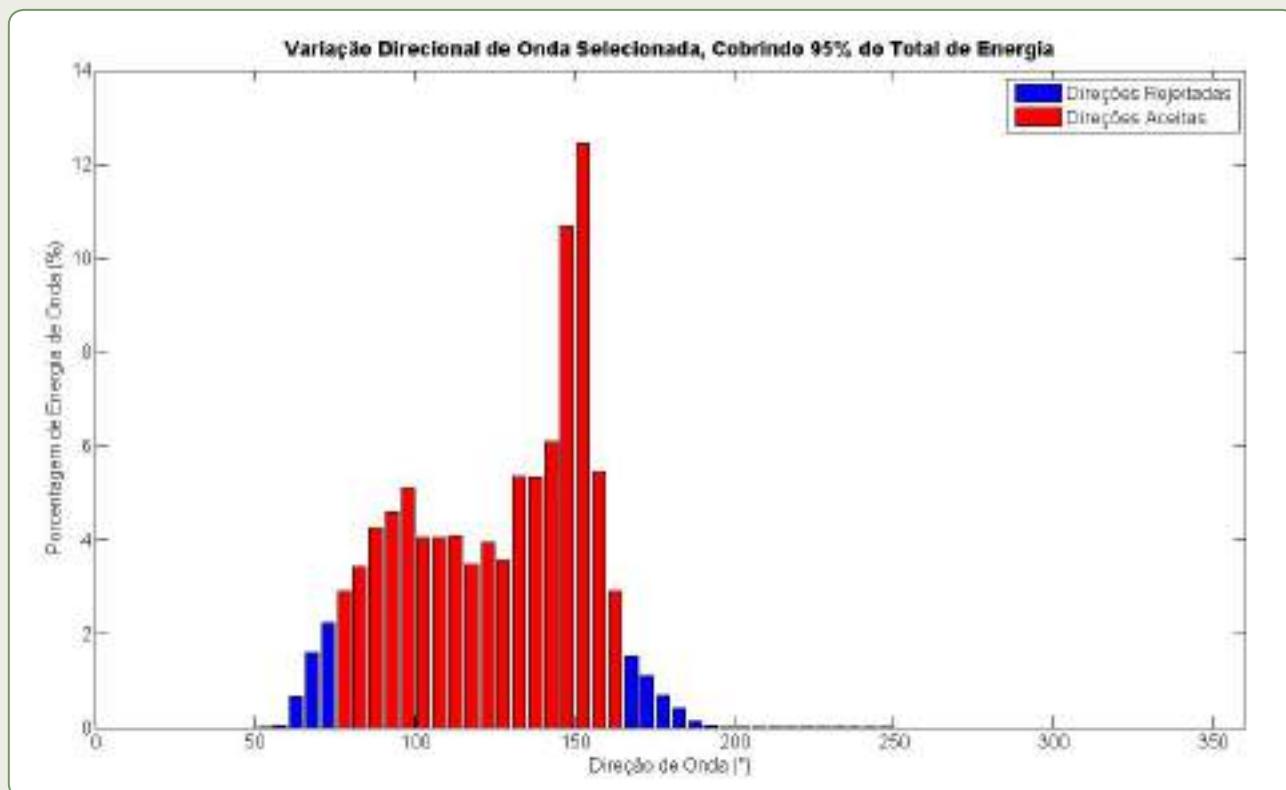
Quadro 16.1 – Casos de onda representativos obtidos pelo método do Fluxo de Energia

Caso	H_s (m)	T_p (s)	Dir (°)	Freq. Oc. (dias/anos)
1	0,7523	7,3672	84,2904	45,6250
2	1,0501	7,7488	91,0136	22,3015
3	1,4207	8,4202	95,9024	11,0595
4	1,0098	7,9375	116,0494	23,6885
5	1,4607	8,7965	118,2471	10,1470
6	1,9413	9,6323	119,6993	5,1100
7	0,9585	9,9757	144,2866	20,9510
8	1,3967	9,8493	142,6495	10,0740
9	1,8645	9,9305	139,5158	5,4020
10	0,7043	9,6481	156,2421	40,2960
11	0,9647	9,4399	154,6527	22,0095
12	1,2151	9,7362	152,475	12,5560

Fonte: Dos autores (2018).

A frequência encontrada para cada classe representa o número de dias em que o respectivo caso ocorre ao longo de um ano. A soma de todos os casos representa aproximadamente 230 dias. Os dias que faltam para completar um ano (365 dias) são considerados dias com condições de calmaria para o local do estudo (ondas que chegam à costa com menos de 0,3 m de altura – limite de corte utilizado segundo importância na altura de onda referente ao transporte/energia) e situações onde a ondulação incidente se propaga para fora da área de estudo, ou seja, ondulações entre SO e NNO ($225\text{--}360^\circ$). Os dados que não entram na série temporal reconstruída representam 5% da energia total dos casos calculados (Figura 16.8).

Figura 16.8 – Fluxo de energia (%) acumulado por classe direcional



Legenda: As barras azuis representam a porcentagem de energia que ficou fora da seleção e as barras vermelhas, as selecionadas

Fonte: Dos autores (2018).

A partir dos casos representativos obtidos é possível simular o transporte de sedimentos resultante na Praia do Cassino. O total de sedimentos transportado para cada caso é ponderado pela frequência de ocorrência relacionada ao respectivo caso, dessa forma obtém-se o montante ao longo do ano. Para calcular o transporte longitudinal resultante ao longo da praia em um ano, basta somar todos os transportes calculados em cada caso de onda já ponderado pela frequência de ocorrência do caso.

Sistema de Modelagem Costeira – SMC

Apresentação do SMC

A modelagem numérica dos processos envolvidos no transporte de sedimentos na Praia do Cassino foi realizada através do Sistema de Modelagem Costeira (SMC). O SMC integra uma série de modelos numéricos, os quais se encontram estruturados de acordo com as escalas temporais e espaciais dos processos a serem modelados. Na Figura 16.9 é apresentada a estrutura de organização do SMC (GIOC, 2003a). No escopo do presente trabalho, foi utilizado para modelagem dos processos costeiros o “MOPLA”, ferramenta numérica inserida no módulo “Acordes”.

Figura 16.9 – Estrutura de organização do Sistema de Modelagem Costeira (SMC)



Fonte: Adaptado de GIOC (2003a).

MOPLA

O MOPLA é composto por três módulos numéricos distintos, os quais abrangem:

- 1) propagação e transformação das ondas (OLUCA);
- 2) sistema de correntes através dos tensores de radiação (COPLA);
- 3) cálculo do transporte de sedimento e evolução batimétrica (EROS).

Os modelos OLUCA, COPLA e EROS trabalham sequencialmente, pois os dados de saída de um modelo são utilizados como entrada para o próximo. Inicialmente, calculam-se os campos de ondas para os casos executados no modelo OLUCA. Os resultados obtidos são executados no COPLA para o cálculo do campo de correntes em função dos tensores de radiação gerados pelas componentes de

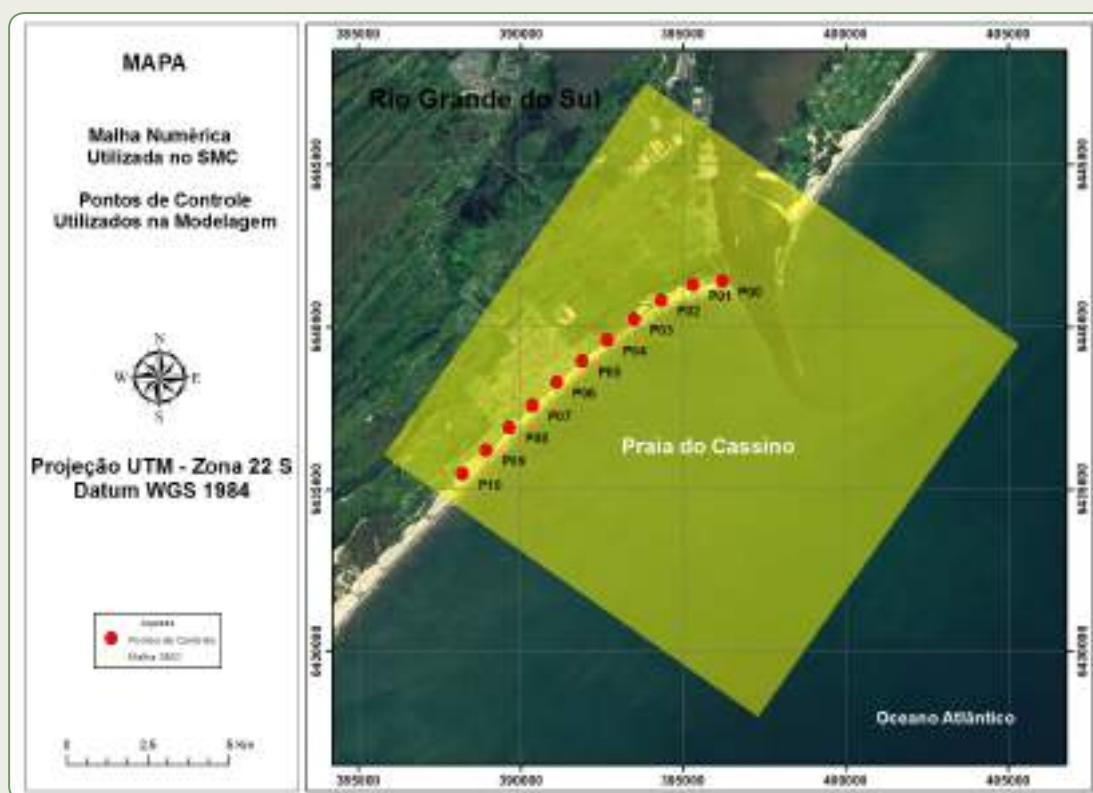
energia das ondas. E por fim, os dados de velocidade e direção do campo de correntes são utilizados para determinação do transporte de sedimentos (GIOC, 2003b).

