

BRUNA GARCIA AMBROSIO

**Dinâmica sedimentar das praias arenosas da porção setentrional do Arquipélago de  
Fernando de Noronha (PE): a influência da sazonalidade do clima de ondas**

São Paulo

2023

BRUNA GARCIA AMBROSIO

**Dinâmica sedimentar das praias arenosas da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha (PE): a influência da sazonalidade do clima de ondas**

Tese apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Siegle  
Coorientador: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mirella B. S. F. Costa

São Paulo

2023

AMBROSIO, Bruna Garcia. **Dinâmica sedimentar das praias arenosas da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha (PE)**: a influência da sazonalidade do clima de ondas. Tese (Doutorado) apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Aprovado em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Banca Examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Presidente

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Conceito \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Conceito \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição \_\_\_\_\_

Conceito \_\_\_\_\_ Assinatura \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho à minha família e ao meu amigo Leonardo Takase, com amor e gratidão por todo o apoio ao longo do período de elaboração deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me dar forças e iluminar meus passos nessa longa e desafiadora jornada da vida acadêmica.

Acredito que nada se constrói sozinho e que as pessoas que nos cercam contribuem enormemente para sermos a pessoa e profissional que somos, e para chegarmos onde chegamos. Me sinto privilegiada por sempre ter pessoas tão incríveis ao meu lado e que, sem dúvida, também foram responsáveis pela concretização desta tese.

Agradeço à minha família pelo amor, apoio e incentivo em todos os momentos, inclusive nos mais difíceis. Amo muito vocês! Esta conquista é nossa!

Aos meus melhores e mais fiéis amigos, Thor (meu anjinho, grande amor da minha vida e hoje a estrelinha mais bonita do céu) e Fred, que sempre foram a minha base emocional, o meu potinho inesgotável de amor e felicidade. Amo vocês mais do que tudo nessa vida!

A todos os familiares e amigos que sempre torceram pelo meu sucesso, e me acalmaram com uma mensagem de apoio e carinho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Siegle, pelo apoio, dedicação e confiança no meu trabalho. Obrigada por todos esses anos de orientação, direcionamento e motivação.

A todos os professores que passaram pela minha vida e contribuíram imensamente para o meu aprendizado, pelos quais tenho profunda admiração.

Agradeço aos meus amigos do IO e LDC, pelas conversas e tanta troca boa; e a todos os funcionários do IO, com os quais tive o enorme prazer de me relacionar durante estes anos.

Finalmente, gostaria de fazer um agradecimento especial àqueles que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho: Leonardo Takase, Luiza Stein, Mirella Costa, Anderson Targino e Sean Vitousek. Leo, sei que em algum lugar você está vibrando comigo. Queria poder ter a oportunidade de te dizer muitas e muitas vezes mais o quanto você foi importante nessa trajetória...sempre cheio de energia, ideias e motivação. Obrigada por fazer parte da minha vida. Você não imagina o quanto foi difícil terminar essa pesquisa sem você. Dedico essa conquista a você, meu amigo querido!

Serei eternamente grata ao Instituto Oceanográfico (minha segunda casa, meu lugar favorito em São Paulo), por todo o aprendizado e as experiências únicas e por ter trazido tantas pessoas incríveis para a minha vida. Apesar dos desafios, eu viveria tudo de novo!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“A sabedoria suprema é ter sonhos bastante grandes  
para não se perderem de vista enquanto  
os perseguimos.”

(FAULKNER, William, 1929)

## RESUMO

AMBROSIO, Bruna Garcia. **Dinâmica sedimentar das praias arenosas da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha (PE):** a influência da sazonalidade do clima de ondas. 2023. 206 f. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Ilhas oceânicas são porções de terra rodeadas por água e inseridas no assoalho oceânico. Estas possuem grande relevância ambiental, principalmente devido ao alto grau de endemismo, e abrigam diferentes ambientes costeiros, dentre os quais podemos citar as praias insulares. Situados distantes da influência continental, estes ambientes estão expostos às condições de vento, correntes, marés e ondas ao largo, e são muito vulneráveis às variações do nível médio do mar. No território brasileiro são encontradas cinco ilhas oceânicas, dentre estas está o Arquipélago de Fernando de Noronha (PE). Localizado no Oceano Atlântico Sul Equatorial, em uma região com profundidades de aproximadamente 4.000 m e cercada por uma plataforma insular rasa e estreita. Um importante habitat do arquipélago são os leitos de rodolitos. A Ilha de Fernando de Noronha conta com 15 praias arenosas, que se concentram na costa setentrional do arquipélago (Mar de Dentro). O sedimento é predominantemente autóctone e em grande parte bioclástico. Estas praias sofrem processos erosivos sazonais, sendo que algumas delas sofrem a erosão total de suas areias. Essa erosão episódica é seguida por períodos nos quais predominam os processos deposicionais e os perfis praias são restaurados. O principal objetivo deste trabalho é avaliar a dinâmica sedimentar, caracterizando os padrões de transporte de sedimentos e variação da morfologia das praias, principalmente em resposta à variabilidade sazonal do clima de ondas. Para isso, foram utilizadas a modelagem numérica e ferramentas de geoprocessamento aplicadas a imagens multiespectrais (sensoriamento remoto). Os resultados indicam que os eventos de ocorrência de *swell* de norte são responsáveis por alterar substancialmente a morfodinâmica costeira do Mar de Dentro. Tais eventos são comuns entre os meses de outubro a abril, causam o aumento da força de onda que atinge a costa e do potencial de mobilidade sedimentar por ondas em áreas maiores e mais profundas da plataforma. Nesses períodos há um aumento do nível médio da água junto à costa devido às ondas, gerando um gradiente de pressão barotrópico e, conseqüentemente, a intensificação das correntes e do transporte de sedimentos, especialmente a componente transversal à costa em direção à plataforma; isso ocorre em uma estreita faixa junto à costa, onde as ondas são mais efetivas na geração de correntes litorâneas. Logo, observa-se maior variabilidade morfológica das praias, com erosão das porções mais altas do perfil praias (diminuição da largura das praias) e formação de bancos arenosos

longitudinais às praias, em torno da isóbata de 5 m, que podem servir como depósitos temporários de sedimentos para posterior recuperação dos perfis praias. Por sua vez, os períodos de calmaria, marcados pela incidência de *swell* de sul de maio a setembro, são caracterizados por menor força de onda na costa e potencial de mobilidade. De maneira geral, as correntes são menos intensas e há pouca alteração morfológica. Nas praias localizadas no setor sudoeste, as correntes são um pouco mais intensas e longitudinais à costa, e são observadas maiores alterações da morfologia. A variabilidade sazonal do clima de ondas expõe alternadamente as porções norte e sul da plataforma insular a níveis de energia maiores ou menores, isso contribui para o desenvolvimento dos leitos de rodolitos e para que haja recuperação das praias, sem perdas expressivas de material sedimentar.

Palavras-chave: plataforma insular, clima de ondas, morfodinâmica, dinâmica sedimentar, morfologia de praia, modelagem numérica

## ABSTRACT

AMBROSIO, Bruna Garcia. **Sedimentary dynamics of sandy beaches in the northern portion of the Fernando de Noronha Archipelago (PE):** the influence of wave climate seasonality. 2023. 206 f. Tese (Doutorado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Oceanic islands are land portions surrounded by water and situated on the ocean floor. These have great environmental relevance, mainly due to the high degree of endemism, and are home to different coastal environments, including island beaches. Located far from continental influence, these environments are exposed to offshore conditions of wind, currents, tides and waves, and are very vulnerable to variations in mean sea level. Five oceanic islands are found in Brazilian territory, including the Fernando de Noronha Archipelago (PE). Located in the South Equatorial Atlantic Ocean, in a region with depths of approximately 4,000 m and surrounded by a shallow and narrow island shelf. An important habitat in the archipelago is the rhodolith beds. Fernando de Noronha Island has 15 sandy beaches, which are concentrated on the northern coast of the archipelago (Mar de Dentro). The sediment is predominantly autochthonous and largely bioclastic. These beaches present seasonal erosion processes, with some of them suffering total erosion of their sand. This episodic erosion is followed by periods in which depositional processes predominate and beach profiles are restored. The main aim of this study is to evaluate sedimentary dynamics, characterizing sediment transport and beach morphology variation patterns, mainly in response to seasonal variability of the wave climate. For this, we used numerical modeling and geoprocessing tools applied to multispectral images (remote sensing). The results indicate that north swell events are responsible for substantially altering the coastal morphodynamics of the Mar de Dentro. Such events are common between the months of October to April, causing an increase in the wave power that reaches the coast and the wave-induced sediment mobility in larger and deeper areas of the shelf. During these periods, there is an increase in the mean water level along the coast due to waves, generating a barotropic pressure gradient and, consequently, the intensification of currents and sediment transport, especially the cross-shore component towards the ocean; this occurs in a narrow strip along the coast, where waves are most effective in generating coastal currents. Therefore, greater beach morphology variability is observed, with erosion of the highest portions of the beach profile (beach width reduction) and formation of longitudinal sandy banks, around the 5 m isobath, which can serve as temporary deposits of sediments for subsequent recovery of beach profiles. In turn, periods of calm, marked by the incidence of south swells from May to

September, are characterized by lower wave power on the coast and sediment mobility. In general, the currents are less intense and the morphological changes are minor. On beaches located in the southwest section, the currents are slightly more intense and longshore, and greater changes in morphology are observed. The seasonal variability of the wave climate alternately exposes the northern and southern portions of the island shelf to higher or lower energy levels. This contributes to the development of rhodolith beds and the recovery of beaches, without significant losses of sedimentary material.

Keywords: insular shelf, wave climate, morphodynamics, sedimentary dynamics, beach morphology, numerical modeling

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha, Estado de Pernambuco - Brasil, com indicação das principais localidades mencionadas neste trabalho (Fonte: Adaptado de Calliari et al. (2016)). ..... 27
- Figura 1.2 Arquipélago de Fernando de Noronha; representação da Área de Proteção Ambiental e do Parque Nacional Marinho (Fonte: [www.rotanoronha.com.br](http://www.rotanoronha.com.br)). ..... 27
- Figura 1.3 Porto de Santo Antônio, na Ilha de Fernando de Noronha, evidenciando o processo de assoreamento na área da bacia de evolução portuária (Fonte: Google Earth Pro)..... 28
- Figura 1.4 Praia do Cachorro, localizada na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha: a. período de calmaria no Mar de Dentro, referente a 10/07/2016; e b. período de incidência de *swell* de norte, referente a 12/02/2016 (Fonte: Google Earth Pro)..... 32
- Figura 2.1 Área de estudo: a. localização do Arquipélago de Fernando de Noronha (Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil); b. contornos batimétricos na região do arquipélago, com a classificação granulométrica dos sedimentos costeiros obtida por Barcellos et al. (2018); c. localização de praias arenosas da porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha; d. perfil batimétrico. .... 39
- Figura 2.2 Arquipélago de Fernando de Noronha, com representação das áreas emersas destinadas à Área de Proteção Ambiental e ao Parque Nacional Marinho.40
- Figura 3.1 Área de estudo: a. localização do Arquipélago de Fernando de Noronha (Pernambuco, nordeste do Brasil); b. batimetria da região do arquipélago com a classificação granulométrica dos sedimentos costeiros obtida por Barcellos et al. (2018) e algumas localizações de rodolitos mapeados (adaptado de Santos et al. (2016)); c. localização de praias arenosas da porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha; e d. perfil batimétrico ao longo de P – P'. ..... 44
- Figura 3.2 a. Representação do domínio do modelo com os elementos das grades computacionais; e b. detalhe da variabilidade da resolução horizontal, indicando a localização do ADP. .... 46

- Figura 3.3 Comparação entre os parâmetros de onda medidos (azul) e modelados (vermelho) para o período de 23 a 30 de janeiro de 2014: a. alturas significativa (Hs); b. período de pico (Tp); c. direção média das ondas. .... 49
- Figura 3.4 Histogramas direcionais de altura significativa de onda (Hs) (a. anual; b. verão; e c. inverno) e de período de pico de onda (Tp) (d. anual; e. verão; e f. inverno), representando as ondas do período 1979-2018. .... 52
- Figura 3.5 Distribuição da força de onda próximo à costa (cores) e vetores de deriva longitudinal potencial (setas) nas praias arenosas localizadas na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha; a. anual; b. verão; e c. inverno. As linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos..... 54
- Figura 3.6 Porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade bioclástica na plataforma insular de Fernando de Noronha nos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando diferentes diâmetros de grão: a. b. 0,4 cm (cascalho); c. d. 0,05 cm (areia grossa); e. f. 0,025 cm (areia média); e g. h. 0,0125 cm (areia fina). As cores no mapa representam as porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade sedimentar e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos. .... 56
- Figura 3.7 Porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade bioclástica na plataforma insular norte de Fernando de Noronha nos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando diferentes diâmetros de grão: a. b. 0,4 cm (cascalho); c. d. 0,05 cm (areia grossa); e. f. 0,025 cm (areia média); e g. h. 0,0125 cm (areia fina). As cores no mapa representam as porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade sedimentar e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos. .... 58
- Figura 3.8 Porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade de rodolitos na plataforma insular de Fernando de Noronha nos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando os tamanhos médios: a. b. 3 cm; e c. d. 6 cm. As cores no mapa representam as porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade de rodolitos e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos. .... 61
- Figura 3.9 Ocorrência de mobilidade de rodolitos na plataforma insular de Fernando de Noronha, considerando os tamanhos médios de 3 cm (esquerda) e 6 cm (direita) nos cenários de ondas extremas: a. e. S - Hs: 3,78 m, Tp: 15,43 s, Dm: 183,51°; b. f. SE - Hs: 3,74 m, Tp: 11,43 s, Dm: 136,74°; c. g. N - Hs:

4,14 m, Tp: 16,15 s, Dm: 355,97°; e d. h. NW - Hs: 3,64 m, Tp: 16,14 s, Dm: 335,92°. As cores no mapa representam se ocorre mobilidade de rodolitos (azul: sem mobilidade e amarelo: mobilidade) e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos. ....	63
Figura 4.1 Imagem de satélite do Arquipélago de Fernando de Noronha (PE), indicando a localização das principais praias (Fonte: Google Earth) (CALLIARI et al., 2016).....	67
Figura 4.2 Localização dos transectos utilizados para monitorar a variabilidade da largura das praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1) (Fonte: PlanetScope).....	71
Figura 4.3 a. Representação do domínio do modelo com os elementos das grades computacionais; e b. detalhe da variabilidade da resolução horizontal, indicando a localização do ADCP utilizado para medições de ondas <i>in situ</i> .	73
Figura 4.4 Localização dos pontos utilizados para extrair resultados da modelagem de ondas nas proximidades das praias investigadas. ....	74
Figura 4.5 Variabilidade mensal da largura das praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1) ao longo dos anos de 2020 e 2021. ....	76
Figura 4.6 Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de janeiro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	78
Figura 4.7 Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de fevereiro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	79
Figura 4.8 Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de março de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	80
Figura 4.9 Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de abril de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	81
Figura 4.10 Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de maio de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	82

Figura 4.11	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de junho de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	83
Figura 4.12	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de julho de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	84
Figura 4.13	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de agosto de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	85
Figura 4.14	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de setembro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	86
Figura 4.15	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de outubro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	87
Figura 4.16	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de novembro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	88
Figura 4.17	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de dezembro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	89
Figura 4.18	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de janeiro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	90
Figura 4.19	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de fevereiro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	91
Figura 4.20	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de março de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	92
Figura 4.21	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de abril de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	93

Figura 4.22	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de maio de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	94
Figura 4.23	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de junho de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	95
Figura 4.24	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de julho de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	96
Figura 4.25	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de agosto de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	97
Figura 4.26	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de setembro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	98
Figura 4.27	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de outubro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	99
Figura 4.28	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de novembro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	100
Figura 4.29	Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de dezembro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada. ....	101
Figura 4.30	Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de janeiro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). ....	103
Figura 4.31	Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de fevereiro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). ....	104
Figura 4.32	Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de março dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). ....	104

Figura 4.33 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de abril dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	104
Figura 4.34 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de maio dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	105
Figura 4.35 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de junho dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	105
Figura 4.36 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de julho dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	105
Figura 4.37 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de agosto dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	106
Figura 4.38 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de setembro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	106
Figura 4.39 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de outubro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	106
Figura 4.40 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de novembro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	107
Figura 4.41 Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de dezembro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita). .....	107
Figura 4.42 Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia do Cachorro (CA1). .....	109
Figura 4.43 Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia do Meio (ME1). .....	109
Figura 4.44 Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia da Conceição (CC1). .....	110

Figura 4.45 Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia da Conceição (CC2).....	110
Figura 4.46 Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia do Boldró (BD1).....	111
Figura 5.1 Fluxograma esquemático sintetizando os métodos aplicados.....	116
Figura 5.2 Localização do equipamento fundeado para aquisição de dados oceanográficos <i>in situ</i> .....	117
Figura 5.3 Disposição das grades computacionais utilizadas para compor o domínio do modelo: grade externa em cinza e grade interna em azul. ....	122
Figura 5.4 Comparação entre as séries temporais da variação do nível da água resultantes da modelagem numérica e medida pelo ADP. ....	127
Figura 5.5 Comparação entre as séries temporais das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes resultantes da modelagem numérica e medida pelo ADP.....	127
Figura 5.6 Série temporal da variação do nível da água obtida através de medições de pressão <i>in situ</i> . ....	131
Figura 5.7 Série temporal da variação vertical da magnitude da velocidade das correntes medidas <i>in situ</i> e alterações do nível da água.....	132
Figura 5.8 Série temporal da variação vertical da direção da velocidade das correntes medidas <i>in situ</i> e alterações do nível da água.....	132
Figura 5.9 Série temporal da média vertical das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes medidas <i>in situ</i> .....	133
Figura 5.10 Localização dos pontos de observação nas praias do Cachorro e Meio (ME1), Conceição (CC1 a CC4) e Boldró (BD1 a BD3), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem hidrodinâmica.	134
Figura 5.11 Séries temporais do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e a força de onda e magnitude da velocidade das correntes resultantes da simulação do cenário <i>Swell_mensal</i> .....	135
Figura 5.12 Séries temporais do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e a força de onda e magnitude da velocidade das correntes resultantes da simulação do cenário <i>Calmaria_mensal</i> .....	136

Figura 5.13	Variação das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes, em resposta às variações do nível da água e da força de onda resultantes da simulação do cenário <i>Swell_mensal</i> . .....	138
Figura 5.14	Variação das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes, em resposta às variações do nível da água e da força de onda resultantes da simulação do cenário <i>Calmaria_mensal</i> . .....	138
Figura 5.15	Velocidade das correntes resultantes da simulação do cenário <i>Swell_mensal</i> , representando as condições de a. vazante e b. enchente. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção das correntes. ....	140
Figura 5.16	Sobrelevação do nível médio da água junto à costa, durante períodos de incidência de <i>swell</i> de norte, em condições de a. vazante e b. enchente. ....	142
Figura 5.17	Circulação costeira durante evento de alta energia com incidência de <i>swell</i> de norte. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção das correntes. ....	143
Figura 5.18	Transporte total médio de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_evento</i> ; b. <i>Calmaria_evento</i> . A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar. ....	146
Figura 5.19	Transporte total médio de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_mensal</i> ; b. <i>Calmaria_mensal</i> . A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar. ....	147
Figura 5.20	Transporte total médio de sedimentos arenosos nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, resultante dos cenários: a. <i>Swell_evento</i> ; b. <i>Calmaria_evento</i> . A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar. ....	148
Figura 5.21	Transporte total médio de sedimentos arenosos nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, resultante dos cenários: a. <i>Swell_mensal</i> ; b. <i>Calmaria_mensal</i> . A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar. ....	149
Figura 5.22	Localização dos perfis perpendiculares à costa, nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica. ....	150

Figura 5.23	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia do Cachorro (CA1), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	152
Figura 5.24	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia do Meio (ME1), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	153
Figura 5.25	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia da Conceição (CC1), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	154
Figura 5.26	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia da Conceição (CC2), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	155
Figura 5.27	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia do Boldró (BD1), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	156
Figura 5.28	Localização dos perfis paralelos à costa, nas praias do Cachorro (CA), Meio (ME), Conceição (CC) e Boldró (BD), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica. ....	157
Figura 5.29	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia do Cachorro (CA), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	159
Figura 5.30	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia do Meio (ME), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	160
Figura 5.31	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia da Conceição (CC), em condição	

	de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	161
Figura 5.32	Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia do Boldró (BD), em condição de incidência de <i>swell</i> de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.....	162
Figura 5.33	Erosão/deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_evento</i> ; b. <i>Calmaria_evento</i> . ....	165
Figura 5.34	Erosão/deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_mensal</i> ; b. <i>Calmaria_mensal</i> .....	166
Figura 5.35	Erosão cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_evento</i> ; b. <i>Calmaria_evento</i> . ....	167
Figura 5.36	Erosão cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_mensal</i> ; b. <i>Calmaria_mensal</i> . ....	168
Figura 5.37	Deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_evento</i> ; b. <i>Calmaria_evento</i> . ....	169
Figura 5.38	Deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. <i>Swell_mensal</i> ; b. <i>Calmaria_mensal</i> . ....	170
Figura 5.39	Localização dos perfis perpendiculares à costa, nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica. ....	171
Figura 5.40	Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia do Cachorro (CA1): a. <i>Swell_evento</i> e b. <i>Calmaria_evento</i> .....	173
Figura 5.41	Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia do Cachorro (CA1): a. <i>Swell_mensal</i> e b. <i>Calmaria_mensal</i> . ...	174
Figura 5.42	Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia do Meio (ME1): a. <i>Swell_evento</i> e b. <i>Calmaria_evento</i> .....	175

Figura 5.43 Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia do Meio (ME1): a. <i>Swell_mensal</i> e b. <i>Calmaria_mensal</i> . ....	176
Figura 5.44 Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC1): a. <i>Swell_evento</i> e b. <i>Calmaria_evento</i> . ...	177
Figura 5.45 Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC1): a. <i>Swell_mensal</i> e b. <i>Calmaria_mensal</i> ...	178
Figura 5.46 Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC2): a. <i>Swell_evento</i> e b. <i>Calmaria_evento</i> . ...	179
Figura 5.47 Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC2): a. <i>Swell_mensal</i> e b. <i>Calmaria_mensal</i> ...	180
Figura 5.48 Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia do Boldró (BD1): a. <i>Swell_evento</i> e b. <i>Calmaria_evento</i> . ....	181
Figura 5.49 Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia do Boldró (BD1): a. <i>Swell_mensal</i> e b. <i>Calmaria_mensal</i> . ....	182
Figura 5.50 Localização dos pontos de observação nas praias do Cachorro e Meio (ME1), Conceição (CC1 a CC4) e Boldró (BD1 a BD3), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica.	184
Figura 5.51 Séries temporais a, do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e b. das componentes longitudinal (x) e transversal (y) do transporte total de sedimentos resultantes da simulação do cenário <i>Swell_mensal</i> .....	186
Figura 5.52 Séries temporais a. do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e b. das componentes longitudinal (x) e transversal (y) do transporte total de sedimentos resultantes da simulação do cenário <i>Calmaria_mensal</i> .....	187
Figura 6.1 Mapa de integração da faciologia e litologia das ilhas e plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha, indicando a presença de bancos arenosos em formato de meia-lua, localizados em aproximadamente 23 m de profundidade (Fonte: Assis et al. (2018))......	194

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Parâmetros de onda usados em cada cenário anual.....	46
Tabela 3.2 Parâmetros de onda usados em cada cenário de verão.....	47
Tabela 3.3 Parâmetros de onda usados em cada cenário de inverno.....	47
Tabela 3.4 Parâmetros de onda usados em cada cenário extremo. ....	47
Tabela 3.5 Classificação do modelo, proposta por Walstra et al. (2001), de acordo com os valores de <i>Relative Mean Absolute Error</i> (RMAE).....	48
Tabela 3.6 Parâmetros estatísticos calculados comparando os parâmetros de onda medidos e modelados.....	49
Tabela 4.1 Descrição das imagens de satélite selecionadas para o ano de 2020. ....	69
Tabela 4.2 Descrição das imagens de satélite selecionadas para o ano de 2021. ....	70
Tabela 4.3 Estatística descritiva básica da largura de praia (em metros). ....	77
Tabela 4.4 Estatística descritiva básica da força de onda (em kW/m) que atinge as praias investigadas durante cada mês do ano de 2020. ....	102
Tabela 4.5 Estatística descritiva básica da força de onda (em kW/m) que atinge as praias investigadas durante cada mês do ano de 2021. ....	102
Tabela 5.1 Dimensões e resolução espacial das grades computacionais.....	122
Tabela 5.2 Parâmetros estatísticos comparativos obtidos na validação do modelo hidrodinâmico.....	127
Tabela 5.3 Descrição dos experimentos numéricos elaborados para as simulações hidrodinâmicas e morfológicas. ....	128

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 APRESENTAÇÃO DA TESE .....	25
1.2 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA .....	30
1.3 HIPÓTESE .....	34
1.4 OBJETIVOS .....	34
1.5 ESTRUTURA DA TESE .....	35
<b>CAPÍTULO 2 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>36</b>
<b>CAPÍTULO 3 MOBILIDADE DE SEDIMENTOS E RODOLITOS INDUZIDA POR ONDAS EM UMA PLATAFORMA INSULAR ESTREITA DOMINADA PELA VARIABILIDADE DO CLIMA DE ONDAS.....</b>	<b>41</b>
3.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO .....	41
3.2 INTRODUÇÃO .....	41
3.3 MÉTODOS .....	44
3.3.1. <i>Parâmetros de onda</i> .....	44
3.3.2. <i>Modelagem numérica</i> .....	45
3.3.3. <i>Dados medidos e validação do modelo</i> .....	47
3.3.4. <i>Ação das ondas e mobilidade sedimentar</i> .....	49
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
3.4.1. <i>Clima de ondas</i> .....	51
3.4.2. <i>Força de onda e transporte longitudinal na porção setentrional da ilha</i> .....	52
3.4.3. <i>Mobilidade de sedimentos bioclásticos induzida por ondas</i> .....	55
3.4.4. <i>Mobilidade de rodolitos induzida por ondas</i> .....	59
3.5 CONCLUSÕES .....	64
<b>CAPÍTULO 4 INFLUÊNCIA DO CLIMA DE ONDAS NA VARIABILIDADE DA LINHA DE COSTA.....</b>	<b>66</b>
4.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO .....	66
4.2 INTRODUÇÃO .....	66
4.3 MÉTODOS .....	68
4.3.1. <i>Sensoriamento remoto</i> .....	68
4.3.2. <i>Modelagem numérica</i> .....	71

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	74
4.5 CONCLUSÕES .....	111
<b>CAPÍTULO 5 RESPOSTA MORFOLÓGICA DAS PRAIAS AO CLIMA DE ONDAS: EXPERIMENTOS NUMÉRICOS MORFODINÂMICOS.....</b>	<b>113</b>
5.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO .....	113
5.2 INTRODUÇÃO .....	113
5.3 MÉTODOS .....	115
5.3.1. <i>Levantamento e análise de dados.....</i>	<i>116</i>
5.3.2. <i>Modelagem numérica: Modelo numérico Delft3D.....</i>	<i>119</i>
5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	130
5.4.1. <i>Observações in situ: variação do nível da água e velocidade das correntes .....</i>	<i>130</i>
5.4.2. <i>Hidrodinâmica da porção setentrional do arquipélago sob diferentes condições de incidência de ondas .....</i>	<i>133</i>
5.4.3. <i>Transporte sedimentar e alterações morfológicas nas praias arenosas da porção setentrional do arquipélago sob influência da sazonalidade do clima de ondas.....</i>	<i>143</i>
5.4.4. <i>Avaliação da importância relativa de fatores ambientais na dinâmica sedimentar .....</i>	<i>183</i>
5.5 CONCLUSÕES .....	188
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>190</b>
6.1 CONCLUSÕES DA TESE .....	190
6.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	192
6.2.1 <i>Limitações.....</i>	<i>192</i>
6.2.2 <i>Sugestões para trabalhos futuros .....</i>	<i>193</i>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>196</b>

# Capítulo 1 Introdução

## 1.1 Apresentação da tese

A zona costeira é uma área de transição entre o continente e o oceano, na qual ocorre a interação entre os processos continentais, oceânicos e atmosféricos, resultando em ambientes altamente dinâmicos. Esta pode ser composta por diferentes tipos de ambientes costeiros, que apresentam grande importância econômica, social e ambiental, oferecendo diversos serviços ecossistêmicos.

Dentre os ambientes costeiros, podemos citar as praias. Segundo a definição proposta por King (1972), as praias são ambientes sedimentares costeiros, que se estendem desde onde inicia a interferência da velocidade orbital das ondas sobre o fundo até o limite mais continental da ação das ondas de tempestade. Além de serem alvo de intensa ocupação urbana, estes ambientes são amplamente utilizados para lazer, pesca, atividades portuárias e outras.

O formato, tamanho e composição de cada praia, assim como o seu comportamento morfológico, é resultado das características geológicas e proximidade da fonte de sedimentos, interações com os processos modeladores e características da plataforma interna adjacente (KOMAR, 1998). Os sistemas praias estão sob a influência de processos continentais e oceânicos, e a grande mobilidade das praias é consequência de um equilíbrio dinâmico extremamente frágil e sensível aos impactos de origem antrópica e natural. Dentre os principais agentes modeladores da morfologia costeira estão as marés, ondas, vento, correntes, drenagem continental e eventos de tempestade. Além disso, devem ser considerados os fatores de longo termo, como por exemplo o aumento do nível médio do mar relacionado às mudanças climáticas, e os fatores relacionados às atividades antrópicas, como a ocupação urbana e as obras costeiras (SOUSA, 2007; IPCC, 2007; BIRD, 2008; NICHOLLS e CAZENAVE, 2010; SOUSA et al. 2013).

O litoral brasileiro é bastante conhecido por suas praias continentais, que possuem grande relevância turística. Entretanto, existem as ilhas oceânicas localizadas ao largo da costa brasileira que também abrigam inúmeras praias.

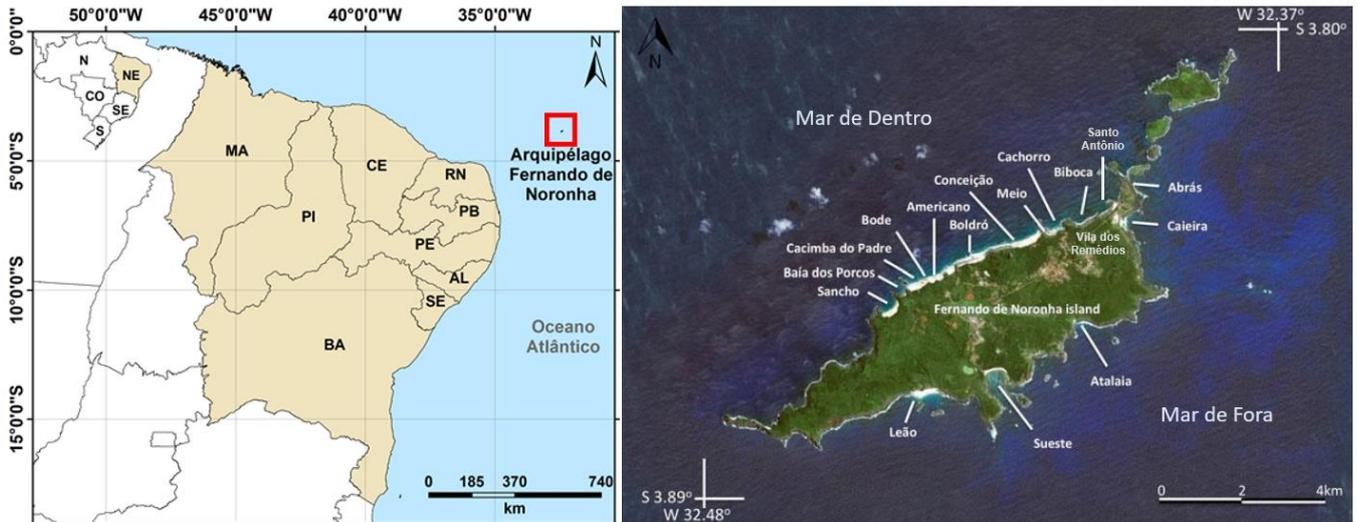
Fazem parte do território brasileiro cinco ilhas e arquipélagos inseridos no assoalho oceânico: Arquipélagos de São Pedro e São Paulo, de Fernando de Noronha e Atol das Rocas, todos localizados na região equatorial; Ilha da Trindade e Arquipélago de Martin Vaz, ambos

na região tropical. A origem e localização geográfica dessas ilhas sofreu decisiva influência de estruturas da litosfera oceânica, como zonas de fratura e *hot spots* (ALMEIDA, 2006).