Modelagem dos processos costeiros

A modelagem numérica dos processos costeiros (ondas, correntes e transporte de sedimentos) foi executada com o modelo SMC através da propagação dos 12 casos de onda representativos, apresentados anteriormente no Quadro 16.1. Todos os casos foram propagados espectralmente através do espectro Texel Marsen Arsloe (TMA), cuja aplicação é realizada para áreas próximas à costa onde as profundidades são relativamente pequenas e consequentemente as ondas são afetadas pelo fundo. A malha numérica utilizada para calcular os processos de propagação das ondas, geração de correntes e transporte de sedimentos associado a ondas e correntes no modelo SMC é composta por 700 x 700 elementos de cálculo. O espaçamento entre pontos de grade foi de 20 x 20 m, conforme apresentado na Figura 16.10. Esses valores referentes ao espaçamento da malha condizem com as especificações fornecidas em GIOC (2003c), e dessa forma o domínio computacional contempla a área de estudo (14.000 m^2). A fronteira externa sudeste da malha (entrada de ondas) é alinhada com a isóbata de 15 m, respeitando as limitações do modelo (GIOC, 2003c) e a profundidade para a qual a série temporal de ondas construída com a metodologia do Hipercubo foi gerada.

A composição granulométrica do substrato do modelo utiliza o D_{50} da Praia do Cassino, que é 0,125 milímetros (areia fina) (FONTOURA, 2004), sendo esse valor referente a todo o domínio computacional. O SMC não permite entrar com diferentes tamanhos de grão (granulometria) ao longo da malha computacional.

Figura 16.10 – Mapa apresentando a grade numérica utilizada na modelagem dos processos costeiros com o SMC (Datum WGS – 84. Zona 22 S (UTM))



Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2007).

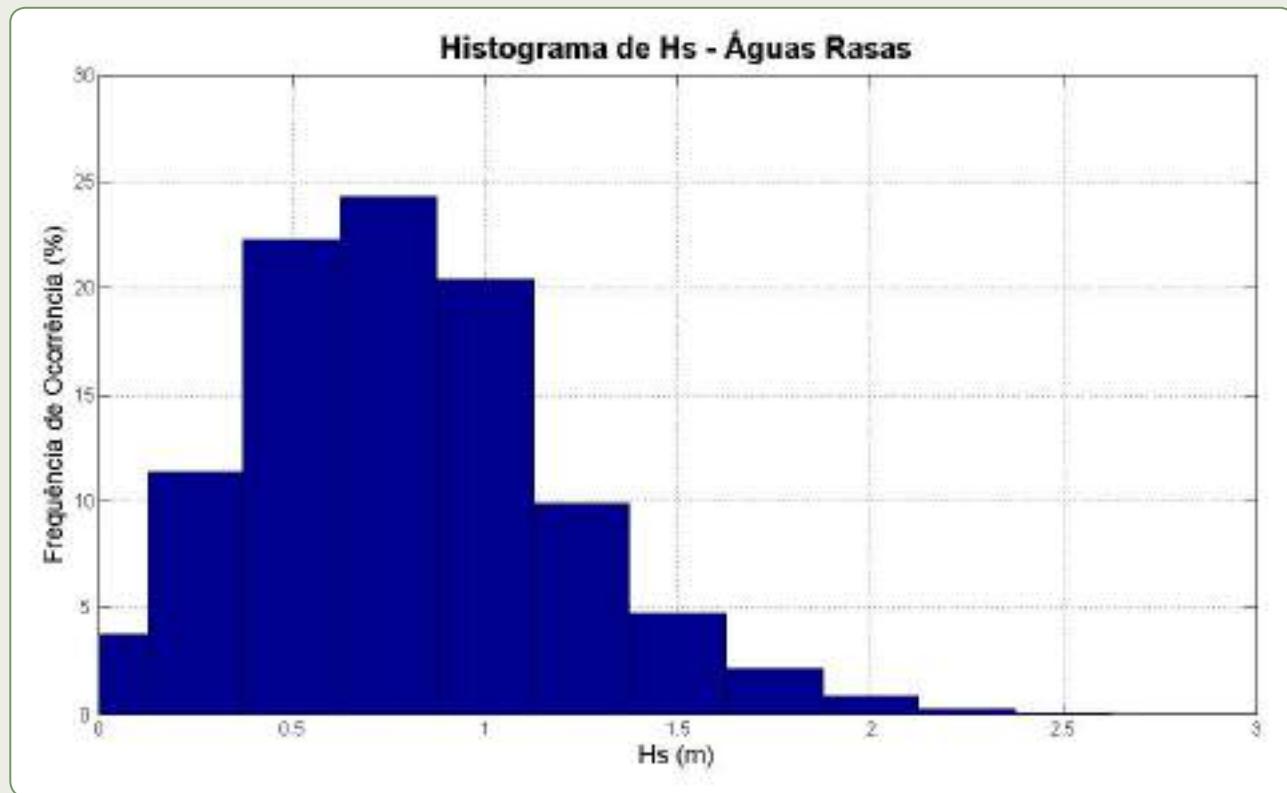
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ondas em águas rasas

Os dados da série temporal reconstruída a partir da metodologia do Hipercubo foram analisados estatisticamente, com o intuito de caracterizar o clima de ondas em águas rasas. Como resultados foram gerados o histograma de distribuição de H_s (Figura 16.11), a função de distribuição de H_s (Figura 16.12), a rosa de direções para H_s e T_p (Figura 16.13) e o diagrama de distribuição conjunta para H_s e T_p (Figura 16.14).

Na Figura 16.11 é apresentado o histograma de altura significativa de onda para os dados da série temporal em águas rasas. Os valores observados variam entre 0,01 e 2,93 m. A maior frequência observada foi para a classe de altura de 0,75 m, apresentando aproximadamente 24,5% de ocorrência. Classes de altura de 0,5 e 1,0 m também apresentaram altas frequências de ocorrência, com aproximadamente 23 e 20,5%, respectivamente.

Figura 16.11 – Histograma de altura significativa de onda (H_s) para os dados obtidos em águas rasas, a partir da metodologia do Hipercubo

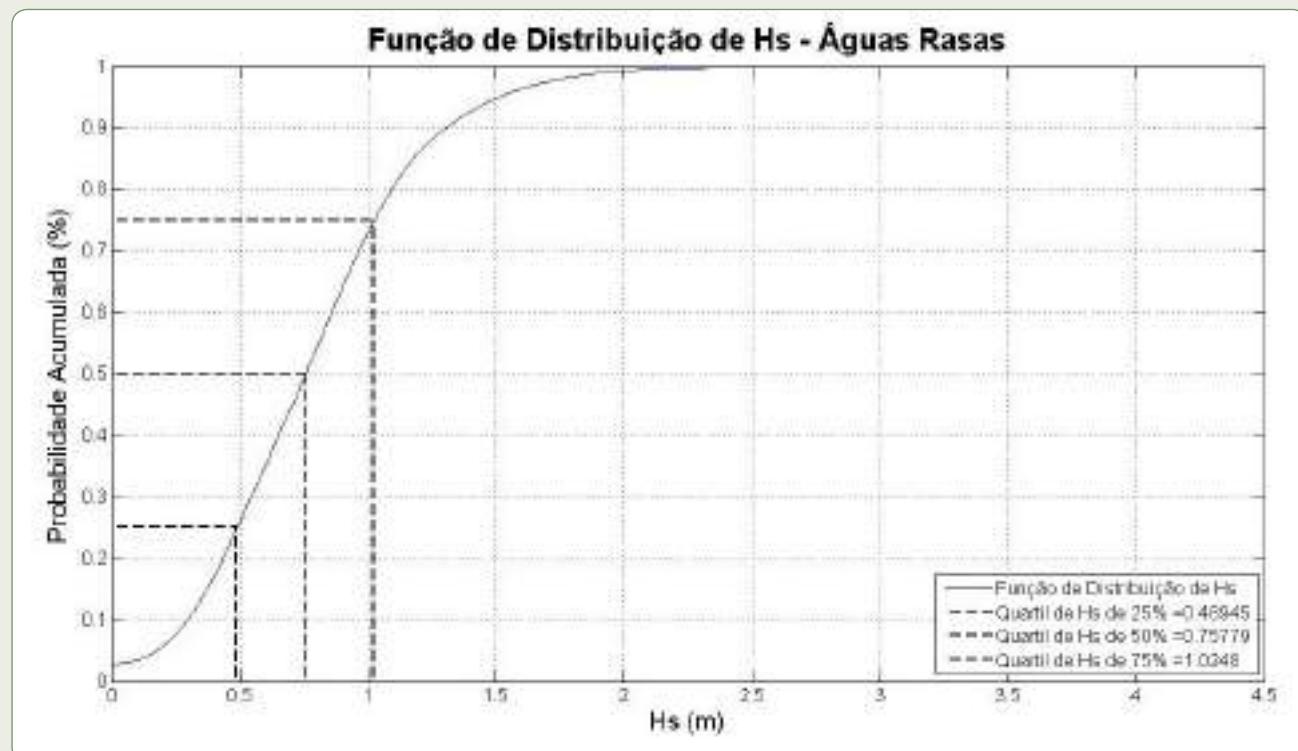


Fonte: Dos autores (2018).