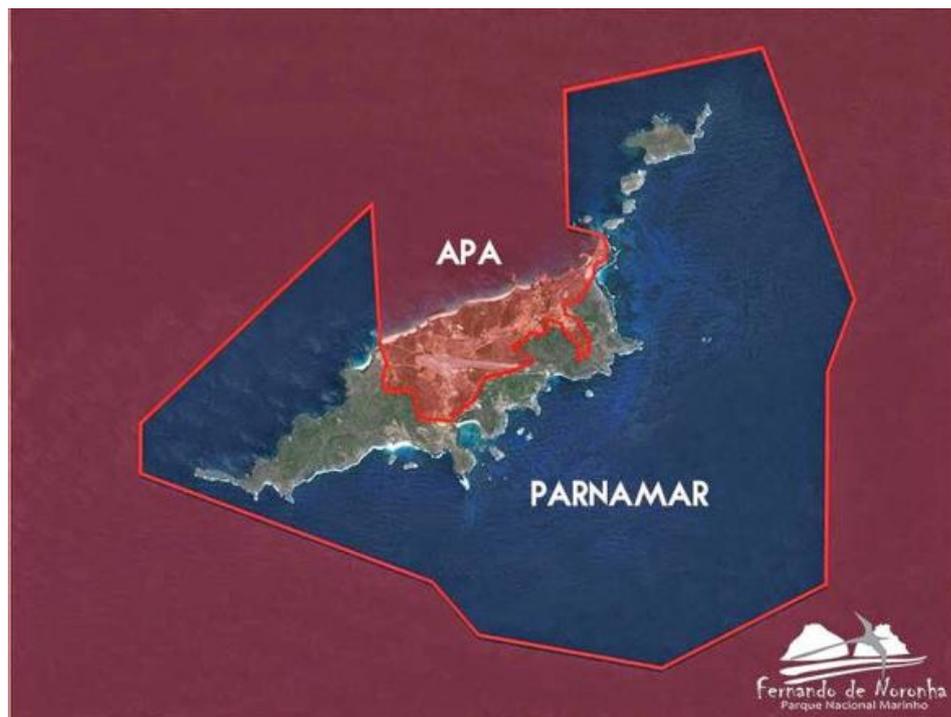
Devido ao seu isolamento geográfico estes ambientes abrigam uma biodiversidade bastante peculiar, com grande número de espécies endêmicas (SERAFINI et al., 2010). Assim, por possuírem extrema relevância ambiental, têm sido alvo de diversos estudos científicos, sendo que a maioria aborda os aspectos bióticos destes ambientes, relacionados a biodiversidade, fauna, flora e ecologia.

O presente trabalho contempla o entorno do Arquipélago de Fernando de Noronha, com ênfase na porção setentrional, denominada Mar de Dentro. O arquipélago, pertencente ao Estado de Pernambuco, é formado por um conjunto de 21 ilhas, ilhotas e rochedos, e tem como ilha principal a Ilha de Fernando de Noronha (Figura 1.1). Devido a sua exuberante beleza natural esse tem sido um importante destino turístico nacional.

Com o objetivo de proteger e conservar a qualidade ambiental e as condições de vida da fauna e flora, compatibilizar o turismo organizado com a preservação dos recursos naturais e conciliar a ocupação humana com a proteção ao meio ambiente, foi criada em 1986 a Área de Proteção Ambiental de Fernando de Noronha - Rocas - São Pedro e São Paulo, com a publicação do Decreto Federal nº 92.755. Essa área compreende a porção urbana da ilha principal, bem como áreas destinadas à conservação dos recursos naturais e da vida silvestre, totalizando 1/3 da Ilha de Fernando de Noronha. Em 1988 foi criado, a partir do Decreto Federal nº 96.693, o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha, formado por 2/3 da ilha principal e incluindo todas as ilhas secundárias (totalizando uma área de 112,7 km<sup>2</sup>). O parque tem como objetivo proteger uma amostra representativa dos ecossistemas marinhos e terrestres do arquipélago, assegurando a preservação de sua fauna, flora e demais recursos naturais, proporcionando oportunidades controladas de visitação, educação e pesquisa científica, e também contribui para a proteção de sítios e estruturas de interesse histórico-cultural. Os limites da Área de Proteção Ambiental e do Parque Nacional Marinho são representados na Figura 1.2.



**Figura 1.1** Localização do Arquipélago de Fernando de Noronha, Estado de Pernambuco - Brasil, com indicação das principais localidades mencionadas neste trabalho (Fonte: Adaptado de Calliari et al. (2016)).



**Figura 1.2** Arquipélago de Fernando de Noronha; representação da Área de Proteção Ambiental e do Parque Nacional Marinho (Fonte: [www.rotanoronha.com.br](http://www.rotanoronha.com.br)).

A Ilha de Fernando de Noronha, por se tratar de uma ilha oceânica que possui uma população fixa de 2.974 habitantes (IBGE, 2016) e que tem como principal atividade econômica o turismo, necessitou de alguns investimentos em infraestrutura portuária e aeroportuária. Em 1982, na Baía de Santo Antônio, foi construído um molhe que funciona como porto, denominado Porto de Santo Antônio. Nesse porto é realizada a atracação de pequenas embarcações que fazem o transporte de cabotagem para o arquipélago e a atracação, para embarque e desembarque, dos pequenos barcos orgânicos (de turismo, pesca e/ou recreio da ilha) e de passageiros oriundos dos navios que fundeiam na área externa do molhe (SILVA e SOUZA, 2010).

A Baía de Santo Antônio integra a Área de Proteção Ambiental e é uma região de grande valor em termos biológicos, visto que é considerada uma área muito importante para o desenvolvimento de tartarugas marinhas e local de deslocamento, descanso, cuidado parental e acasalamento de golfinhos (MMA, 2005). No entanto, essa é uma das regiões mais movimentadas e impactadas do arquipélago, tais impactos estão relacionados a presença do porto, ocupação urbana e intensa atividade turística nessa porção da Ilha de Fernando de Noronha.

Silva e Souza (2010) avaliaram os impactos ambientais e a capacidade de suporte do porto e embarcações em Fernando de Noronha. Um dos impactos ambientais relacionados a essa obra costeira é o assoreamento e a erosão de porções distintas da praia do Porto de Santo Antônio. Na Figura 1.3 observam-se os processos de deposição à retaguarda da bacia de evolução portuária e de erosão no outro segmento da praia, do lado oposto do molhe.



**Figura 1.3** Porto de Santo Antônio, na Ilha de Fernando de Noronha, evidenciando o processo de assoreamento na área da bacia de evolução portuária (Fonte: Google Earth Pro).

Deste modo, as praias da Ilha de Fernando de Noronha já enfrentam a influência direta dos impactos das atividades antrópicas, como ocupação urbana e presença de construções e obras costeiras. Assim, aumenta-se ainda mais as preocupações relacionadas à preservação ambiental, planejamento urbano e vulnerabilidade aos riscos naturais, incluindo inundações marinhas, efeitos de tempestades e eventos extremos, subida do nível do mar e erosão costeira.

Neste contexto, conhecer a dinâmica do sistema praial, incluindo a variabilidade dos fatores ambientais (maré, nível médio do mar, ondas, correntes, vento, etc.) e as tendências de variação da morfologia costeira e posição da linha de costa, é essencial para o planejamento costeiro e tomada de decisões.

Visando entender a mobilidade do ambiente praial, são desenvolvidos os estudos de morfodinâmica costeira, que buscam avaliar a interação dos efeitos da maré, ondas, correntes e vento), considerando as características do material sedimentar, na determinação das variações morfológicas, e vice-versa (WRIGHT e SHORT, 1984). Portanto, envolve o conhecimento do ajuste mútuo entre a dinâmica de fluidos, a dinâmica sedimentar e a evolução morfológica.

Dentre os fatores que tornam as praias ambientes de alta complexidade está a atuação simultânea de uma variedade de processos e sua ampla variabilidade temporal e espacial. Estes aspectos dificultam os estudos relacionados à morfodinâmica costeira, exigindo grande disponibilidade de tempo e recursos financeiros para a realização de coletas de grandes quantidades de dados em diferentes pontos e ao longo de diferentes períodos, a fim de abranger a variabilidade dos parâmetros estudados. Neste contexto, o desenvolvimento e avanço dos modelos numéricos foram fundamentais para a compreensão da evolução morfológica dos ambientes costeiros.

A modelagem numérica tem sido uma ferramenta bastante importante e amplamente utilizada nos estudos de áreas costeiras. De acordo com Ranasinghe e Pattiaratchi (1999), a modelagem numérica além de representar uma vantagem em termos de relação custo-benefício, uma vez que exige uma menor quantidade de dados medidos no ambiente, mostra-se uma ferramenta versátil, permitindo a manipulação das variáveis independentes para que os efeitos de um evento isolado possam ser analisados. Além disso, os dados modelados são capazes de preencher espacialmente e temporalmente as lacunas dos dados medidos *in situ* (SIEGLE, 2003).

## 1.2 Motivação da pesquisa

Situadas distantes da influência continental, as ilhas oceânicas estão expostas às condições *offshore* de vento, correntes, marés e ondas. Essas forçantes oceânicas atuam nas plataformas insulares, que normalmente são rasas e estreitas. As fontes sedimentares para estas ilhas são reduzidas, já que o sedimento é essencialmente autóctone, formado por clastos resultantes da erosão das rochas expostas e, principalmente, por bioclastos marinhos (HARNEY et al., 2000; HARNEY e FLETCHER, 2003; MANSO et al., 2011; BARCELLOS et al., 2018). Portanto, o balanço de sedimentos arenosos em uma plataforma insular depende do equilíbrio de vários fatores que inclui produção, armazenamento temporário e permanente e perdas por abrasão, dissolução, bioerosão e transporte *offshore* (HARNEY e FLETCHER, 2003; CONGER et al., 2009).

Além disso, considerando que as ilhas oceânicas são porções de terra rodeadas por água e inseridas no fundo oceânico, estes ambientes são muito vulneráveis às variações do nível médio do mar e, conseqüentemente, aos efeitos das mudanças climáticas. Segundo o relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2014), as variações climáticas já estão acontecendo em diferentes escalas e regiões do planeta. Portanto, existe uma preocupação recente em conhecer a dinâmica costeira atual, para poder identificar possíveis tendências e fazer projeções para cenários futuros.

Todos esses aspectos contribuem para que as ilhas oceânicas, especialmente as praias insulares arenosas, sejam ambientes altamente dinâmicos e muito vulneráveis aos processos erosivos causados por ondas, tempestades de alta energia, eventos extremos e variações do nível do mar.

Embora sejam pouco expressivas em área, ocupando apenas uma pequena porção da superfície terrestre, possuem grande relevância ambiental devido à sua biodiversidade com alto grau de endemismo, o que as torna mais suscetíveis as rápidas mudanças externas relacionadas à interferência humana (CRONK, 1997; PIMM, 1996; KIER et al., 2009). Os níveis de energia e os processos sedimentares induzidos por ondas desempenham um papel essencial na distribuição de habitats e organismos bentônicos (HEMER, 2006). Por exemplo, o desenvolvimento de leitos de rodolitos está diretamente relacionado à ação das ondas na plataforma. Eles podem se beneficiar das tensões de cisalhamento de fundo geradas pelas ondas, que podem eventualmente causar movimentos de arrasto e rolamento (HARRIS et al., 1996).

A Ilha de Fernando de Noronha conta com 32 praias, sendo 15 praias arenosas. De modo geral, as praias de leito arenoso, as quais apresentam maior frequência turística, se concentram

na costa setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha, na região denominada Mar de Dentro. O sedimento é predominantemente autóctone e em grande parte bioclástico (fragmentos de conchas e algas), com tamanho de grão de areia fina a média (BARCELLOS et al., 2018; MANSO et al., 2011).

Algumas dessas praias sofrem sazonalmente erosão total de suas areias, podendo inclusive expor seus substratos rochosos. A aparente reposição que se verifica subsequentemente não assegura que haja um equilíbrio de massa nessa dinâmica sedimentar. Esse mecanismo natural é influenciado principalmente pelo regime insular de ondas, o qual é regido por variações sazonais dos sistemas meteorológicos (posicionamento da Zona de Convergência Intertropical e atuação dos ciclones extratropicais na agitação marítima). Consequentemente, as praias desenvolvem perfis praias sazonais de erosão e de acumulação, denominados perfil de temporal e de calmaria, respectivamente (MANSO et al., 2011).

Este processo de erosão sazonal ocasionado por ação das ondas é bastante evidente na praia do Cachorro, por exemplo. Segundo relatos de moradores e pesquisadores locais, a faixa de areia dessa praia chega a desaparecer no período do verão, quando as ondas do tipo *swell* (incidentes de quadrante norte) são mais frequentes e intensas nessa região. Tal processo pode ser verificado nas imagens de satélite obtidas através do programa Google Earth Pro (Figura 1.4). A Figura 1.4a representa uma situação de inverno austral (calmaria no Mar de Dentro), na qual a praia do Cachorro apresenta uma faixa de areia ampla. Em contrapartida, a Figura 1.4b mostra uma situação de inverno boreal (período de chegada de *swell* de norte no Mar de Dentro), na qual fica explícita a erosão da praia.

Como fator agravante ao processo natural de erosão sazonal das praias por ação das ondas, sem garantia de balanço de massa, a falta de alternativas para fornecimento de areias quartzosas para a construção civil, senão através de custosa importação do continente, tem ocasionado a retirada clandestina de areias litorâneas pela população local (MANSO et al., 2011). Conforme observado pelos autores, uma forte pressão popular persiste no sentido da manutenção dessa extração, potencialmente perigosa para o equilíbrio das praias enquanto depósito sedimentar. Os mesmos autores identificaram uma tendência erosiva com perda significativa de material sedimentar em praticamente todos os setores das praias analisadas (praias Conceição, Boldró, Cacimba do Padre e Sancho).



**Figura 1.4** Praia do Cachorro, localizada na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha: a. período de calmaria no Mar de Dentro, referente a 10/07/2016; e b. período de incidência de *swell* de norte, referente a 12/02/2016 (Fonte: Google Earth Pro).

A partir da problemática exposta anteriormente, acreditamos que o balanço sedimentar da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha é controlado principalmente pela ação do transporte de sedimentos induzido por ondas, tanto ao longo da costa (entre as praias do Mar de Dentro) quanto transversalmente à costa, com acentuado comportamento sazonal em função do regime de ventos e ondas atuante na região. O processo de erosão sazonal verificado nas praias sugere que o transporte sedimentar transversal à costa possui relevância similar ou superior ao transporte ao longo da costa. Além disso, o balanço sedimentar sofre influência das intervenções antrópicas, dentre as quais podemos citar a construção do Porto de Santo Antônio (molhe), as atividades de dragagem da área portuária e a retirada de areia das praias para utilização na construção civil, que têm afetado de maneira expressiva a disponibilidade e distribuição de sedimentos e, conseqüentemente, a morfologia local.

Considerando a grande relevância das praias arenosas em termos ambiental e socioeconômico, as consequências de processos erosivos naturais e/ou antrópicos podem ser uma preocupação, sobretudo devido ao atual cenário das mudanças climáticas. Portanto, é fundamental o investimento de maiores esforços em estudos a respeito da morfodinâmica e do balanço sedimentar na porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha. Esse tipo de estudo envolve alto grau de complexidade, uma vez que para compreender o balanço sedimentar é necessário ter conhecimento de uma variedade de fatores ambientais e processos morfodinâmicos, incluindo o transporte de sedimentos longitudinal e transversal à costa induzido por ondas, a influência de promontórios rochosos no transporte sedimentar, a remobilização de sedimentos por ação do vento e as trocas de material sedimentar com a plataforma insular. Além disso, é importante avaliar as alterações temporais e espaciais desses processos, e considerar ainda as intervenções antrópicas no sistema praias.