A função de distribuição dos dados de altura significativa de onda para águas rasas é apresentada na Figura 16.12. Os resultados são apresentados em probabilidade acumulada (%) e demonstram que o quartil de 25% representa ondas com 0,48 m, o quartil de 50%, ondas de 0,75 m e o quartil de 75%, ondas de 1,02 m. Esses resultados indicam que, em 75% dos casos de ondas ocorridos ao longo dos 13

anos e oito meses de dados, existe a probabilidade de ocorrer ondas iguais ou maiores que 0,48 m, iguais ou menores que 1,02 m, e que em 50% dos casos existe a probabilidade de as ondas serem menores ou maiores que 0,75 m.

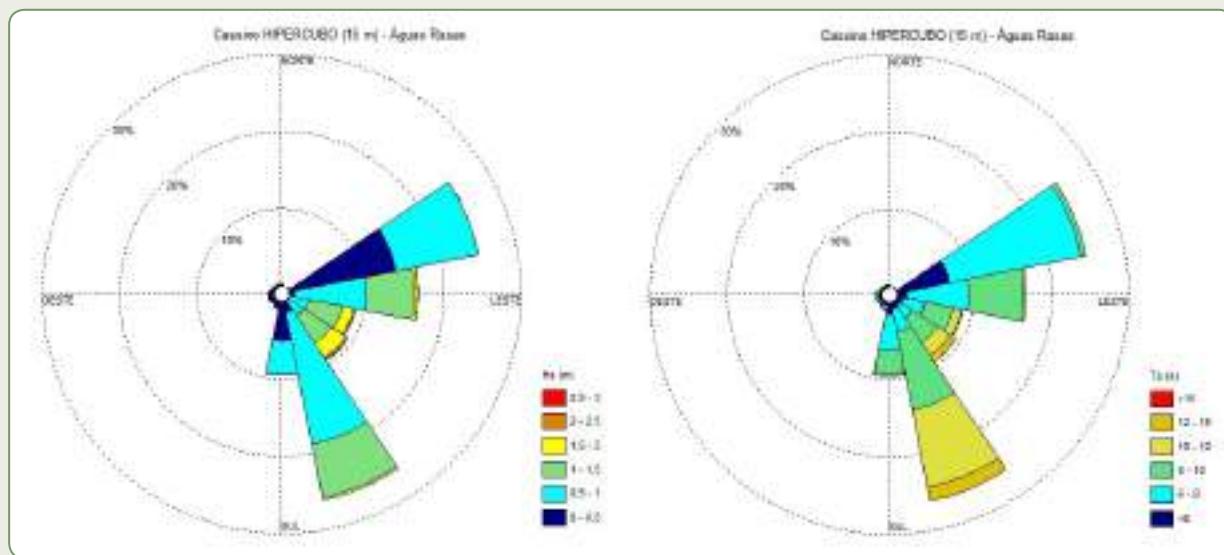
Figura 16.12 – Função de distribuição (probabilidade acumulada) de altura significativa (H_s) para os dados obtidos em águas rasas, a partir da metodologia do Hipercubo



Fonte: Dos autores (2018).

A rosa de altura significativa para as ondas em águas rasas (15 m) é apresentada na Figura 16.13. Três sistemas de ondas principais foram verificados no registro. O sistema mais energético e frequente é composto por ondas do quadrante sul-sudeste (SSE), com 26,19% de ocorrência. O segundo sistema é composto por ondas do quadrante leste-nordeste (ENE), com 25,01% de ocorrência, e o último sistema é composto pelas ondas provenientes do quadrante leste (E), apresentando 16,70% de ocorrência.

Figura 16.13 – Rosa direcional de valores de altura significativa (H_s) e período de pico (T_p)

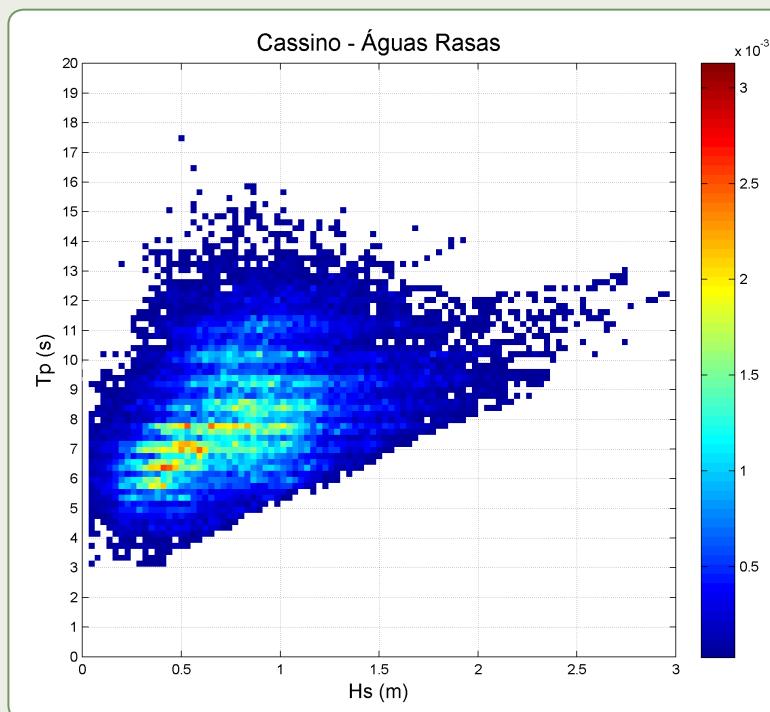


Fonte: Dos autores (2018).

Outros três subsistemas foram registrados na rosa de altura significativa (Figura 16.13), menos expressivos em relação aos sistemas principais. Os subsistemas registrados foram de S, com 9,47% de ocorrência, SE, com 9,38%, e de ESE, com 8,73% de ocorrência.

Na Figura 16.14 é apresentado o diagrama de distribuição conjunta H_s – T_p para os dados de águas rasas. Observa-se que a distribuição da altura significativa de ondas ocorreu entre 0 e 2,93 m e que o período variou entre 2,99 e 17,28 segundos. A concentração de casos H_s – T_p observada para águas rasas foi verificada entre 0,30 e 1,15 m e 5,5 e 10 segundos, respectivamente.

Figura 16.14 – Diagrama de distribuição conjunta de H_s e T_p para os dados obtidos em águas rasas



Legenda: A escala de cores corresponde à frequência de ocorrência

Fonte: Dos autores (2018).

Observando as figuras e quadros apresentados, é possível concluir que as ondas em águas rasas são predominantemente provenientes de direções entre ENE e S (95,49% dos registros), com alturas de onda variando principalmente entre 0,25 e 2,00 m (99,26% dos registros) e períodos de 4 a 14 s (99,43% dos registros). Contudo, é observada a ocorrência, na série temporal de dados, de ondas de até 2,93 m.

Os resultados obtidos para águas rasas através da aplicação da metodologia de reconstrução do clima de ondas foram comparados com os resultados obtidos por Motta (1969), Coli (2000), Strauch (1996, 1997, 1998 e 2001), Fontoura (2004), Cuchiara et al. (2007) e Strauch et al. (2009). Os autores citados registraram ondas com altura significativa média de 1 metro se propagando com uma direção média de 110° (ESE), e ondas com altura significativa média de 1,50 m se propagando com uma direção média de 160° (SSE). A partir da comparação, foi verificado que os trabalhos científicos corroboram os resultados encontrados.

A determinação das ondas que excedem a probabilidade de 50% de ocorrência no registro ($H_{S50\%}$), 90% de ocorrência ($H_{S90\%}$), 99% de ocorrência ($H_{S99\%}$) e também a das ondas que excedem a probabilidade de 12 horas por ano (H_{12}) em águas profundas é apresentada no Quadro 16.2.

Quadro 16.2 – Probabilidades direcionais e dados estatísticos de H_s para cada direção obtida em águas rasas, a partir da metodologia do Hipercubo

Direções	Probabilidade (%)	$H_{S50\%}$	$H_{S90\%}$	$H_{S99\%}$	H_{S12}
N	0,0026	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NNE	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NE	0,0006	0,1905	0,2323	0,2611	0,2611
ENE	0,2501	0,4689	0,7463	0,8873	0,9755
E	0,1670	0,9461	1,2959	1,7239	2,0242
ESE	0,0873	1,1362	1,7165	2,1797	2,4881
SE	0,0938	1,2554	1,7891	2,4195	2,7404
SSE	0,2619	0,8551	1,1985	1,5209	1,7851
S	0,0947	0,4867	0,6862	0,8032	0,8717
SSO	0,0099	0,1727	0,2520	0,3146	0,3529
SO	0,0060	0,0836	0,1160	0,1350	0,1536
OSO	0,0079	0,0000	0,0277	0,0440	0,0460
O	0,0074	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
ONO	0,0042	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NO	0,0032	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NNO	0,0034	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