Neste contexto, a modelagem numérica, apesar de suas limitações, torna-se uma ferramenta bastante valiosa. Além de representar uma vantagem em termos de relação custo-benefício, por exigir menor quantidade de dados medidos no ambiente, mostra-se uma ferramenta versátil, permitindo a manipulação das variáveis independentes para que os efeitos de um evento isolado possam ser analisados (RANASINGHE e PATTIARATCHI, 1999). Entretanto, essa é uma ferramenta pouco explorada na região do Arquipélago de Fernando de Noronha.

Assim, através da aplicação da modelagem numérica e de ferramentas de geoprocessamento (sensoriamento remoto), em conjunto com dados discretos coletados *in situ*, a pesquisa de doutorado tem como objetivo principal avaliar a dinâmica sedimentar da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha, com ênfase nas praias arenosas do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, a fim de identificar os fatores ambientais e os processos morfodinâmicos que atuam nesse ambiente, considerando suas variações temporais e espaciais, para assim promover melhor entendimento sobre o balanço sedimentar e a evolução da morfologia costeira local.

Os resultados deste estudo contribuem com um amplo conjunto de informações a respeito do meio abiótico, contando com a caracterização da região quanto a hidrodinâmica, a incidência de ondas, a mobilidade e transporte de sedimentos (e rodolitos) e a evolução da morfologia costeira. Dessa maneira, poderá auxiliar no desenvolvimento de novas pesquisas voltadas aos meios biótico e abiótico, na tomada de decisões e na implementação de políticas públicas de preservação e conservação ambiental, colaborando para a eficiência do sistema de gestão costeira da Ilha de Fernando de Noronha.

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos, por exemplo, para ilhas do Arquipélago do Haváí (EUA), abordando os processos de ressuspensão e transporte de sedimentos induzido por ondas e por maré, o transporte sedimentar através de cânions submarinos, os efeitos da elevação do nível do mar na hidrodinâmica e dinâmica sedimentar e a evolução morfológica da linha de costa dessas ilhas (OGSTON et al., 2004; STORLAZZI et al., 2004; STORLAZZI et al., 2011; FLETCHER et al., 2003). Contudo, a temática da dinâmica sedimentar de ilhas oceânicas ainda é pouco explorada pela comunidade científica, provavelmente, devido a complexidade do assunto e as dificuldades logísticas envolvidas. Assim, o presente trabalho visa contribuir com o tema, a nível nacional e mundial.

### 1.3 Hipótese

Este trabalho baseia-se na hipótese de que o balanço sedimentar da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha é controlado principalmente pela ação do transporte de sedimentos induzido por ondas, tanto ao longo da costa (entre as praias do Mar de Dentro) quanto transversalmente à costa, com acentuado comportamento sazonal em função do regime de ventos e ondas atuante na região. O processo de erosão sazonal verificado nas praias sugere que o transporte sedimentar transversal à costa (*cross-shore*) possui relevância similar ou superior ao transporte longitudinal à costa (*longshore*). Assim, as trocas de material sedimentar com a plataforma continental são um fator secundário.

### 1.4 Objetivos

Tendo em vista a grande importância e complexidade ambiental do Arquipélago de Fernando de Noronha, a tese tem como objetivo principal avaliar a dinâmica costeira das praias arenosas da porção setentrional do arquipélago (Mar de Dentro), a fim de caracterizar e compreender o transporte e o dinâmica sedimentar da região. Para tanto, serão avaliados tanto os fatores ambientais (maré, ondas, correntes e transporte *longshore* e *cross-shore*), considerando sua variabilidade temporal e espacial e identificando a importância de cada componente nas alterações morfológicas do sistema praias.

Os objetivos específicos são:

- Caracterizar a hidrodinâmica (correntes e ondas) e o transporte de sedimentos nas praias setentrionais do arquipélago;

- Avaliar a importância relativa e a sazonalidade do transporte sedimentar transversal (*cross-shore*) e longitudinal à costa (*longshore*) em função do regime de maré, ondas e correntes;
- Analisar a evolução morfológica do sistema praias em diferentes escalas temporais, com a finalidade de compreender os processos morfodinâmicos que atuam no fenômeno de erosão sazonal das praias;
- Integrar as informações para a melhor compreensão das alterações morfológicas ocorridas nas praias arenosas localizadas na porção setentrional do arquipélago.

### 1.5 Estrutura da tese

Seguindo este capítulo introdutório (**Capítulo 1**), é apresentada a área de estudo (**Capítulo 2**). A área de interesse (Arquipélago de Fernando de Noronha) é descrita em termos de seus aspectos oceanográficos e geomorfológicos, detalhando a sua porção setentrional, foco do trabalho. O **Capítulo 3** é o primeiro capítulo de resultados. O objetivo desse capítulo é avaliar o potencial de mobilização sedimentar pelas ondas, incluindo sedimentos bioclásticos e rodólitos, na plataforma insular do arquipélago. O conteúdo desse capítulo foi publicado no periódico *Continental Shelf Research* (AMBROSIO, B.G.; TAKASE, L.S.; STEIN, L.P.; COSTA, M.B.; SIEGLE, E., 2022. Wave-induced sediment and rhodolith mobility on a narrow insular shelf dominated by wave variability (Fernando de Noronha Archipelago, Brazil). *Continental Shelf Research*, 235: 104662. DOI: 10.1016/j.csr.2022.104662). Na sequência, o **Capítulo 4** aborda a variação sazonal e interanual da linha de costa, através de sensoriamento remoto, e a relaciona à ação das ondas, modeladas para as praias de interesse. O último capítulo de resultados (**Capítulo 5**) apresenta a aplicação do modelo numérico morfodinâmico para a simulação da variabilidade morfológica das praias em relação ao clima de ondas, considerando as escalas temporais de evento e mensal. Finalmente, o **Capítulo 6** apresenta as conclusões gerais da tese, com uma discussão integrada dos resultados obtidos, incluindo as limitações desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Cabe salientar que o desenvolvimento da presente pesquisa ocorreu em meio a pandemia de COVID-19 e apresentou diversos desafios para que fossem alcançados os resultados esperados. As restrições impostas pela pandemia inviabilizaram as expedições de campo previamente planejadas para a coleta de dados, impondo a necessidade de buscar outras fontes de dados e de adaptar os objetivos da pesquisa a estas.

## Capítulo 2 Área de estudo

O Arquipélago de Fernando de Noronha, localizado no Oceano Atlântico Sul Equatorial, entre as latitudes de 3° 48' S e 3° 53' S e longitudes de 32° 22' W e 32° 29' W, em uma região com profundidades de aproximadamente 4.000 m. Este é um distrito do Estado de Pernambuco, distando 545 km na direção nordeste da cidade do Recife (PE), e é formado por um conjunto de 21 ilhas, ilhotas e rochedos, abrangendo uma área total 26 km<sup>2</sup>. A ilha principal, que leva o nome do arquipélago, representa aproximadamente 90% de seu território e é a única habitada. A Ilha de Fernando de Noronha possui 10 km de comprimento, 3,5 km de largura, 60 km de perímetro e 17 km<sup>2</sup> de área emersa (WILDNER; FERREIRA, 2012). É cercado por uma plataforma insular relativamente rasa e estreita, limitada em torno da isóbata de 60 m (Figura 2.1b, d).

A origem do arquipélago está relacionada a erupções vulcânicas sucessivas, ocorridas devido ao afastamento das placas tectônicas Sul-Americana e Africana, que originaram o Oceano Atlântico. Essas erupções se deram pela passagem da placa Sul-Americana por um ponto quente (*hot spot*), que são colunas superaquecidas do interior da Terra, responsáveis por expelir grandes quantidades de magma (TEIXEIRA et al., 2003).

A estrutura geológica do Arquipélago de Fernando de Noronha é constituída por três formações de rochas vulcânicas, denominadas da base para o topo: Formação Remédios, Formação Quixaba e Formação São José. De maneira geral, as rochas do arquipélago têm diferentes idades entre o Mioceno Médio e o Pleistoceno Inferior, segundo a nova Escala de Tempo Geológico da *International Commission on Stratigraphy*, e constitui-se de um substrato de rochas piroclásticas, intrudidas por uma grande variedade de rochas alcalinas subsaturadas que, após prolongado hiato, foram recobertas por derrames de rochas básico-ultrabásicas nefelínicas (ankaratritos) e seus depósitos piroclásticos. Além das rochas vulcânicas são encontradas rochas sedimentares originadas pela erosão do edifício vulcânico. Em algumas áreas ocorrem depósitos sedimentares litorâneos, marinhos e eólicos, posteriores aos processos vulcânicos (ALMEIDA, 1955; WILDNER e FERREIRA, 2012).

O sedimento que constitui as praias de Fernando de Noronha provém principalmente do interior da própria ilha, através do intemperismo e dissecação das unidades estratigráficas que compõem as Formações Remédios, Quixaba e São José, e dos depósitos quaternários constituídos por eólianitos, aluviões e sedimentos flúvio-lacustres. A contribuição da plataforma continental estreita é reduzida e deve-se principalmente a ação das ondas sobre os recifes algálicos e de corais (CASTRO, 2010). Os leitos de rodolitos também ocorrem em torno desta plataforma insular entre

10 e 100 m de profundidade, representando o habitat principal do arquipélago (AMADO-FILHO et al., 2012; MATHEUS et al., 2019; PEREIRA-FILHO et al., 2015; SANTOS et al., 2016) (Figura 2.1b).

A zona costeira da Ilha de Fernando de Noronha é basicamente constituída por franjas de abrasão marinha, formando falésias ou estreitas praias de seixos e calhaus retrabalhados. Contudo, cerca de um terço desse litoral é orlado por praias arenosas, de natureza essencialmente bioclástica, as quais concentram-se principalmente na porção setentrional da ilha principal (Figura 2.1c). A costa meridional do arquipélago, varrida por ventos de sudeste, é marcada por falésias e praias em leitos de cascalho (MANSO et al., 2011). O diâmetro médio dos sedimentos presentes na zona costeira varia de areia muito fina a cascalho (BARCELLOS et al., 2018) (Figura 2.1b). Nas praias Baía do Sancho, Cacimba do Padre, Boldró e Conceição, os sedimentos são formados predominantemente por fragmentos de conchas e algas. A granulometria predominante é a areia média, com exceção do setor nordeste da praia do Boldró, onde predomina a areia fina (MANSO et al., 2011).

O clima da região se caracteriza como tropical quente, com duas estações bem definidas: a seca (setembro a fevereiro) e a chuvosa, com precipitações ocasionais (março a agosto). A temperatura tem pouca variação ao longo do ano, mantendo uma média de 28°C, com amplitude térmica de 4°C. O índice pluviométrico médio é de 1.300 mm, chegando a atingir 2.000 mm no período chuvoso, enquanto na estação seca os valores ficam próximos a 500 mm, similares às regiões mais secas do semiárido nordestino. Os ventos predominantes são os alísios (direção sudeste), que sopram a maior parte do ano, contribuindo com uma sensação térmica agradável, principalmente entre os meses de junho a agosto. A exceção é no período de janeiro a março, onde as máximas de temperatura estão associadas a pouca ventilação observada nessa época (WILDNER e FERREIRA, 2012).

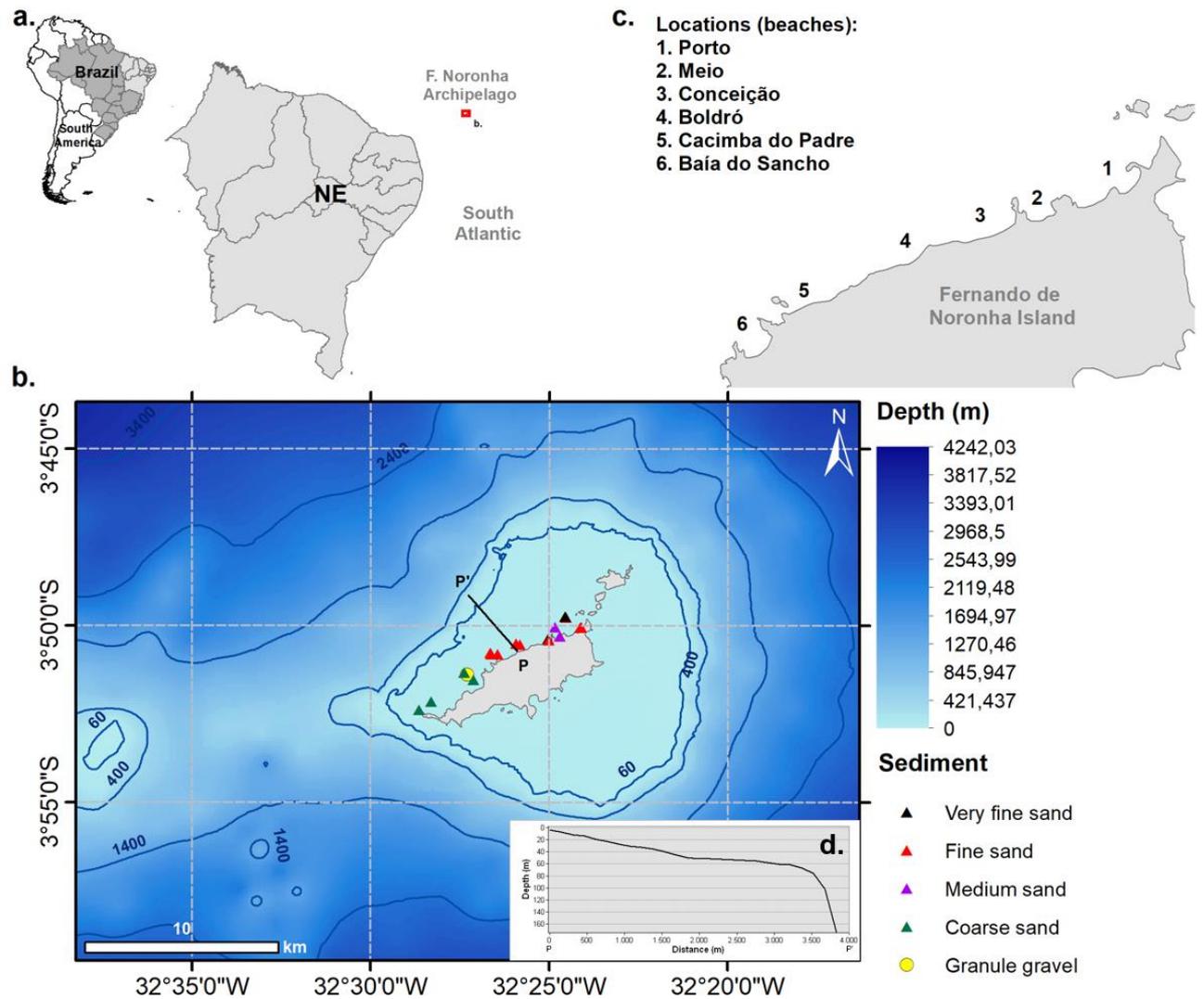
De acordo com Costa (2016), o clima de ondas ao largo das ilhas oceânicas Atol das Rocas e Fernando de Noronha é dominado por vagas formadas pelos ventos alísios de sudeste e por *swells* gerados por ciclones extratropicais em latitudes médias de ambos os hemisférios. As vagas de sudeste, controladas pela Zona de Convergência Intertropical, persistem ao longo do ano com alturas significativas entre 2,0 m e 2,5 m e períodos se pico entre 8 s e 10 s. Este campo de ondas sobrepõe-se ao *swell* de norte e noroeste durante os meses outubro a abril e ao *swell* de sul nos meses de maio a setembro, sendo esses dois campos caracterizados por ondas de períodos mais longos, predominantemente entre 12 s e 14 s, e com alturas de 2,0 m a 2,5 m. Esses três campos principais de ondas (vagas de sudeste, *swell* de norte e *swell* de sul) podem ocorrer simultaneamente ao longo do ano, especialmente nos meses de abril e outubro. De modo

geral, a região oceânica em questão apresenta um clima ameno de ondas ao longo do ano, devido sua posição geográfica na borda oeste do Oceano Atlântico Sul, próxima a linha do Equador e fora da rota dos ciclones tropicais. Assim, os eventos extremos são dependentes da intensidade dos *swells*, gerados em ambos os hemisférios, e do processo de dissipação de energia dessas ondas ao incidir em águas rasas.