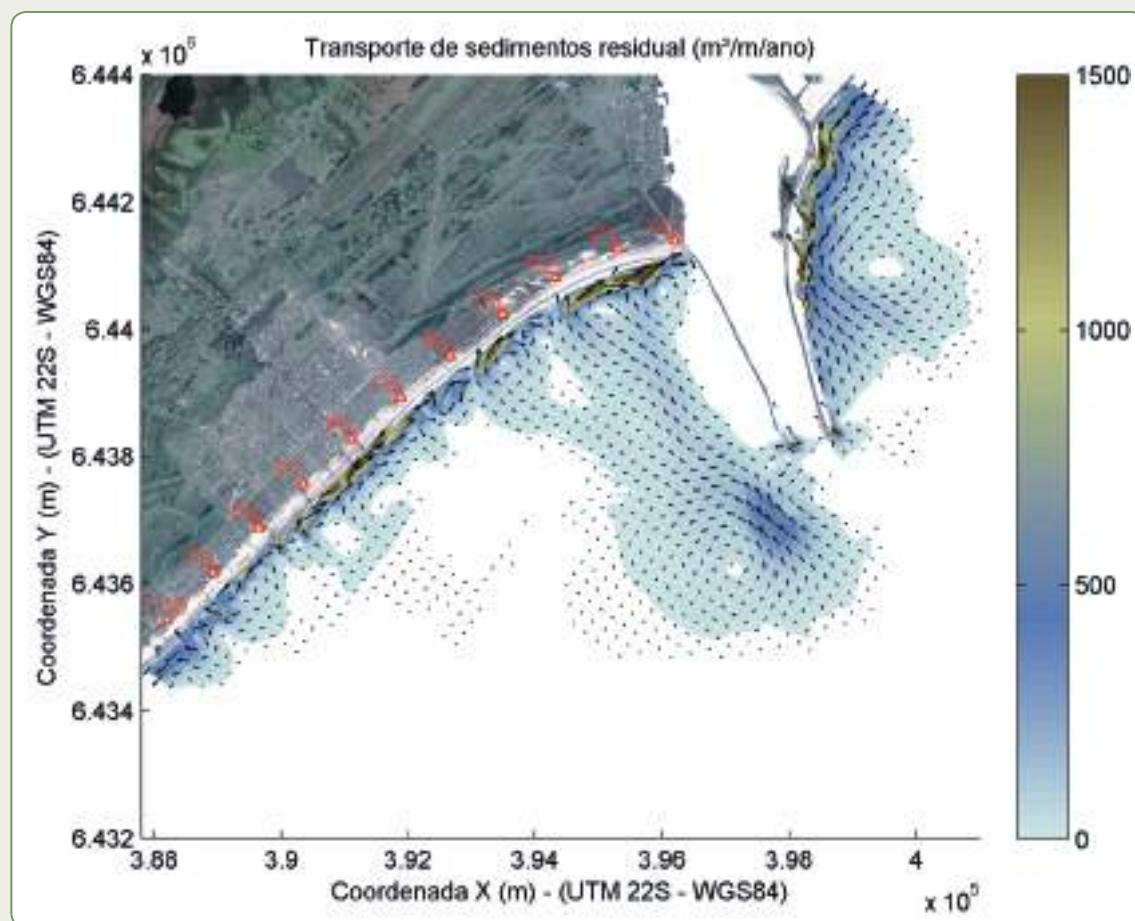
Fonte: Dos autores (2018).

Potencial de transporte resultante

Os resultados do transporte de sedimentos são apresentados de duas formas. A primeira é o mapa de transporte de sedimentos, expresso em $\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$, que representa as taxas de transporte calculadas para o período de ocorrência de cada caso, distribuído ao longo de todo o domínio computacional. A segunda é a curva de transporte residual de sedimentos, expressa em m^3/ano , que representa as taxas resultantes do transporte longitudinal de sedimentos ao longo da Praia do Cassino, calculada para o período de ocorrência de cada caso.

Na Figura 16.15 é apresentado o transporte residual de sedimentos em $\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$ ao longo do domínio computacional modelado, referente ao período de ocorrência dos 12 casos simulados, ou seja, aproximadamente 230 dias do ano (95% da energia total da série temporal de ondas em águas profundas).

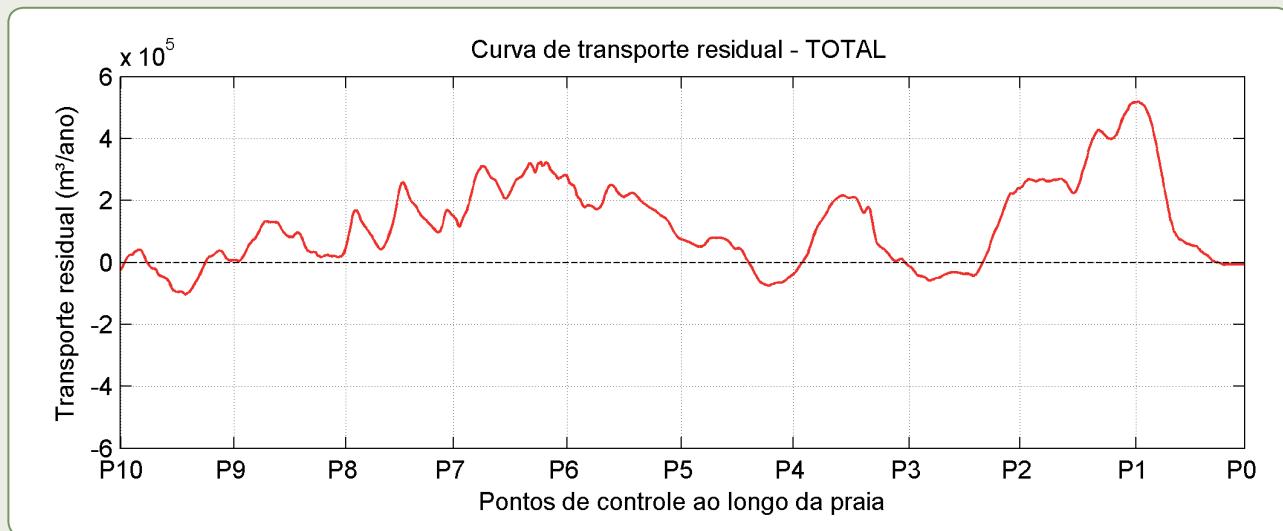
Figura 16.15 – Mapa de transporte residual de sedimentos ($\text{m}^3/\text{m}/\text{ano}$) ao longo do domínio computacional, relacionado ao período de ocorrência dos 12 casos modelados (Datum WGS – 84. Zona 22 S (UTM))



Fonte: Adaptação sobre imagem do Google Earth® (2007).

Na Figura 16.16 é apresentado o transporte longitudinal residual de sedimentos em m^3/ano ao longo da Praia do Cassino, que foi calculado até a profundidade de fechamento (5,88 m). As taxas de transporte calculadas representam o período de ocorrência dos 12 casos simulados, ou seja, aproximadamente 230 dias do ano (95% da energia total da série temporal de ondas em águas profundas).

Figura 16.16 – Curva de transporte residual ao longo da Praia do Cassino



Legenda: Valores positivos representam transporte para nordeste, valores negativos para sudoeste

Fonte: Dos autores (2018).

A partir dos resultados obtidos nas Figuras 16.15 e 16.16, verifica-se que as maiores taxas de transporte modeladas ocorrem em três setores da Praia do Cassino. Primeiramente, entre os pontos de controle P0 e P2, localizados na parte sul da praia próximo aos molhes da Barra de Rio Grande, onde as taxas oscilaram entre 1.300 e 1.500 $m^3/m/ano$. O segundo setor é compreendido entre o P3 e o P4, localizado entre três e quatro quilômetros da base do Molhe Oeste, apresentando taxas entre 750 e 1.150 $m^3/m/ano$. E o último setor está localizado entre os pontos de controle P5 e P8, bem em frente à parte urbanizada da praia, na qual as taxas variam entre 1.110 e 1.250 $m^3/m/ano$. As taxas de transporte máximas observadas nos três setores representam transporte para nordeste.

O transporte longitudinal de sedimentos resultante é para nordeste, onde apresentou taxa máxima de 518.696 m^3/ano na frente do ponto de controle P1, aproximadamente a um quilômetro da base do Molhe Oeste (Quadro 16.3). Contudo, o transporte longitudinal resultante de sedimentos para sudoeste é observado em três setores da praia, entre o P2 e P3, P4 e P5, e P9 e P10, onde a taxa máxima encontrada é de 103.147 m^3/ano (Quadro 16.3).

Analizando as variações temporais da taxa de transporte longitudinal resultante na Praia do Cassino, calculadas a partir de modelagem numérica com o modelo SMC, chega-se à conclusão de que 124.159 m^3 de sedimentos são transportados para nordeste ao longo da praia, durante o período de um ano (Quadro 16.3).

Os valores apresentados no Quadro 16.3 foram calculados com base nos dados obtidos na simulação de cada caso de onda, ponderados pela frequência do respectivo caso, sendo representativos para todo transporte longitudinal de sedimentos.

Quadro 16.3 – Valores mínimos, máximos e médios, expressos em m³/ano, obtidos para o transporte longitudinal de sedimentos na Praia do Cassino

Caso	Transporte mínimo (m ³ /ano)	Transporte máximo (m ³ /ano)	Transporte médio (m ³ /ano)	Freq. Oc. (dias/anos)
Caso 01	- 624,40	- 30.921,28	- 5.325,88	45,6250
Caso 02	- 446,40	- 54.825,28	- 12.457,43	22,3015
Caso 03	1.219,01	- 81.166,80	- 25.292,78	11,0595
Caso 04	7.764,49	- 49.738,20	- 12.035,17	23,6885
Caso 05	13.888,93	- 76.281,07	- 27.104,47	10,1470
Caso 06	12.965,97	- 92.405,09	- 41.545,92	5,1100
Caso 07	- 14.558,04	109.220,67	44.281,60	20,9510
Caso 08	- 51.272,58	102.262,58	36.920,16	10,0740
Caso 09	- 62.950,97	67.586,39	15.884,17	5,4020
Caso 10	- 1.769,46	136.467,00	45.078,25	40,2960
Caso 11	- 1.048,11	121.458,28	51.334,04	22,0095
Caso 12	- 15.042,32	106.988,13	54.422,43	12,5560
Resultante	- 103.146,99	518.695,87	124.158,99	229,2200

Legenda: Valores negativos representam transporte para sudoeste e valores positivos para nordeste

Fonte: Dos autores (2018).