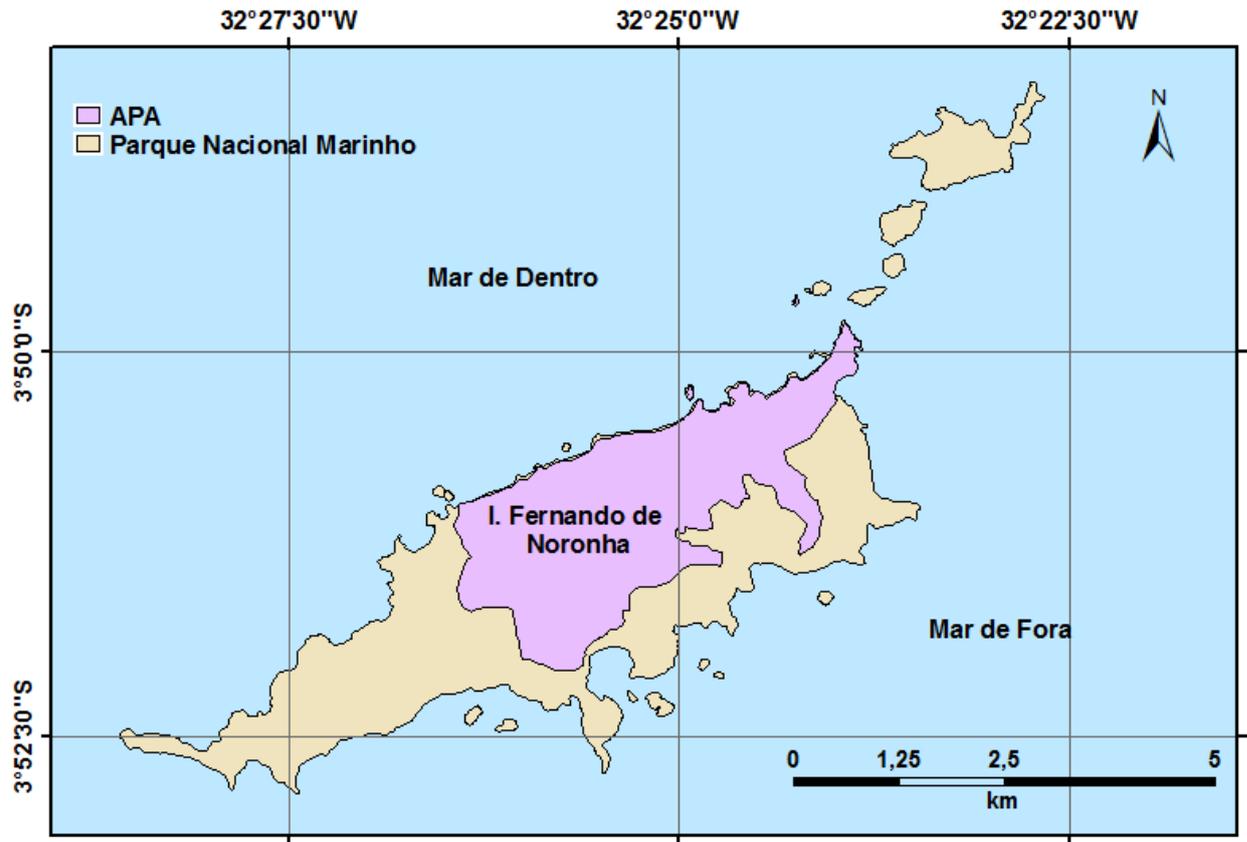
A região está submetida a um regime de mesomaré, com amplitudes médias de 2,6 m durante os períodos de sizígia e de 1,1 m em condições de quadratura (BARCELLOS et al., 2016). Além disso, sofre a ação da Corrente Sul Equatorial que influencia a distribuição das isothermas, com a indução de ressurgências que atingem a camada eufótica nas áreas dos bancos mais profundos (TRAVASSOS et al., 1999). A evaporação é normalmente maior que a precipitação pluviométrica, proporcionando altos valores de temperatura e salinidade superficiais, sendo a temperatura média 24°C com amplitude térmica de 4°C e a salinidade superior a 35,0‰, inibindo a convecção na coluna de água (BEZERRA JR., 1999 apud MMA, 2005).

A população fixa da Ilha de Fernando de Noronha concentra-se principalmente na Vila dos Remédios, no litoral norte da ilha. A pesca e o turismo são as principais atividades econômicas locais. A agricultura é limitada a pequenos cultivos de milho, feijão, mandioca e batata doce. Há rebanhos de bovinos, caprinos e suínos que atendem às necessidades locais, entretanto são inexpressivos em número (MARLIERE, 2006).

Devido a sua biodiversidade bastante peculiar e seu papel fundamental nos processos biológicos, como reprodução, dispersão e colonização da biota marinha, o Arquipélago de Fernando de Noronha foi reconhecido e tombado, em 2001, pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) como Sítio do Patrimônio Natural Mundial e abriga duas Unidades de Conservação Federais administradas pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio): a Área de Proteção Ambiental de Fernando de Noronha – Rocas – São Pedro e São Paulo e o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha, cujos limites emersos são representados na Figura 2.2.



**Figura 2.1** Área de estudo: a. localização do Arquipélago de Fernando de Noronha (Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil); b. contornos batimétricos na região do arquipélago, com a classificação granulométrica dos sedimentos costeiros obtida por Barcellos et al. (2018); c. localização de praias arenosas da porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha; d. perfil batimétrico.



**Figura 2.2** Arquipélago de Fernando de Noronha, com representação das áreas emersas destinadas à Área de Proteção Ambiental e ao Parque Nacional Marinho.

# Capítulo 3 Mobilidade de sedimentos e rodolitos induzida por ondas em uma plataforma insular estreita dominada pela variabilidade do clima de ondas

## 3.1 Apresentação do capítulo

Este capítulo combina a aplicação de modelagem numérica para a propagação de ondas oceânicas em direção a costa e equações empíricas de transporte de sedimentos para estimar o potencial de mobilidade sedimentar induzido por ondas (sedimentos bioclásticos e rodolitos) na plataforma insular de Fernando de Noronha. Foram incluídos cenários representativos do clima de ondas (anual, de verão e de inverno) e da incidência de ondas extremas. Além disso, são abordados a variabilidade sazonal do clima de ondas e da deriva potencial.

O conteúdo do presente capítulo, com adaptações, foi publicado no periódico *Continental Shelf Research* (Fator de Impacto JCR 2022: 2,3): AMBROSIO, B.G.; TAKASE, L.S.; STEIN, L.P.; COSTA, M.B.; SIEGLE, E., 2022. Wave-induced sediment and rhodolith mobility on a narrow insular shelf dominated by wave variability (Fernando de Noronha Archipelago, Brazil). *Continental Shelf Research*, 235: 104662. doi: 10.1016/j.csr.2022.104662.

## 3.2 Introdução

As ilhas oceânicas são porções de terra rodeadas por água e inseridas no fundo oceânico, portanto, fora dos limites das plataformas continentais. A maioria dessas ilhas tem sua origem relacionada a processos tectônicos e atividade vulcânica intraplaca (FLOYD, 1991; ALMEIDA, 2006). Embora sejam pouco expressivas em área, ocupando apenas uma pequena porção da superfície terrestre, possuem grande relevância ambiental devido à sua biodiversidade com alto grau de endemismo, o que as torna mais suscetíveis as rápidas mudanças externas relacionadas à interferência humana (CRONK, 1997; PIMM, 1996; KIER et al., 2009).

O isolamento geográfico e a gênese das ilhas oceânicas atribuem a estes ambientes características muito peculiares em termos de processos oceanográficos e geomorfológicos.

Situadas distantes da influência continental, as ilhas oceânicas estão expostas às condições *offshore* de vento, correntes, marés e ondas. Essas forças oceânicas atuam nas plataformas insulares que circundam as ilhas, que geralmente são rasas e estreitas. As fontes sedimentares para estas ilhas são reduzidas, já que quase não há aportes externos, e o sedimento é essencialmente formado por clastos resultantes da erosão das rochas expostas e, principalmente, por bioclastos marinhos (HARNEY et al., 2000; HARNEY e FLETCHER, 2003; MANSO et al., 2011; BARCELLOS et al., 2018). Portanto, o balanço de areia em uma plataforma insular depende do equilíbrio de fatores que inclui produção, armazenamento temporário e permanente e perdas por abrasão, dissolução, bioerosão e transporte *offshore* (HARNEY e FLETCHER, 2003; CONGER et al., 2009). Todos esses aspectos contribuem para que as ilhas oceânicas sejam ambientes muito vulneráveis aos processos erosivos causados por ondas e tempestades de alta energia.

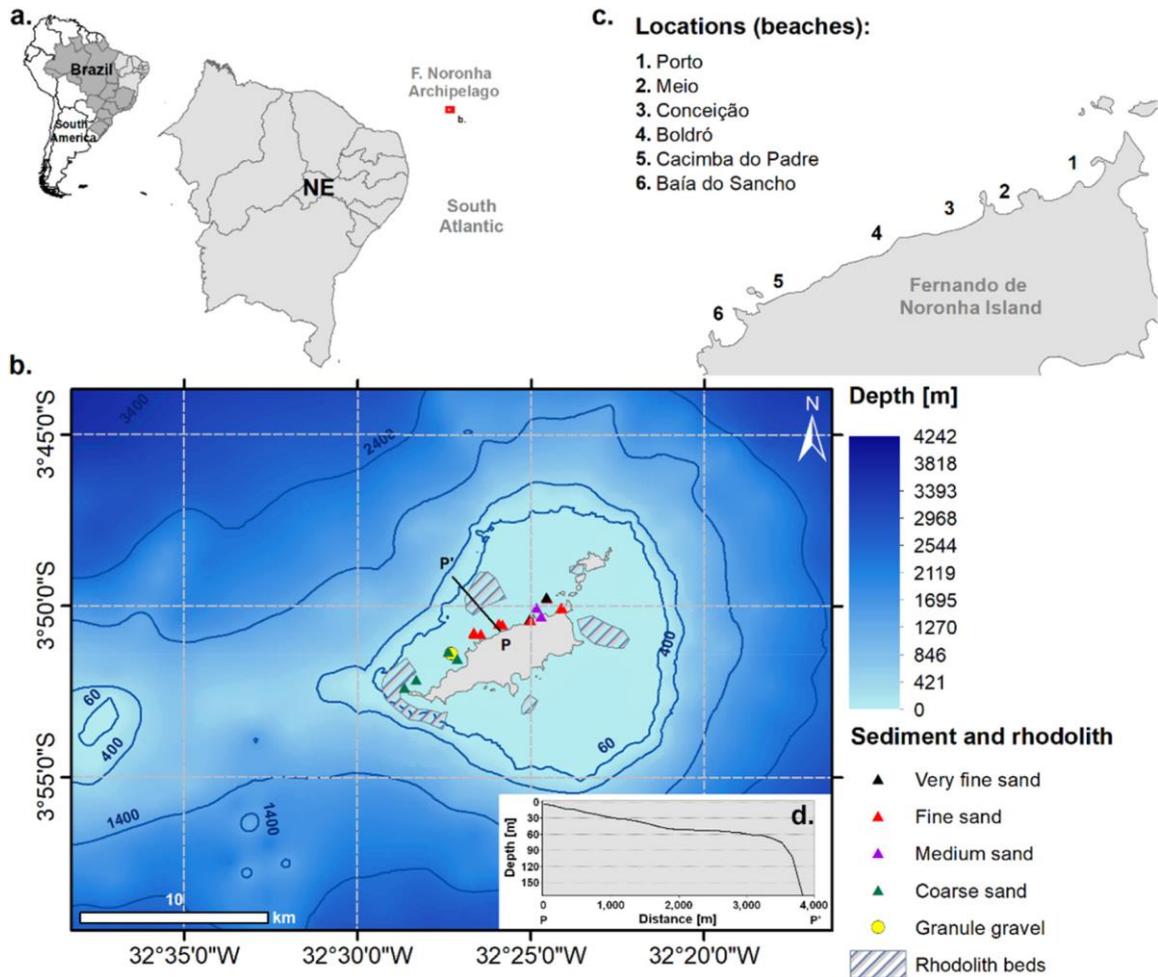
A energia das ondas impacta o espaço de acomodação e a abrasão mecânica na plataforma insular; além disso, também afeta a estabilidade da linha de costa e o transporte de areia próximo à costa (CONGER et al., 2009). Semelhante a outras ilhas oceânicas localizadas na região tropical (por exemplo, as ilhas do Havaí), o Arquipélago de Fernando de Noronha (nordeste do Brasil) está sujeito a um regime de ondas com alta variabilidade sazonal, marcado pela ocorrência de eventos energéticos relacionados à incidência de *swell*. Estes eventos de incidência de ondas energéticas são considerados responsáveis por alterar substancialmente a morfologia das praias arenosas e a posição da linha de costa em escala sazonal (VITOUSEK et al., 2007; MANSO et al., 2011). As areias marinhas costeiras podem desempenhar um papel importante na gestão de ambientes costeiros, como um recurso valioso para a restauração das praias, controlando a localização da linha de costa em costas arenosas (FLETCHER et al., 2008; BOCHICCHIO et al., 2009; CONGER et al., 2009). Além disso, alguns estudos sobre depósitos sedimentares arenosos, como depósitos de tempestade, têm sido realizados para entender a dinâmica sedimentar em diferentes escalas de tempo (TSUTSUI et al., 1987; MEIRELES et al., 2013). No entanto, pesquisas sobre os processos de transporte sedimentar e deposição sedimentar em plataformas insulares ainda são escassas.

Na maioria das plataformas continentais, as ondas e correntes energéticas são os processos dominantes de transporte de sedimentos (por exemplo, HARRIS e WIBERG, 2001; BUTMAN et al., 1979; DRAKE e CACCHIONE, 1985; WIBERG et al., 1994; WRIGHT et al., 1994; LI et al., 1997; CACCHIONE et al., 1999; LI et al., 2015, 2021). As ondas geradas pelo vento induzem movimentos orbitais através da coluna de água; quando a profundidade é menor que a metade do comprimento de onda, o movimento orbital se estende até o fundo,

mobilizando o sedimento do leito por tensões de cisalhamento de fundo induzidas pelo movimento das ondas (WIBERG e SHERWOOD, 2008). Muitos estudos sobre a mobilidade sedimentar induzida por ondas foram realizados em plataformas continentais (por exemplo, WRIGHT et al., 1999; PORTER-SMITH et al., 2004; GRIFFIN et al., 2008; STORLAZZI e REID, 2010; MORIARTY et al., 2014; OBERLE et al., 2014; COUGHLAN et al., 2021); no entanto, poucos estudos exploraram a mobilidade de sedimentos em plataformas insulares, especialmente no Brasil.

Os níveis de energia e os processos sedimentares induzidos por ondas desempenham um papel essencial na distribuição de habitats e organismos bentônicos (HEMER, 2006). Por exemplo, o desenvolvimento de leitos de rodolitos está diretamente relacionado à ação das ondas na plataforma. Os rodolitos requerem certa proteção contra a ação das ondas, para evitar o seu soterramento e a dispersão para áreas *offshore* sem luminosidade; no entanto, eles também precisam de níveis hidrodinâmicos suficientes para evitar que sejam sufocados com o lodo produzido (HALL-SPENCER, 1998). Eles podem se beneficiar das tensões de cisalhamento de fundo geradas pelas ondas, que podem eventualmente causar movimentos de arrasto e rolamento (HARRIS et al., 1996).

Neste contexto, o principal objetivo deste estudo é desenvolver uma melhor compreensão a respeito da ação das ondas e do transporte de sedimentos induzido por ondas em plataformas insulares estreitas, usando a modelagem numérica da propagação de ondas combinada com a aplicação de equações empíricas de transporte sedimentar. Assim, avaliamos aspectos importantes da ação das ondas ao redor do Arquipélago de Fernando de Noronha (PE) (Figura 3.1), como a energia das ondas e o transporte longitudinal ao longo das principais praias arenosas localizadas na porção setentrional da ilha principal, e o potencial de mobilidade sedimentar induzido pelas ondas em toda a plataforma insular. Ao incluir as variações de densidade dos grãos, também avaliamos a mobilidade potencial de rodolitos induzida por ondas sob condições extremas de ondas. Os resultados podem fornecer uma visão integrada sobre a ação das ondas e os processos sedimentares em plataformas insulares estreitas e altamente energéticas, e também podem apoiar estudos sobre estabilidade e manutenção da linha de costa e distribuições biológicas.



**Figura 3.1** Área de estudo: a. localização do Arquipélago de Fernando de Noronha (Pernambuco, nordeste do Brasil); b. batimetria da região do arquipélago com a classificação granulométrica dos sedimentos costeiros obtida por Barcellos et al. (2018) e algumas localizações de rodolitos mapeados (adaptado de Santos et al. (2016)); c. localização de praias arenosas da porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha; e d. perfil batimétrico ao longo de P – P'.

### 3.3 Métodos

#### 3.3.1. Parâmetros de onda

Os parâmetros de ondas oceânicas (altura significativa, período de pico e direção média) foram obtidos a partir do modelo global de ondas WAVEWATCH III (WW3), desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). O modelo empregado apresenta resolução horizontal de  $0,5^\circ$  e resolução temporal de 3 h, e considera os processos de crescimento, refração e decaimento para cada frequência específica do espectro de ondas (TOLMAN, 1999). Portanto, informações de ondas de 1979 a 2018 foram extraídas para as coordenadas Lat.  $3^\circ30'S$  e Long.  $32^\circ30'W$ , e

utilizadas para caracterizar o clima das ondas e definir os cenários de ondas através de análises estatísticas básicas.

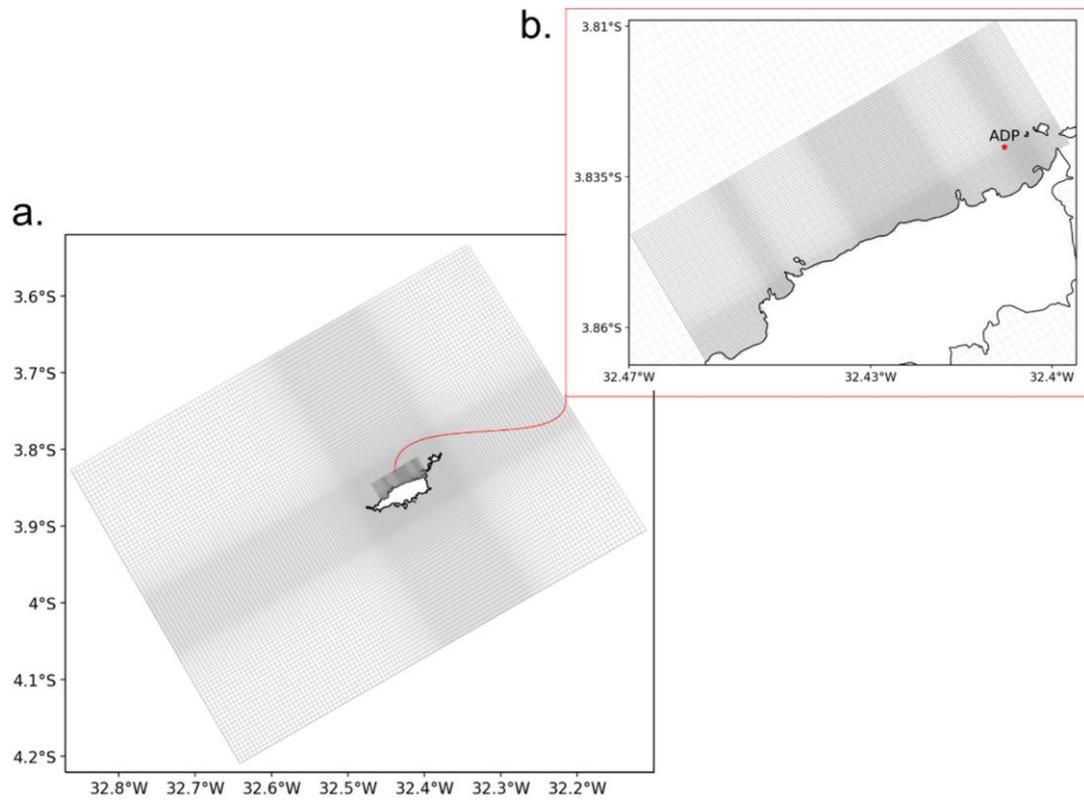
### 3.3.2. Modelagem numérica

Para simular a propagação de ondas em direção à costa, foi aplicado o modelo numérico Delft3D (módulo Delft3D-WAVE), desenvolvido pela Deltares. Este modelo descreve a geração, o crescimento, o decaimento e a transformação de ondas gravitacionais geradas pelo vento em águas oceânicas e costeiras (DELTAIRES, 2014). O Delft3D-WAVE inclui o modelo espectral de ondas de terceira geração *Simulation Waves Nearshore* (SWAN), desenvolvido pela *Delft University of Technology* (HOLTHUIJSEN et al., 1993; BOOIJ et al., 1999; RIS et al., 1999).

O domínio do modelo compreende uma grande extensão oceânica em torno do Arquipélago de Fernando de Noronha, incluindo toda a plataforma insular até profundidades de aproximadamente 4.000 m. Para compor o domínio do modelo, foi utilizada a posição da linha de costa obtida por meio de imagens de satélite e um conjunto de dados batimétricos que inclui: a) levantamento aéreo a laser do fundo marinho realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e b) cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Todas as informações geoespaciais foram georreferenciadas ao *datum* WGS-84 no sistema de coordenadas geográficas.

Para representar com maior detalhe a ação das ondas na zona costeira ao redor do arquipélago e ao longo das praias da porção setentrional, sem um gradiente de resolução abrupto, o domínio do modelo foi decomposto em duas grades computacionais estruturadas (Figura 3.2) com resolução variável: uma grade regional incluindo toda a plataforma insular (tamanho das células variando de 650 a 150 m) e uma grade local e mais refinada cobrindo as praias da porção setentrional da ilha principal (tamanho das células variando de 50 a 18 m). Desse modo, os dados batimétricos foram interpolados ao longo dos elementos de grade usando o método da triangulação.

Para forçar o modelo, os cenários de ondas foram definidos a partir da análise dos climas de ondas anual, de verão e de inverno. Os parâmetros de ondas com frequência de ocorrência igual ou superior a 5% foram utilizados para elaborar os casos de ondas mais frequentes, totalizando 8 cenários anuais (Tabela 3.1), 9 cenários de verão (Tabela 3.2) e 6 cenários de inverno (Tabela 3.3). Adicionalmente, foram simulados 4 cenários de ondas extremas (Tabela 3.4), utilizando os parâmetros de onda que caracterizam a onda mais energética observada em cada direção de interesse.



**Figura 3.2** a. Representação do domínio do modelo com os elementos das grades computacionais; e b. detalhe da variabilidade da resolução horizontal, indicando a localização do ADP.

**Tabela 3.1** Parâmetros de onda usados em cada cenário anual.

Cenário	Anual			
	Altura [m]	Período [s]	Direção [°]	Ocorrência [%]
1	2,04	11,13	348,92	5,89
2	2,15	12,96	349,20	6,63
3	2,09	11,18	178,55	5,22
4	2,22	12,94	185,14	6,95
5	1,99	7,52	100,53	7,50
6	2,10	8,53	96,99	6,56
7	2,06	7,55	121,41	9,13
8	2,21	8,76	126,91	20,59

**Tabela 3.2** Parâmetros de onda usados em cada cenário de verão.

Verão				
Cenário	Altura [m]	Período [s]	Direção [°]	Ocorrência [%]
1	1,93	9,39	13,66	5,23
2	2,08	11,04	348,37	12,71
3	2,15	12,99	348,40	11,14
4	2,27	14,84	349,71	7,73
5	2,00	8,81	42,30	6,74
6	1,97	7,45	97,45	10,94
7	2,08	8,46	90,91	5,39
8	1,96	11,43	325,98	5,40
9	2,14	12,93	327,06	10,19

**Tabela 3.3** Parâmetros de onda usados em cada cenário de inverno.

Inverno				
Cenário	Altura [m]	Período [s]	Direção [°]	Ocorrência [%]
1	2,06	7,60	123,66	15,27
2	2,24	8,78	128,14	47,86
3	2,51	10,57	138,19	6,06
4	2,16	11,20	176,85	6,46
5	2,29	12,97	184,43	9,99
6	2,37	14,81	187,11	5,83

**Tabela 3.4** Parâmetros de onda usados em cada cenário extremo.

Ondas extremas			
Cenário	Altura [m]	Período [s]	Direção [°]
1	3,78	15,43	183,51
2	3,74	11,43	136,74
3	4,14	16,15	355,97
4	3,64	16,14	335,92

### 3.3.3. Dados medidos e validação do modelo

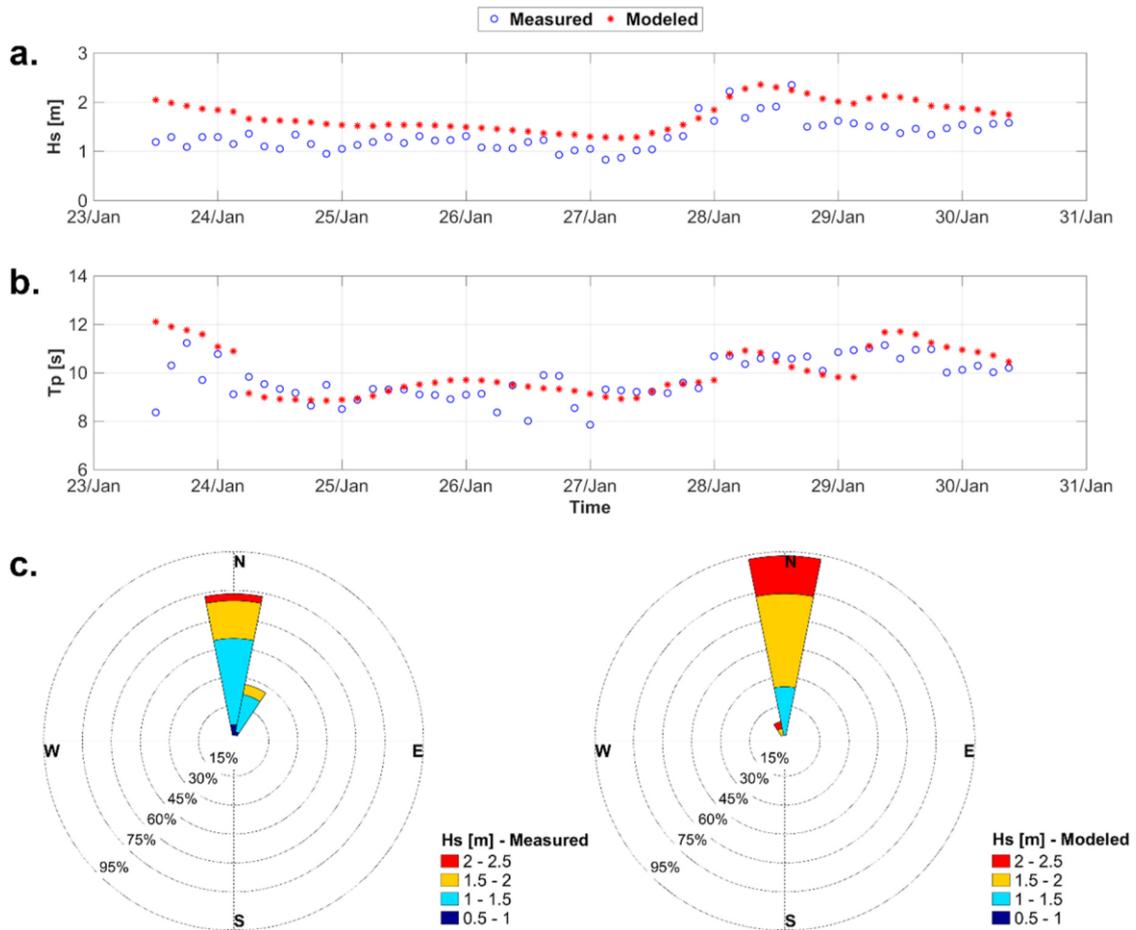
Dados de ondas foram adquiridos com um *Acoustic Doppler Profiler* (ADP) Nortek *Aquadopp* de 1 MHz fundeado na coordenada Lat. 3°49,804'S e Lon. 32°24,471'W (profundidade média de 24 m) nas proximidades da Praia do Porto (Figura 3.2). As medições compreendem o período de 23 a 30 de janeiro de 2014. Para avaliar o desempenho do modelo de ondas, os dados medidos *in situ* foram comparados aos resultados do modelo usando os parâmetros estatísticos Coeficiente de Correlação de Pearson (R), *Index of Agreement* (IOA) (WILLMOTT e WICKS, 1980) e *Relative Mean Absolute Error* (RMAE) (WALSTRA et al., 2001). Segundo Willmott e Wicks (1980), valores de IOA superiores a 0,5 indicam que a modelagem apresenta uma redução

significativa de erros. Os resultados do modelo também podem ser qualificados de acordo com a classificação proposta por Walstra et al. (2001) (Tabela 3.5):

**Tabela 3.5** Classificação do modelo, proposta por Walstra et al. (2001), de acordo com os valores de *Relative Mean Absolute Error* (RMAE).

RMAE	Classificação
<b>RMAE &lt; 0,2</b>	Excelente
<b>0,2 &lt; RMAE &lt; 0,4</b>	Bom
<b>0,4 &lt; RMAE &lt; 0,7</b>	Razoável
<b>0,7 &lt; RMAE &lt; 1,0</b>	Pobre
<b>RMAE &gt; 1,0</b>	Ruim

A comparação estatística entre as séries temporais de curto prazo das ondas medidas e modeladas mostra que o modelo implementado representou adequadamente os parâmetros de onda na maior parte do período analisado (Figura 3.3), embora observemos uma superestimação das alturas significativas. Os parâmetros estatísticos calculados podem ser observados na Tabela 3.6. Os valores de R e IOA superiores a 0,5 indicam bom desempenho do modelo. De acordo com os valores de RMAE, o modelo foi qualificado como Bom para representar a altura significativa e Excelente para representar o período de pico (WALSTRA et al., 2001). A direção média das ondas modeladas também apresentou boa correspondência com as ondas medidas. Algumas diferenças entre as medições e os resultados do modelo são esperadas, visto que o modelo de alta resolução aplicado neste estudo foi forçado com resultados do modelo global WAVEWATCH III e que existem limitações intrínsecas à modelagem numérica. No entanto, o padrão geral é razoavelmente bem reproduzido pelo modelo implementado.



**Figura 3.3** Comparação entre os parâmetros de onda medidos (azul) e modelados (vermelho) para o período de 23 a 30 de janeiro de 2014: a. alturas significativa (Hs); b. período de pico (Tp); c. direção média das ondas.

**Tabela 3.6** Parâmetros estatísticos calculados comparando os parâmetros de onda medidos e modelados.

Parâmetro	R	IOA	RMAE
Altura significativa	0,76	0,64	0,31
Período de pico	0,59	0,75	0,06

### 3.3.4. Ação das ondas e mobilidade sedimentar

Para avaliar mais detalhadamente a ação das ondas que atingem as praias arenosas, avaliou-se a energia das ondas e o transporte ao longo da costa na parte setentrional da ilha estudada, onde se concentram as praias arenosas.

A força de onda ( $P$ ) foi calculada até a isóbata de aproximadamente 20 m, de acordo com a teoria linear de onda exposta em Holthuijsen (2007) e estimada em função da altura significativa ( $H_s$ ) e do período de pico ( $T_p$ ) de onda a partir da Equação (3.1):

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_p}{32\pi} \text{ [W/m]} \quad (3.1)$$

A deriva litorânea potencial (D) foi estimada a partir da Equação (3.2), que considera que a energia de onda é proporcional ao quadrado de sua altura (DAVIES, 1980) e que a intensidade da deriva litorânea costeira é proporcional ao ângulo com o qual a frente de onda se aproxima da costa (ZENKOVICH, 1967; KOMAR, 1998):

$$D = H^2 \cos \alpha \sin \alpha \quad (3.2)$$

onde D a intensidade adimensional do transporte longitudinal à costa por unidade de área,  $\alpha$  é o ângulo de incidência de onda ortogonal a linha de costa (calculado a partir da diferença entre o ângulo de incidência das ondas e o ângulo de orientação da costa ajustado ao norte geográfico) e H é a altura de onda que foi extraída dos resultados do modelo ao longo da isóbata de 5 m.