Relacionando as taxas de transporte calculadas com seus respectivos períodos de ocorrência, fica claro que o Caso 01 ($H_s = 0,7523$ m, $T_p = 7,3672$ s e $\text{Dir} = 84,2904^\circ$) possui a maior frequência de ocorrência (45,625 dias/ano), contudo, representa as menores taxas de transporte calculadas, atingindo 5.326 m³/ano de sedimentos transportados para sudoeste. O Caso 06 ($H_s = 1,94$ m, $T_p = 9,6323$ e $\text{Dir} = 119,693^\circ$), com o menor período de ocorrência, o qual é de 5,11 dias/ano, transporta 41.546 m³/ano para sudoeste. Assim, fica claro que por mais que o período de ocorrência de cada caso influencie diretamente as taxas de transporte na praia, a altura de onda propagada, o período da onda e a direção de incidência demonstram ser os fatores que controlam a magnitude das taxas de transporte na Praia do Cassino.

Vale ressaltar que a componente longitudinal do vento influencia diretamente as taxas de transporte de sedimentos na Praia do Cassino (FONTOURA, 2004), contudo esta não está sendo contemplada pela modelagem (limitação do modelo).

O Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH), em 1998 simulou os padrões de transporte de sedimentos para a região dos Molhes da Barra de Rio Grande. Os resultados mostram que o transporte sobre o banco das Três Marias, banco arenoso em formato de domo localizado adjacente ao Molhe Oeste (GOULART; CALLIARI, 2011) atinge taxas de 200 m³/m/ano. Comparando o resultado da modelagem realizada pelo INPH (1998) com o resultado obtido neste trabalho para o Caso 06 (Quadro 16.3), para condições de ondas com altura significativa de 1,9413 metro, verifica-se que o transporte sobre o banco das Três Marias atinge taxas entre 150 e 275 m³/m/ano com direção à praia. Portanto, as taxas calculadas em ambos os trabalhos, com modelos numéricos distintos,

apresentam grandes semelhanças nos resultados. A diferença entre os valores encontrados pode ser em função da diferença na altura de onda propagada e consequentemente na intensidade das correntes geradas.

Os resultados obtidos por meio da modelagem do transporte de sedimentos com o SMC corroboram os resultados obtidos nos trabalhos de Motta (1969), Tomazelli e Villwock (1992), Lima, Almeida e Elirio (2001), Calliari, Tozzi e Klein (1998) e Fontoura (2004), comprovando a confiabilidade do modelo utilizado, bem como dos resultados apresentados.

Com base nos dados de transporte de sedimentos medidos na Praia do Cassino por Fontoura (2004), o qual através de armadilhas de sedimentos mediou o transporte em três perfis transversais à linha de praia, e comparando os resultados obtidos pelo autor com os modelados neste trabalho, verifica-se que o SMC subestima o transporte na zona de surfe. Tal conclusão se dá através das modelagens realizadas em Sprovieri et al. (2010), em que foi realizada a tentativa de validação do modelo através da reprodução das condições ambientais medidas por Fontoura (2004), durante as campanhas de medição das taxas de transporte conduzidas na Praia do Cassino.

Ressalta-se, que por mais que os valores encontrados na validação do modelo tenham se apresentado distintos dos medidos, o modelo responde de forma eficaz para o local estudado. Isso porque existem diversos fenômenos que ocorrem na natureza que não estão acoplados no estudo, devido às limitações do modelo, principalmente em relação ao tipo de transporte predominante na praia, onde 82% do transporte medido ocorre por suspensão e apenas 18% por arraste de fundo (FONTOURA, 2004).

Como o SMC é um modelo de profundidade integrada, o efeito da estratificação do escoamento no modelo é desprezado. Isso leva a uma subestimação nas velocidades do escoamento próximo à superfície da água, consequentemente subestimando as taxas de transporte por suspensão e superestimando as taxas de sedimentação. Vale lembrar que o SMC não permite discretizar o tipo de substrato ao longo do domínio computacional, o que inviabiliza a inserção de áreas com diferentes tamanhos de grão ao longo da praia. Essa limitação impossibilita a representação dos bancos de lama fluida presentes na antepraia da Praia do Cassino, os quais amortecem a energia das ondas incidentes, bem como modificam a rugosidade efetiva do substrato (CUCHIARA et al., 2007), interferindo na dinâmica dos sedimentos arenosos do fundo, consequentemente diminuindo as taxas de transporte na praia.

CONCLUSÕES

Apesar de todas as suposições e limitações adotadas nos métodos, tanto na parte do uso de dados de reanálise do modelo WAVEWATCH III para seleção dos casos, bem como no uso de modelação numérica de processos costeiros para avaliação de taxas de transporte de sedimentos ao longo da Praia do Cassino, as conclusões do trabalho são apresentadas.

A aplicação da metodologia do Hipercubo, baseada no uso de modelos numéricos e técnicas de interpolação dos coeficientes de propagação das ondas, demonstrou ser uma maneira altamente eficaz de suprir a baixa quantidade de dados de ondas medidos em águas rasas. A partir dessa metodologia foi possível reconstruir uma série temporal de dados de ondas para águas rasas com 13 anos e oito meses, possibilitando assim caracterizar o clima de ondas no local e quantificar as taxas de transporte na Praia do Cassino.

O método empregado para reduzir os dados de ondas da série temporal de águas rasas foi capaz de reduzir o clima de ondas para Rio Grande sem alterar os padrões de transporte de sedimentos resultantes. A redução dos casos de ondas representativos associados a uma frequência exata, relacionada a cada caso, demonstrou ser eficiente, sugerindo que os padrões de transporte observados mantiveram-se condizentes com trabalhos anteriores realizados no local.

A modelagem dos 12 casos de ondas na Praia do Cassino sugere que o banco Três Marias, localizado a SO do Molhe Oeste da Barra de Rio Grande, é responsável pela convergência da energia de onda incidente na praia, sendo uma fonte condicionante.

O potencial do transporte longitudinal resultante na Praia do Cassino é para nordeste, com taxa média de 124.159 m³/ano. A maior taxa de transporte ocorre próximo ao Molhe Oeste, onde 518.696 m³/ano de sedimentos são transportados para nordeste. Embora o potencial do transporte resultante ao longo da praia seja para nordeste, existe um potencial do transporte resultante para sudoeste em três setores da praia, onde a taxa de transporte máxima é de 103.147 m³/ano.

REFERÊNCIAS

CALLIARI, L. J.; TOZZI, H. A. M.; KLEIN, A. H. F. Beach morphology and coastline erosion associated with storm surges in Southern Brazil – Rio Grande to Chuí. In: Land and Ocean Interactions in the Coastal Zone (LOICZ) Meeting, 1998. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 70, n. 2, p. 231-247, 1998.

CAMUS, P., MENDEZ, F. J., MEDINA, R., COFIÑO, A. S. Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*. DOI 10.1016/j.coastaleng.2011.02.003. 2010.

COLI, A. B. *Estudo sobre o clima de onda em Rio Grande, RS*. 2000. 80 p. Dissertação (Mestrado em Oceanologia) – Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2000.

CUCHIARA, D.; FERNANDES, E. H.; STRAUCH, J. C.; WINTERWERP, J. C.; CALLIARI, L. J. Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, v. 29, n. 3, p. 545-555. mar. 2009

DOBROCHINSKI, J. P. *Redução e esquematização de climas de ondas para modelagem morfológica*. 2009. 108 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) – Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí. 2009.

ELFRINK, B. *Longshore transport in the swash zone*. Copenhagen: Notex, 1996. 153 p. ISBN 0107-1092.

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*. Porto Alegre. 2004. 281 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Departamento de Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

FREDSØE, J.; DEIGAARD, R. *Mechanics of coastal sediment transport: advanced series on ocean engineering*. Singapura: World Scientific. 1992. 369 p. v. 3. ISBN 9810208405

GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). *Coastal Modelling System (SMC)*: Reference and User Manual. State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 82 (in Spanish), 2003a.

GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). *2DH-Morphodynamic Evolution Model for Near Shore Areas (MOPLA)*. State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 262 (in Spanish), 2003b.

GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS (GIOC). **Spectral Wave Propagation Model (OLUCA-SP)**. State Coastal Office-Spanish Environmental Ministry and University of Cantabria, 170 (in Spanish), 2003c.

GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R.; GONZÁLEZ-ONDINAS, J.; OSÓRIO, A.; MÉNDEZ, F.; GARCÍA, E. An integrated coastal modeling system for analyzing beach processes and beach restoration projects, SMC. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 7, p. 916-931, 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS HIDROVIÁRIAS (INPH). **Estudos hidráulico-sedimentológicos em modelagem matemática para melhoria das condições de navegabilidade e aprofundamento do canal de acesso do Porto de Rio Grande – RS**. 1998.

LIMA, S. F.; ALMEIDA, L. E.; ELIRIO JÚNIOR, T. Estimativa da capacidade do transporte longitudinal de sedimentos a partir de dados de ondas para a costa do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre: UFRGS, p. 99-107, 2001.

MOTTA, Victor Freire. **Relatório-diagnóstico sobre a melhoria e o aprofundamento do acesso pela barra de Rio Grande**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS. 1969. p. 114.

RIS, R. C.; BOOIJ, N.; HOLTHUIJSEN, L. H. A Third-generation wave model for coastal regions, Part II, Verification. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, C4, p. 7649-7666, 1999.

SPROVIERI, F. C.; FONTOURA, J. S.; CALLIARI, L. J.; BARLETTA, R. C. Modelagem numérica do transporte de areia na Praia do Cassino – RS, Brasil. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 4., **Anais...** Rio Grande. 2010. p. 20.

SPROVIERI, F.; FONTOURA, J. A. S. Modelagem numérica do potencial hidrodinâmico e do transporte de sedimentos na Praia do Cassino e no entorno dos Molhes da Barra de Rio Grande (RS), utilizando o modelo SMC. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 187-195, 2012.

STRAUCH, J. C. Caracterização do estado de mar em Rio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., **Anais...** Aracaju, SE, 2001.

STRAUCH, J. C. Estudo do clima ondulatório em Rio Grande. In: CONGRESSO REGIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLOGIA EM ENGENHARIA, 7., **Anais...** Curitiba, Paraná. 1996. p. 51.

STRAUCH, J. C. Monitoramento de ondas em Rio Grande. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., **Anais...** Vitória, ES, v. 4, 1997, p. 385-391.

STRAUCH, J. C. Um Ano de Monitoramento de Ondas em Rio Grande. In: SEMANA NACIONAL DE OCEANOGRAFIA, FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE – FURG, 11. Oceanografia e suas interfaces, **Anais...** 1998.

STRAUCH, J. C.; CUCHIARA, D. C.; TOLDO JÚNIOR, E. E.; ALMEIDA, L. E. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 4. p. 29-37, 2009.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. Considerações sobre o ambiente praial e a deriva litorânea de sedimentos ao longo do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre: UFRGS, v. 19, n. 1, p. 3-12 , 1992.

WL-DELFT HYDRAULICS. **Modification first-guess SWAN and bench mark tests for SWAN**: Report nº H3515. Delft, 1999.

WL-DELFT HYDRAULICS. **Physical formulation SWAN and data for validation**: Report nº H3528. Delft, 2000.

SOBRE OS AUTORES

Ada Cristina Scudelari

É graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (1987), mestre em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1991) e doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1997). Tem pós-doutorado no LNEC-PT (2005-2006) e COPPE/UFRJ (2011-2012). Foi vice-coordenadora do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1999-2000) e coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária (2003-2006) da mesma universidade. Atualmente é professora titular da UFRN. Coordenou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRN de 2013 a 2017. Tem experiência na área de Engenharia Civil, com ênfase em modelagem hidrodinâmica ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: erosão costeira, caracterização e diagnóstico ambiental e métodos numéricos. *E-mail:* adaufrn@hotmail.com.

Alex Costa da Silva

É graduado em Geologia pela Universidade Federal do Pará (2000), doutor em Oceanografia pela Universidade Federal de Pernambuco (2006), com doutorado-sanduíche no Centre IRD de Bretagne – Campus IFREMER, França (2003-2004). Atualmente é professor associado I da UFPE. *Editor-in-Chief* da revista *Tropical Oceanography* e coordenador da Embarcação Ciências do Mar IV/UFPE. Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em oceanografia física, atuando principalmente nos seguintes temas: hidrodinâmica da plataforma continental, processos termohalinos, interação oceano-atmosfera, Atlântico tropical, oceanografia física estuarina e costeira. *E-mail:* alexsilvaufpe@gmail.com.

Ana Maria Teixeira Marcelino

É arquiteta e urbanista, mestre em Ciências Sociais pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte na área de Desenvolvimento Regional. Especialista em Planejamento e Gestão Ambiental. Atualmente é assessora técnica do Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA), atuando nas questões relacionadas com a zona costeira e a orla marítima. Coordenou o Programa Estadual de Gerenciamento Costeiro, de 1996 a 2002 e de 2009 a 2011. Coordenou, no Rio Grande do Norte, o Acordo de Cooperação Técnica executado pelo IDEMA, UFRN e MMA, no projeto Estudo de Caso do Sistema de Modelagem Costeira Brasileiro, uma das atividades previstas no projeto Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira, uma cooperação entre o Brasil e a Espanha. Representa os estados do Nordeste no Grupo de Integração Nacional do Gerenciamento Costeiro. *E-mail:* anamarcelino.idema@gmail.com.

Ana Paula Sueli Nicolau

É graduada em Engenharia Civil (2011) pela Universidade Federal de Santa Catarina e MBA em Gerenciamento de Projetos (2017) pela Fundação Getúlio Vargas, São Paulo. Possui experiência na área de gerenciamento de contratos de fiscalização de obras de infraestrutura ferroviária, rodoviária e edificações, e de contratos de *Engineering, Procurement and Construction* (EPC) de obras de Pequenas Usinas Hidrelétricas (PCH) e Usinas Elétricas (UHE). *E-mail:* ana.nicolau@engevix.com.br.

Anderson Atkinson da Cunha

Tem formação em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina, possui MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas e mestrado em Engenharia Ambiental pela UFSC com *expertise* em tratamento e beneficiamento de águas. Atualmente é analista técnico em gestão ambiental no Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA, extinta FATMA). *E-mail:* andersoncunha@ima.sc.gov.br.

Anderson Targino da Silva Ferreira

É técnico em Geologia e Mineração pelo Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte (2006), graduado em Geografia (2007), mestre (2009) e doutor (2013) em Geodinâmica e Geofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência e foco na área de Geociências, atuando principalmente com geotecnologias aplicadas à análise, planejamento e monitoramento ambiental. Atualmente é professor no Programa de Mestrado em Análise Geoambiental (MAG) da Universidade Guarulhos (UNG). *E-mail:* andersontsferreira@gmail.com.

Andrea Olinto

É arquiteta e urbanista, atuando desde 2009 na Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade de Pernambuco (SEMAS) como coordenadora do gerenciamento costeiro, em articulação intergovernamental com o Ministério do Meio Ambiente, municípios e com a sociedade. *E-mail:* andreaolinto@gmail.com.

Antonio Espejo

É membro do grupo de Clima Marinho e Mudança Climática do IH-Cantabria. Com formação em Engenharia Ambiental e doutorado em Ciências Marinhas, suas pesquisas focam o estudo da variabilidade climática de uma ampla variedade de processos meteoceanográficos, como, por exemplo, o El Niño ou a Oscilação do Atlântico Norte. Tem uma sólida experiência em modelagem de ventos, ondas e maré meteorológica e inundações costeiras produzidas principalmente por ciclones tropicais, incluindo análises estatísticas das variáveis geofísicas envolvidas. Publicou mais de dez artigos em revistas científicas internacionais e inúmeros trabalhos em anais de congressos. *E-mail:* antonio.espejo@unican.es.

Antonio Henrique da Fontoura Klein

Doutor em Ciências do Mar (Geologia Marinha) pela Universidade do Algarve, Portugal, em 2004. Atualmente é Professor Associado I (Oceanografia Geológica) da Coordenadoria Especial de Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina. É coordenador do curso de mestrado em Oceanografia da UFSC, professor permanente do programa de Pós-Graduação em Geografia da UFSC, membro da Associação Brasileira de Oceanografia e da Associação Brasileira de Geofísica. Atua na área de Oceanografia Geológica, com ênfase em evolução e morfodinâmica costeira (EMC), geoacústica e geofísica de rasa e ultrarrasa e análise de riscos costeiros e oceânicos. *E-mail:* antonio.klein@ufsc.br.

Bianca Alves Dias Martins Parizotto

É graduada em Oceanologia pela Fundação Universidade do Rio Grande (2002), mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (2004) e doutora na linha de pesquisa em Oceanografia Costeira e Geologia Marinha no Programa de Pós-Graduação em Geografia desta mesma instituição. Trabalha como oceanóloga, atualmente, na equipe de Educação Ambiental da Diretoria de Biodiversidade e Florestas no Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA, extinta FATMA). *E-mail:* biancamartins@ima.sc.gov.br.

Carlos Eduardo Junqueira de Azevedo Tibiriçá

É graduado em Oceanografia pela Universidade do Vale do Itajaí (2010) e mestre em Botânica pela Universidade Federal do Paraná (2013). Atualmente é analista técnico em gestão ambiental do Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA, extinta FATMA) e está cursando doutorado em Sistemas

Costeiros e Oceânicos (UFPR). Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em oceanografia biológica, atuando principalmente nos seguintes temas: microalgas nocivas, fitoplâncton, ecologia costeira e estuarina. *E-mail:* carloseduardo@ima.sc.gov.br.

Charline Dalinghaus

É oceanógrafa, graduada pela Universidade do Vale do Itajaí (2012) e mestre em Geografia na linha de pesquisa de Oceanografia Costeira e Geologia Marinha pela Universidade Federal de Santa Catarina (2016). Atou no Projeto Transferências de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira (Projeto SMC-Brasil) e atualmente atua como oceanógrafa na área de Modelagem Costeira no projeto Capacitação de Gestores e Pesquisadores Públicos Atuantes na Gestão Costeira Brasileira, utilizando a ferramenta SMC-Brasil. *E-mail:* oc.charline@gmail.com.

Daniele Gentile Cardoso

É oceanógrafa, mestre em Oceanografia Geológica pela Universidade de São Paulo e especialista em Gestão Ambiental pela Universidade Estácio de Sá. *E-mail:* daniele.gcardoso@yahoo.com.

David Jefferson Cardoso Araújo

É bacharel em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, engenheiro ambiental pela mesma instituição, na qual também obteve o grau de mestre em Engenharia Sanitária, com tópico de pesquisa voltado para modelagem e gestão costeira. Atualmente é doutorando em Gestão e Tratamento de Resíduos pela Universidade do Minho, Portugal. *E-mail:* david_bct@hotmail.com.

Davis Pereira de Paula

É doutor em Ciências do Mar, da Terra e do Ambiente, ramo Ciências do Mar, especialidade em Gestão Costeira pela Universidade do Algarve, Portugal. Atualmente é professor da Universidade Estadual do Ceará, coordenador dos cursos de Geografia e professor permanente do Programa de Pós-Graduação em Geografia. Atua como pesquisador do Laboratório de Geologia e Geomorfologia Costeira e Oceânica da mesma instituição. *E-mail:* davispp@yahoo.com.br.