A mobilidade sedimentar induzida pelas ondas ao redor da Ilha de Fernando de Noronha foi estimada comparando-se as velocidades máximas de fundo devido ao movimento orbital das ondas e a velocidade crítica de fundo necessária para transportar um tipo específico de grão. A velocidade orbital de fundo ( $U_{bot}$ ) foi calculada pelo modelo SWAN (Delft3D-WAVE) a partir das Equações (3.3) e (3.4), conforme Deltares (2014):

$$U_{bot} = \sqrt{2U_{rms}} \quad (3.3)$$

$$U_{rms}^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{\sinh^2(kg)} E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta \quad (3.4)$$

onde E ( $\sigma$ ,  $\theta$ ) é o espectro de densidade de energia,  $\sigma$  é a frequência relativa,  $\theta$  é a direção da onda de cada componente espectral, k é o número de onda, g é a aceleração da gravidade e h é a profundidade local.

A velocidade crítica ( $U_{wcr}$ ) foi calculada a partir das Equações (3.5) e (3.6), deduzidas de Komar e Miller (1973):

$$U_{wcr} = [0.118(\rho^S/\rho - 1)]^{2/3} (g^2 D T)^{1/3} \quad \text{para } D < 0,05 \text{ cm (fluxo laminar)} \quad (3.5)$$

$$U_{wcr} = [1.085(\rho^S/\rho - 1)]^{4/7} (g^4 D^3 T)^{1/7} \quad \text{para } D > 0,05 \text{ cm (fluxo turbulento)} \quad (3.6)$$

onde  $\rho^S$  é a densidade do sedimento,  $\rho$  é a densidade da água do mar ( $1.025 \text{ g.cm}^{-3}$ ), D é o diâmetro do grão e T é o período de onda.

Foram considerados quatro diâmetros de grão (0,0125 cm - areia fina, 0,0250 cm - areia média, 0,05 cm - areia grossa e 0,4 cm - cascalho) para grãos carbonáticos com densidade média de  $\rho^S = 2,83 \text{ g.cm}^{-3}$ , tendo como base os cálculos de densidade média de grãos realizados por Nichols (2009). Além disso, dada a ocorrência de campos de rodolitos na região, também calculamos as taxas de mobilidade dos rodolitos, considerando uma distribuição uniforme na plataforma de Fernando de Noronha, com tamanhos de aproximadamente 3 cm e 6 cm (AMADO-FILHO et al., 2012) e densidade média de  $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$  (ÁVILA e RIOSMENA-RODRIGUEZ,

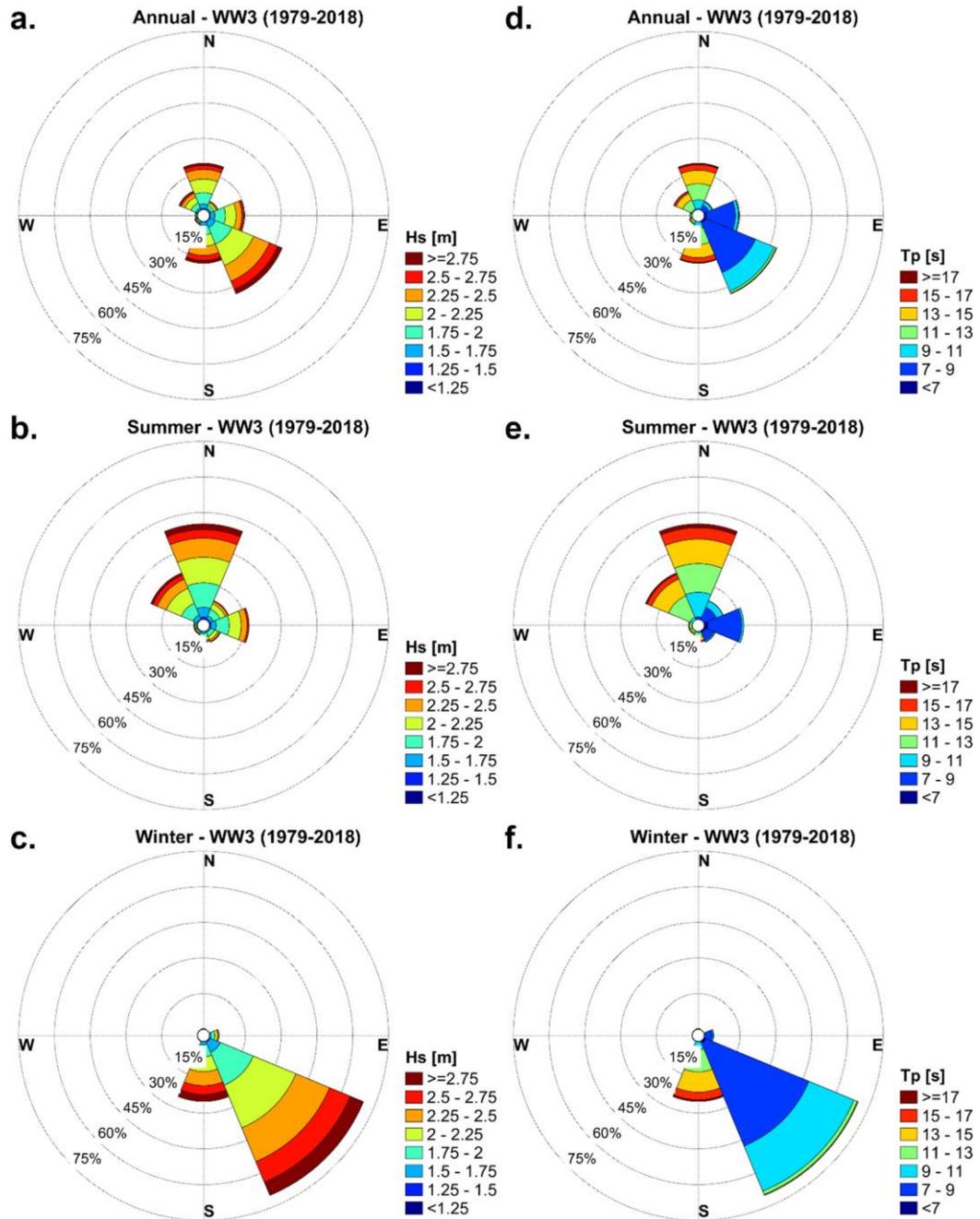
2011). Como não há estudo sobre a densidade de rodolitos para esta região, adotamos um valor médio da faixa de densidades determinada por Ávila e Riosmena-Rodriguez (2011) para campos de rodolitos na Bahia Magdalena (México), devido a algumas semelhanças no grupo de espécies encontradas. Assim, a porcentagem de tempo em que as velocidades orbitais máximas excederam as velocidades críticas foi calculada relativamente à frequência de ocorrência de cada cenário de onda.

### 3.4 Resultados e discussão

#### 3.4.1. Clima de ondas

O clima de ondas anual da região do Arquipélago de Fernando de Noronha (Figura 3.4a, d) é caracterizado por ondas locais (vagas ou *sea*) provenientes predominantemente de leste-sudeste (23,23%) e sudeste (15,36%), refletindo a ação constante dos ventos alísios de sudeste na superfície do Oceano Atlântico Equatorial. As alturas significativas mais frequentes estão no intervalo de 2,0 a 2,5 m (49,45%) e os períodos de pico mais frequentes estão entre 8 e 10 s (32,31%).

Secundariamente às ondas locais geradas pelos ventos alísios, ocorrem ondas do tipo *swell* (marulhos) provenientes dos quadrantes norte e sul, que refletem a influência de eventos de tempestades nos hemisférios norte e sul, respectivamente. Além de serem geradas em áreas distantes, as ondas do tipo *swell* têm forma mais regular e períodos maiores que as ondas locais (superiores a 10 s). Esses eventos de alta energia marcados pela incidência de *swell* são evidenciados nos histogramas direcionais de ondas referentes ao verão (Figura 3.4b, e) e ao inverno (Figura 3.4c, f) do hemisfério sul. As condições de verão são caracterizadas, predominantemente, por ondas do quadrante norte, incluindo a expressiva incidência de *swells* de norte. Por outro lado, no inverno ocorre o predomínio de ondas de sudeste acompanhadas pela incidência de *swells* de sul. Durante os meses em que os ventos alísios de sudeste se intensificam (meses de inverno e primavera), o que está relacionado ao deslocamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para sul, há maior ocorrência de ondas locais vindas de sudeste. Portanto, a sazonalidade do regime de ondas no Arquipélago de Fernando de Noronha está intimamente ligada a duas características principais do sistema atmosférico regional: a dinâmica da ZCIT (BECKER, 2001; MELO et al., 2002; RAO et al., 1993) e a ação de ciclones extratropicais nas latitudes médias de ambos os hemisférios (INNOCENTINI et al., 2005).



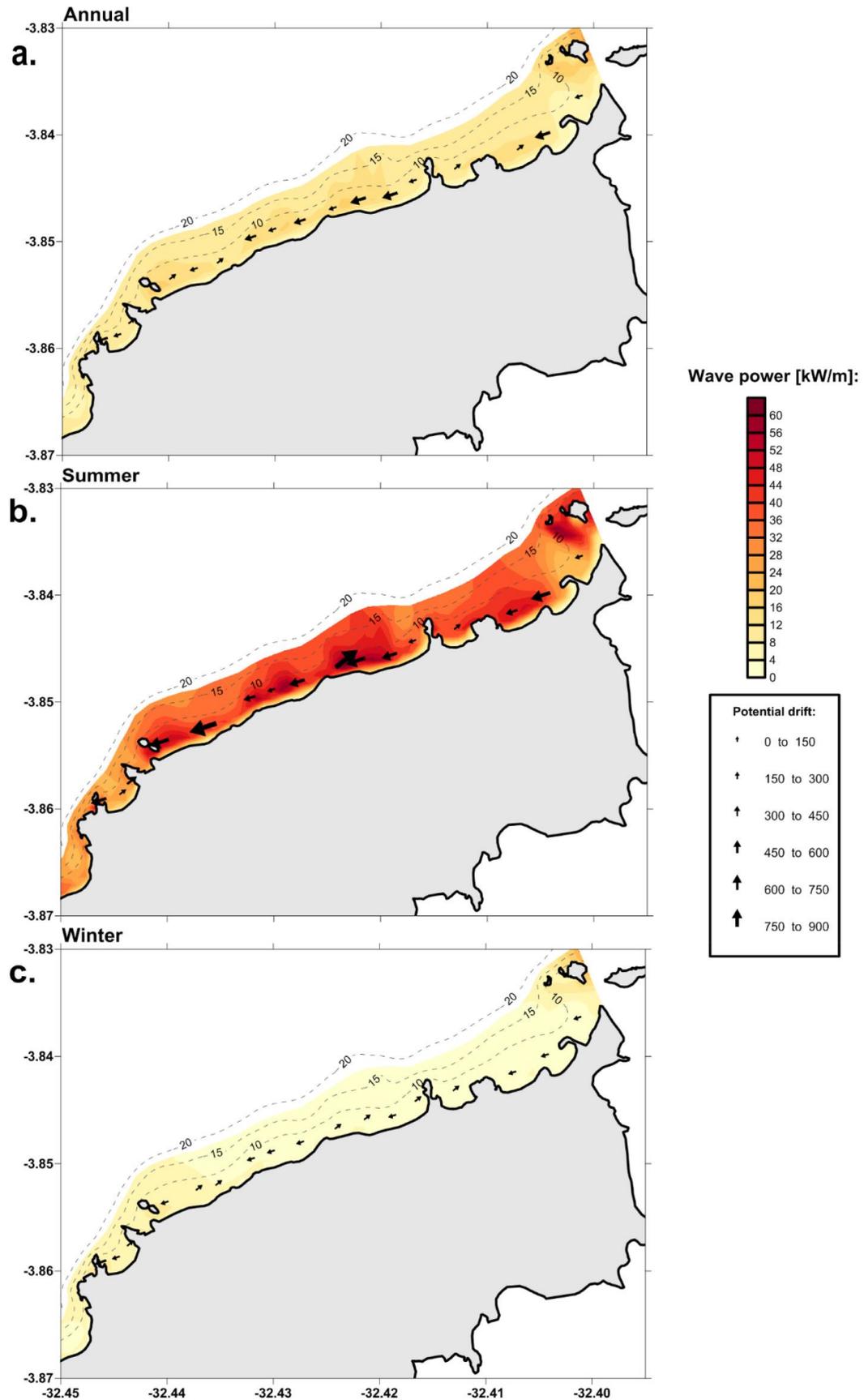
**Figura 3.4** Histogramas direcionais de altura significativa de onda (Hs) (a. anual; b. verão; e c. inverno) e de período de pico de onda (Tp) (d. anual; e. verão; e f. inverno), representando as ondas do período 1979-2018.

### 3.4.2. Força de onda e transporte longitudinal na porção setentrional da ilha

A Figura 3.5 mostra a distribuição da força de onda e da deriva potencial ao longo da costa norte da Ilha de Fernando de Noronha, resultante da ação dos climas de ondas anual (Figura 3.5a), de verão (Figura 3.5b) e de inverno (Figura 3.5c). É possível analisar os impactos da variabilidade sazonal do clima de ondas nos níveis de energia das ondas que atingem a costa e na intensidade (adimensional) e direção da deriva longitudinal.

Os cenários anuais e de inverno são dominados pela incidência de ondas de sudeste geradas pelos ventos alísios, que ocorrem durante o ano todo e se intensificam nos meses de inverno e primavera. A predominância de ondas provenientes da direção sudeste e a orientação principal da costa (voltada para noroeste) explicam os menores níveis de energia das ondas resultantes dos cenários anuais e de inverno. Além disso, os meses de inverno também são marcados pela incidência de *swells* de sul, que não atingem a porção norte da ilha. No entanto, os cenários anuais incluem a incidência de *swells* de norte, sendo assim responsáveis pelo aumento da potência das ondas face às condições de inverno. Assim, os meses de inverno são caracterizados por menor energia das ondas na costa setentrional da ilha, com valores máximos em torno de 28 kW/m. Por outro lado, os cenários de verão incluem a incidência expressiva de *swells* do quadrante norte, aos quais esta porção da ilha está mais exposta, conseqüentemente, observa-se o aumento considerável da energia das ondas na costa, com valores máximos de cerca de 62 kW/m. No que se refere à distribuição da energia das ondas ao longo da costa norte, os resultados indicam maior energia nas praias Conceição, Boldró e Cacimba do Padre devido à maior exposição dessas praias aos *swells* de norte e noroeste. Por outro lado, menor energia das ondas é observada na Baía do Sancho, que está protegida entre promontórios rochosos e menos exposta às ondas mais energéticas vindas de norte. Estes resultados corroboram com a pesquisa sobre morfodinâmica costeira realizada por Manso et al. (2011), que indica erosão dos perfis praias durante os meses de verão e maior mobilidade das praias Cacimba do Padre e Conceição.

A deriva potencial tem a mesma variabilidade sazonal que a força de onda, com intensificação das correntes longitudinais nos meses de verão (19 a 884) e menores valores nos meses de inverno (0,30 a 213). A condição anual foi representada por magnitudes semelhantes às verificadas no inverno, com algum aumento devido aos cenários de incidência de *swells* de norte, variando de 3 a 339. A variação da intensidade da deriva potencial ao longo da costa não coincide exatamente com a distribuição da energia das ondas, pois essa variação depende principalmente do ângulo formado pela onda incidente e a costa, atingindo valores maiores quando esse ângulo é de aproximadamente 45 graus (KOMAR, 1998; LONGUET-HIGGINS, 1970; SIEGLE e ASP, 2007). Em relação à direção da deriva potencial na costa setentrional, observamos que a direção preferencial é para sudoeste, indicando a maior influência das ondas refratadas incidentes nas direções norte e nordeste, uma vez que as ondas de noroeste incidem quase perpendicularmente à costa, gerando menor deriva litorânea. A direção preferencial da deriva obtida neste estudo coincide com os resultados do modelo qualitativo de circulação costeira, baseado nas características sedimentares, proposto por Barcellos et al. (2018).