Eduardo Paes Barreto

É graduado em Geografia (2005), especialista em Gestão Ambiental pelas Faculdades Integradas do Recife (2006), em Oceanografia pela Universidade Federal de Pernambuco (2007), mestre em Engenharia Mineral pelo Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE (2010) e doutor em Geociências pela mesma universidade (2014). Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em geologia marinha e ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: erosão marinha, geologia e geomorfologia costeira, vulnerabilidade, geologia ambiental, quaternário, gestão ambiental costeira, gerenciamento costeiro, sedimentologia marinha. Atualmente é assessor pedagógico do Núcleo de Línguas e Culturas da UFPE. *E-mail:* edubarretoy@hotmail.com.

Fabio Pavan Piccoli

É bolsista de pós-doutorado da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e pesquisador do Laboratório de Simulação de Escoamentos com Superfície Livre (LABESUL), da Naviersat Meio Ambiente Ltda. e do Instituto Federal do Espírito Santo (Geoprocessamento-IFES). Atua na área de Hidráulica Marinha e Costeira e na aplicação e desenvolvimento de modelos numéricos para problemas de Engenharia Costeira. *E-mail:* fabio_p_p@hotmail.com.

Felipe Azevedo Bastos

É graduado em Engenharia Ambiental pelas Faculdades Integradas São Pedro (2008) e mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Espírito Santo (2011). Atualmente, exerce a função de Agente de Desenvolvimento Ambiental no Instituto Estadual de Meio Ambiente do Espírito Santo. Cogestor do Programa de Gestão Costeira do Estado do Espírito Santo. Integrante do GTECAD – Grupo técnico de enfrentamento da crise ambiental do Rio Doce. Tem experiência na área de ordenamento territorial, com ênfase em gerenciamento costeiro, atuando nos temas ecossistemas costeiros e planejamento ambiental. *E-mail:* fbastos@iema.es.gov.br.

Felipe Sprovieri

É oceanógrafo pela Universidade do Vale do Itajaí (2008), mestre em Engenharia Costeira e Oceânica pela Universidade Federal do Rio Grande (2011) e doutor em Geologia Marinha pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2018). *E-mail:* felipe.sprovieri@gmail.com.

Gabriel Gomes

É graduado em Engenharia de Pesca pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (2001) e em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal de Pernambuco (1991), mestre em Oceanografia na área de Erosão Costeira pela UFPE (2015). É engenheiro de pesca da Prefeitura de Ipojuca (PE), Secretaria de Meio Ambiente e Controle Urbano (SEDEMA). Desenvolvedor, programador de sistema, e sócio-proprietário do portal SurfGuru, voltado para a previsão oceanográfica e meteorológica para usuários do ambiente marinho. *E-mail:* grabgomes@gmail.com.

Igor Domingues Venancio

Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Oceanografia Física – Modelagem de Processos Morfodinâmicos Costeiros. *E-mail:* igoordv@hotmail.com.

Jacqueline Albino

É graduada em Geografia pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (1988), mestre em Geografia pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1993) e doutora em Geociências (Geologia Sedimentar) pela Universidade de São Paulo (1999). Atualmente é professora titular da Universidade Federal do Espírito Santo, onde atua no Programa de Pós-Graduação em Oceanografia e no Programa de Pós-Graduação em Geografia. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em geomorfologia costeira, atuando principalmente nos seguintes temas: morfodinâmica praial, morfodinâmica de falésias, vulnerabilidade costeira e sedimentologia. *E-mail:* jacqueline.albino@ufes.br.

João Luiz Nicolodi

É professor do Instituto de Oceanografia da Universidade Federal de Rio Grande (FURG). É bacharel em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1999), mestre em Geociências pela mesma universidade (2002) e pela Universidade Politécnica da Catalunya (2009) (Máster Internacional Gestão de Zonas Costeiras e Estuarinas). É doutor em Ciências, com ênfase em geologia marinha pelo Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO) da UFRGS (2007). É o atual coordenador do Programa de Pós-Graduação em Gerenciamento Costeiro (PPGC/FURG). *E-mail:* joaoluiznicolodi@gmail.com.

José Antonio Scotti Fontoura

É graduado em Engenharia Mecânica (1977), mestre em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio Grande (2000) e doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2004). Atualmente é professor associado da Universidade Federal do Rio Grande tendo experiência na área de Hidráulica Marítima, Processos Costeiros e Transporte de Sedimentos Costeiros e Estuarinos, atuando principalmente nos seguintes temas: dinâmica sedimentar costeira, morfodinâmica costeira, erosão e acreção praial, processos costeiros e estuarinos e dragagem. *E-mail:* scottifontoura@gmail.com.

Julio Tomás Aquije Chacaltana

É professor titular do Departamento de Engenharia Ambiental e pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Especialista em Dinâmica dos Fluidos. Atua ativamente na Dinâmica de Estuários, na Hidráulica Costeira e no entendimento da Física do Oceano. Desenvolve modelos numéricos para problemas dinâmicos específicos. Integra diversos modelos numéricos usando a técnica de *Downscaling*. *E-mail:* julio.chacaltana@ufes.br.

Laura Ribas de Almeida

É oceanógrafa, formada pela Universidade do Vale do Itajaí, com mestrado em Gestão Integrada de Zonas Costeiras e doutorado em Ciências e Tecnologia para a Gestão da Costa, ambos pela Universidade da Cantábria (Espanha). Em sua trajetória profissional realizou trabalhos na área de qualidade ambiental. Mais recentemente especializou-se na avaliação da dinâmica de zonas costeiras, principalmente praias e dunas frontais. *E-mail:* lauraribas.a@gmail.com.

Leandro Xavier Maia

É graduado em Oceanografia pela Universidade Federal do Espírito Santo (2018), sendo integrante do Laboratório de Oceanografia Geológica Costeira (LabOGeo), com ênfase em morfodinâmica de praias e sedimentologia marinha. *E-mail:* leandroxaviermaia@hotmail.com.

Lívian Rafaely de Santana Gomes

É bacharel em Geologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), mestre em Ciências Climáticas na área de Modelagem Atmosférica e Oceânica pela mesma instituição, bolsista de apoio técnico no Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte, com aplicação de ferramentas de geointeligência e modelagem numérica no subsídio à gestão territorial costeira no estado. É aluna de doutorado no programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (DDM/UFRN) da Rede PRODEMA. *E-mail:* livianrafaely@gmail.com.

Lucia Maria Mafra Valença

É graduada em Geologia pela Universidade Federal de Pernambuco (1970), mestre em Geociências pela mesma universidade (1987) e doutora em Géochimie de la Surface, na Université de Strasbourg I (1993). É professora titular da Universidade Federal de Pernambuco. Leciona no curso de Graduação em Geologia e no Programa de Pós-Graduação em Geociências. Tem experiência de pesquisa nas áreas de sedimentologia, petrografia de rochas siliciclásticas e ambientes costeiros. No momento desenvolve projeto relacionado à caracterização de minerais pesados para estudo de proveniência em sedimentos praiais e em rochas sedimentares. *E-mail:* lmmv@ufpe.br

Marcelo Soares Teles Santos

É graduado em Engenharia de Agrimensura (2003), pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), mestre em Geofísica (2005), pela Universidade de São Paulo (USP), e doutor em Ciência e Engenharia de Petróleo (2011), pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). É professor da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) na área de Topografia e Geoprocessamento e desenvolve pesquisas relacionadas às aplicações interdisciplinares do geoprocessamento à gestão territorial sustentável de zonas costeiras, urbanas e rurais. *E-mail:* marcelotsantos@gmail.com.

Marcos Aurélio Marques Noronha

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará (1991), mestre (1994) e doutor (1998) em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro e University of Stuttgart, Alemanha (1995-1996, programa-sanduíche), pós-doutorado pela Technical University of Graz, Áustria (2004), e pela University of California, Davis (2006). Atualmente é professor adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina. O seu principal trabalho de pesquisa hoje é voltado para novos desenvolvimentos tecnológicos de sondas de perfuração e de máquinas tuneladoras de alto desempenho. *E-mail:* marques.noronha@gmail.com.

Marcus Polette

É pesquisador e professor da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI), colaborador no United Nations Pool of Experts – Regular Process (World Ocean Assessment – WOA). É editor e fundador da *Revista de Gestão Costeira Integrada* para países de Língua Portuguesa. Desenvolve pesquisas na área de gestão costeira integrada e planejamento regional e urbano. É representante da academia no Grupo Interministerial para Gerenciamento Costeiro (GIGERCO). É professor da Universidad de la República, Uruguay, no curso de Manejo Costero Integrado. *E-mail:* mpolette@cttmar.univali.br.

Maria Carolina Hernandez Ribeiro

É oceanógrafa e mestre em Ciências (ênfase em Oceanografia Biológica), ambos pelo Instituto Oceanográfico da USP, doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade (EACH-USP). Trabalha no Laboratório de Ciências da Terra (LACITE) da Escola de Artes, Ciências e Humanidades da USP. *E-mail:* maria.carolina.ribeiro@usp.br.

Maria Eduarda Ferreira Mansur

É estudante de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. *E-mail:* mariaefmansur@gmail.com.

Mauricio González

É engenheiro civil com especial interesse na investigação de processos costeiros, morfodinâmica de praias, modelos numéricos de evolução costeira, avaliação de riscos costeiros e estudo de tsunâmis. É diretor do Grupo de Engenharia e Gestão da Costa do Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantábria (IH-Cantábria), sendo atualmente professor de Engenharia Hidráulica na Universidade da Cantábria. É engenheiro civil e mestre em Recursos Hídricos pela Universidade dos Andes (Bogotá, Colômbia), mestre em Engenharia Costeira e doutor em Engenharia de Estradas, Canais e Portos, pela Universidade da Cantábria. É pesquisador e diretor de um grande número de projetos de consultoria internacional em engenharia costeira, além de autor de vários livros e publicações científicas em revistas de impacto. *E-mail:* mauricio.gonzalez@unican.es.

Moyses Gonzalez Tessler

É graduado em Geologia (1975), mestre e doutor em Geociências (Geologia Sedimentar) pela Universidade de São Paulo (1982-1988). Atualmente é docente aposentado da USP. Tem experiência na área de Oceanografia, com ênfase em Oceanografia Geológica, atuando principalmente nos seguintes temas: litoral paulista, plataforma continental, sedimentação, São Paulo e taxa de sedimentação. *E-mail:* mgtessle@gmail.com.

Omar Quetzalcóatl Gutiérrez

É oceanólogo, mestre em Oceanografia Física e doutor em Engenharia Costeira pela Universidade da Cantábria. Atualmente é pesquisador do Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade da Cantábria, onde se especializou em modelagem numérica de inundações e processos costeiros e em sistemas de monitoramento costeiro por câmeras de vídeo. *E-mail:* omar.gutierrez@unican.es.

Pablo Medeiros Jabor

É graduado em Oceanografia pela Universidade do Vale do Itajaí (1997), pós-graduado em Análise, Projeto e Gerência de Sistemas pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2000), mestre em Engenharia de Computação com ênfase em geomática pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2004) e doutorando em Geografia pela Universidade Federal do Espírito Santo. Atualmente é coordenador de geoprocessamento do Instituto Jones dos Santos Neves e professor da Faculdade Estácio de Sá de Vitória e Vila Velha (ES). *E-mail:* pablo.jabor@ijsn.es.gov.br.

Patricia Fernanda Passos de Oliveira

É doutora em Geociências pela Universidade Federal de Pernambuco, mestre em Geociências e geógrafa pela mesma universidade com intercâmbio na Universidad Mayor do Chile no Departamento de Engenharia Florestal. É consultora ambiental na empresa Geomaps. *E-mail:* patriciapassosoliveira@gmail.com.

Paula Gomes da Silva

É oceanógrafa formada pela UNIVALI. Atualmente desenvolve sua tese no programa de doutorado no Instituto de Hidráulica Ambiental da Universidade da Cantábria (IH-Cantabria, Espanha). Desenvolve pesquisa nas áreas de Engenharia Costeira e Análise de Risco à Inundação em Praias. Trabalha com temas relacionados a medições e análise de dados e análise de processos de modificação da costa. *E-mail:* silvapgomes@gmail.com.

Pedro de Souza Pereira

É graduado em Oceanologia pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande (2002), mestre (2005) e doutor (2010) em Oceanografia Física, Química e Geológica também pela mesma instituição. Atuou como professor na Universidade Federal de Pernambuco (2010-2018) e atualmente é docente da Coordenadoria Especial de Oceanografia da Universidade Federal de Santa Catarina. *E-mail:* pedro.pereira@pq.cnpq.br.

Rafael Bonanata da Rocha

É bacharel em Oceanografia pela Universidade do Vale do Itajaí e mestre em Ciencias y Tecnologías para la Gestión de la Costa pela Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos da Universidad de Cantabria. Com 17 anos de experiência nas áreas de Oceanografia Física e Engenharia

Costeira e Portuária, fundou, em 2012, a OCP Engenharia Oceânica, Costeira & Portuária, sediada em Florianópolis. *E-mail:* rafael.bonanata@ocp.eng.br.

Rafael Sangoi Araujo

É graduado em Oceanografia (2005) e mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental (2008) pela Universidade do Vale do Itajaí. Atualmente é professor e pesquisador da Escola do Mar, Ciência e Tecnologia na Universidade do Vale do Itajaí e tem sua linha de pesquisa concentrada em processos costeiros e na plataforma interna, morfodinâmica, erosão e obras de engenharia costeira. *E-mail:* rsangoi@univali.br.

Rodolfo Jorge Vale de Araújo

É bacharel em Ciências Biológicas (2004), especialista (2005) e mestre (2008) em Oceanografia pela Universidade Federal de Pernambuco. Atualmente, é doutorando no programa de Pós-Graduação em Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco e graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária no Centro Universitário Maurício de Nassau. *E-mail:* rodolfo.araujo@semas.pe.gov.br.

Rodrigo Barletta

É oceanólogo (1997), mestre em Oceanografia Física, Química e Geológica (2001) pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande e doutor em Engenharia Ambiental (2006) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Tem 20 anos de experiência nas áreas de Oceanografia, Engenharia Costeira, Portuária e Oceânica. Foi pesquisador, professor, autônomo e, nos últimos 10 anos, oceanógrafo, gerente de projetos e de negócios em empresas multinacionais. Atualmente é sócio da Aster Engenharia. *E-mail:* barletta@astergeo.com.br.

Rodrigo Camacho

É sócio-fundador da empresa Ecolibra Engenharia Projetos e Sustentabilidade, onde se desenvolvem estudos ambientais e planos, projetos e programas setoriais e de planejamento urbano. Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental pela Universidade do Vale do Itajaí, desenvolveu sua dissertação em certificação de cidades costeiras. Graduado em Engenharia Ambiental, desenvolveu seu trabalho de conclusão de curso em certificação de praias. *E-mail:* camacho@ecolibra.com.br.

Rômulo Cruz Monteiro

Oceanógrafo formado pela Universidade do Vale do Itajaí (2010), dedicou-se à Oceanografia Geológica, participando de estudos envolvendo morfodinâmica de praias, propagação de ondas, transporte de sedimentos e evolução morfológica. Trabalhou como oceanógrafo voluntário nos estudos emergenciais de contenção de petróleo, resultado do acidente com a plataforma de exploração em águas profundas da British Petroleum, no Golfo do México, em 2010. Participou do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e atuou como Oceanógrafo/Consultor Ambiental na empresa Ecolibra. *E-mail:* rcruzmonteiro@gmail.com.

Stephanie Thiesen

É graduada (2011) e mestre em Engenharia Civil (2016) pela Universidade Federal de Santa Catarina e bacharel em Administração Empresarial pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2012). Desde 2017 é doutoranda em Engenharia Civil na área de Hidrologia em *Karlsruher Institut für Technologie*. Sócia-fundadora da RainMap: o mapa de aproveitamento da chuva. Tem experiência

profissional em cálculo estrutural e projetos governamentais de logística portuária e rodoviária. *E-mail:* stephanie.thiesen@kit.edu.

Tiago Castro Alves Oliveira

É graduado em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra (2003), mestre em Ciências do Mar (2007) em Engenharia e Gestão Portuária (2009) e doutor em Ciências do Mar (2012) pela Universitat Politècnica de Catalunya – Barcelona Tech. Entre 2013 e 2015 foi pós-doutorando da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Atualmente é pesquisador do Tropical Marine Science Institute (TMSI) da National University of Singapore (NUS). Com experiência na área de Engenharia Marítima, Costeira e Portuária, atua principalmente nos seguintes temas: acústica submarina, hidrodinâmica costeira e morfodinâmica de praias. *E-mail:* tiago.c.oliveira@ufes.br.

Valdir do Amaral Vaz Manso

É graduado em Geologia pela Universidade Federal de Pernambuco (1973), especialista em Geofísica Marinha pelo Laboratório de Geologia Marinha (1986) e em Geologia do Pré-Cambriano pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1977), mestre em Geociências pela Universidade Federal de Pernambuco (1984) e doutor em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1997). Atualmente é professor adjunto IV da Universidade Federal de Pernambuco e coordenador da Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Tem experiência na área de Geociências, com ênfase em Geofísica. Atua principalmente nos seguintes temas: geofísica, sedimentologia, textura, batimetria, hidrodinâmica. *E-mail:* vazmanso@uol.com.br.

Venerando Eustáquio Amaro

É bacharel em Geologia pela Universidade Federal de Mato Grosso, mestre em Geologia Econômica pela Universidade de Brasília e doutor em Geociências (Recursos Minerais e Hidrogeologia) pela Universidade de São Paulo em cooperação com o Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère da Université Claude-Bernard (UMR 5570) de Lyon (França). Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Atua como pesquisador sênior em Geociências e Geofísica, com ênfase nas geotecnologias aplicadas e monitoramento ambiental de áreas costeiras e estuarinas. *E-mail:* venerando.amaro@gmail.com.

Verónica Cánovas

É doutora em Engenharia Costeira (Universidade da Cantábria) e pesquisadora do IH-Cantabria. Sua principal área de conhecimento abrange processos de engenharia costeira, avaliação e gestão de riscos costeiros e impactos das mudanças climáticas nas áreas costeiras. Contribui para o desenvolvimento de modelos numéricos, ferramentas e metodologias sobre morfodinâmica costeira e riscos, especialmente para o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) e SMC-Brasil. *E-mail:* veronica.canovas@unican.es.

Este livro foi editorado com as fontes Minion Pro e Roboto.
Publicado *on-line* em: <editora.ufsc.br/estante-aberta>.

Este livro reúne artigos que apresentam os primeiros resultados da aplicação das metodologias de trabalho, bases de dados e modelos numéricos proporcionados pelo Projeto SMC-Brasil. Esses resultados são apresentados de forma a promover o entendimento do leitor sobre a importância do estudo das áreas costeiras no Brasil e sobre a atual facilidade de integrar metodologias e ferramentas no gerenciamento costeiro brasileiro.