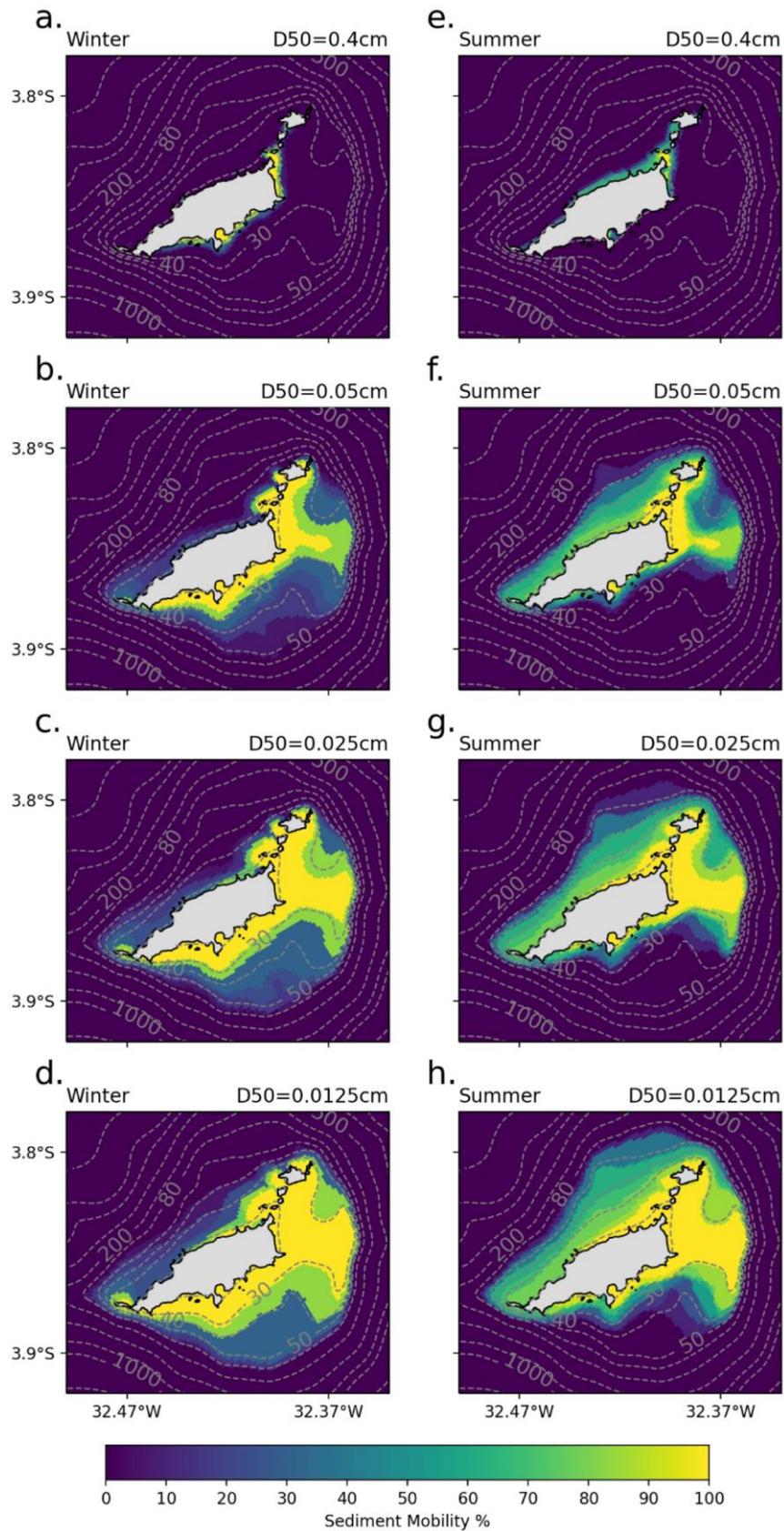
**Figura 3.5** Distribuição da força de onda próximo à costa (cores) e vetores de deriva longitudinal potencial (setas) nas praias arenosas localizadas na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha; a. anual; b. verão; e c. inverno. As linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos.

### 3.4.3. Mobilidade de sedimentos bioclásticos induzida por ondas

A Figura 3.6 mostra a mobilidade sedimentar induzida por ondas na plataforma insular de Fernando de Noronha durante o inverno (esquerda) e o verão (direita), considerando sedimentos bioclásticos ( $\rho_s = 2,83 \text{ g.cm}^{-3}$ ) com granulometria de 0,4 cm (cascalho) (Figura 3.6a, e), 0,05 cm (areia grossa) (Figura 3.6b, f), 0,0250 cm (areia média) (Figura 3.6c, g) e 0,0125 cm (areia fina) (Figura 3.6d, h). É importante ressaltar que a mobilidade sedimentar resultante dos cenários anuais foi omitida dos resultados, pois a ação das ondas resultante dos cenários anuais é bastante semelhante à dos cenários de inverno devido às semelhanças nas características dos climas de ondas e na composição dos cenários, conforme verificado na seção 3.4.2.

Pode ser observado um aumento expressivo na porcentagem de mobilidade sedimentar com a diminuição do tamanho de grão, indicando que as ondas são capazes de remobilizar os grãos de cascalho apenas em uma faixa estreita próxima à costa (Figura 3.6a, e), enquanto a mobilidade dos grãos da classe areia ocorre ao longo de toda a extensão da plataforma insular (Figura 3.6c, d, e, f, g, h). Este padrão ocorre devido à menor velocidade crítica necessária para iniciar o movimento de sedimentos com menor diâmetro médio. O potencial de mobilidade sedimentar também aumenta gradualmente em direção à costa, com a diminuição das profundidades, por causa da interação das ondas com o fundo e, conseqüentemente, da geração de velocidades orbitais próximo ao fundo.

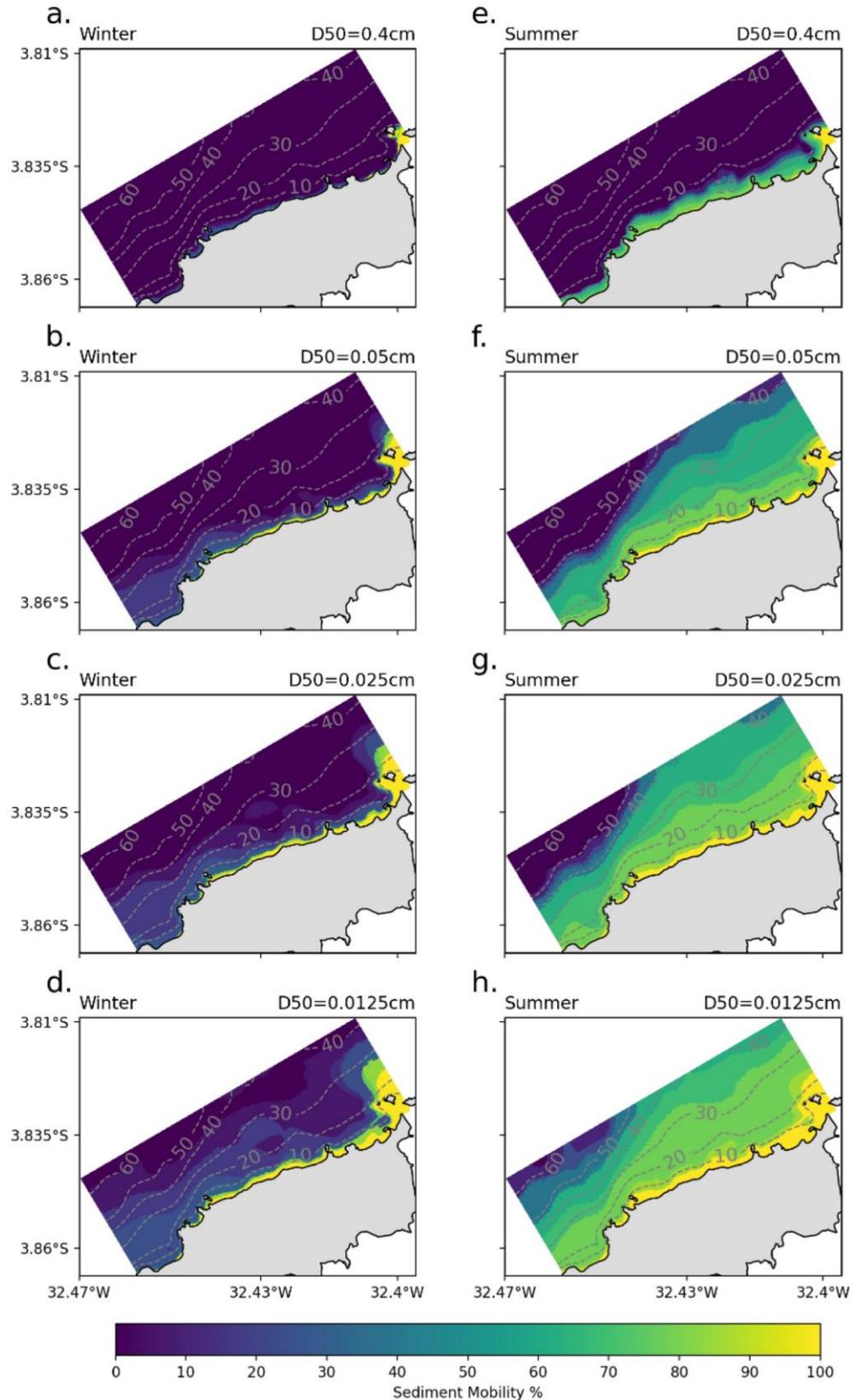
Durante as condições de inverno, os sedimentos são potencialmente mobilizados principalmente na porção sul da plataforma insular (Figura 3.6a, b, c, d) como resultado da incidência de vagas de sudeste e eventos energéticos caracterizados pela ocorrência de *swells* de sul. Curiosamente, na costa sudeste, onde há menos praias arenosas e predominam promontórios rochosos, há 100% de mobilidade de grãos de areia fina, areia média e areia grossa do fundo até aproximadamente 30 m durante os meses de inverno. Por outro lado, durante o verão ocorrem ondas energéticas associadas à incidência de *swells* das direções noroeste e norte, as quais causam maior mobilidade na porção norte do arquipélago (Figura 3.6e, f, g, h). No entanto, a mobilidade é ativa durante aproximadamente 50 a 60% do tempo, indicando uma média de 60 a 70 dias por ano para grãos de areia fina, média e grossa. Assim, em geral, as regiões sul e leste da plataforma insular apresentam maior potencial de mobilidade sedimentar devido à sua exposição às ondas de sudeste e leste geradas pelos ventos alísios que ocorrem durante todo o ano. Como consideramos apenas ondas com frequências de ocorrência superiores a 5%, a mobilidade sedimentar total pode ser ainda maior que a observada nestes resultados, uma vez que os eventos extremos não estão sendo considerados.



**Figura 3.6** Porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade bioclástica na plataforma insular de Fernando de Noronha nos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando diferentes diâmetros de grão: a. b. 0,4 cm (cascalho); c. d. 0,05 cm (areia grossa); e. f. 0,025 cm (areia média); e g. h. 0,0125 cm (areia fina). As cores no mapa representam as porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade sedimentar e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos.

Os resultados indicam a importante influência da variabilidade sazonal do clima de ondas na determinação de qual porção da plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha está exposta à maior energia das ondas e maior duração da mobilização de sedimentos induzida pelas ondas ao longo da plataforma. Essa influência pode ser ainda mais marcante se a mobilidade for observada na porção norte do arquipélago, conforme destacado na Figura 3.7. Este lado é protegido das ondas geradas pelos ventos alísios e sombreado dos *swells* de inverno. Assim, durante o inverno (Figura 3.7a, b, c, d), ocorre uma baixa mobilidade sedimentar devido à zona de sombra formada pela ilha em resposta às ondas predominantes de sul. Porém, durante o verão (Figura 3.7e, f, g, h), a incidência de *swells* de norte é responsável por altas porcentagens de tempo com remobilização sedimentar, chegando a 100% nos primeiros 10 m de profundidade no caso da areia fina. Esses resultados corroboram aos encontrados por Manso et al. (2011) a respeito da morfodinâmica das praias da porção setentrional da ilha, destacando a alta variabilidade sazonal da topografia das praias estudadas.

A importância dos controles morfológicos sobre a ação das ondas e a mobilidade sedimentar potencial também foi observada nos resultados. Plataformas estreitas são menos eficientes na atenuação da energia das ondas incidentes e, conseqüentemente, estão sujeitas a níveis de energia de onda relativamente mais altos (WHEATCROFT e SOMMERFIELD, 2005; LAVENÈRE-WANDERLEY e SIEGLE, 2019). Este aspecto é responsável pela ocorrência de mobilidade de sedimentos arenosos em toda a plataforma para áreas com profundidades de aproximadamente 60 m, ora no lado norte, ora no lado sul da ilha, dependendo da estação do ano.



**Figura 3.7** Porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade bioclástica na plataforma insular norte de Fernando de Noronha nos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando diferentes diâmetros de grão: a. b. 0,4 cm (cascalho); c. d. 0,05 cm (areia grossa); e. f. 0,025 cm (areia média); e g. h. 0,0125 cm (areia fina). As cores no mapa representam as porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade sedimentar e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos.

#### 3.4.4. Mobilidade de rodolitos induzida por ondas

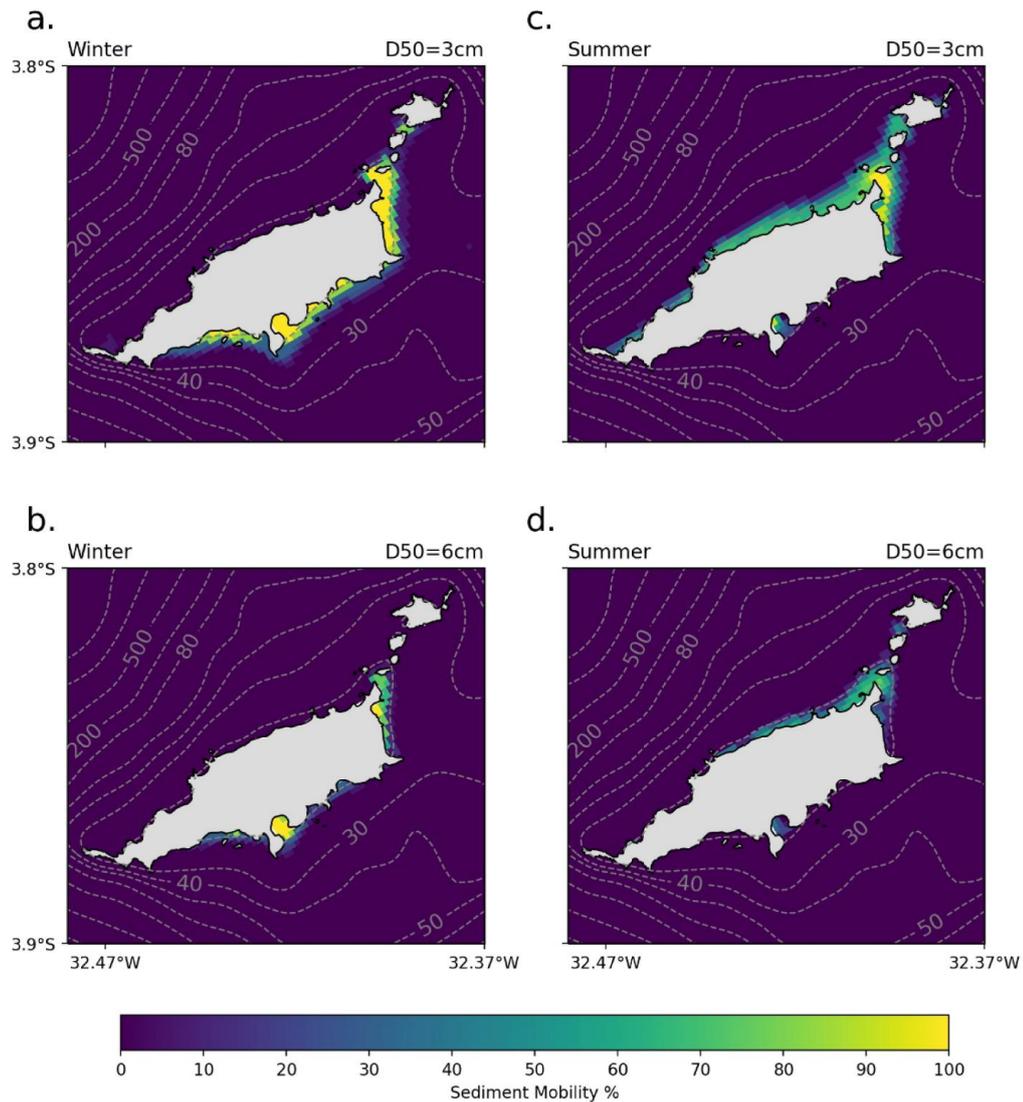
A ação das ondas gerando tensões de cisalhamento e fluxos de fundo na plataforma é importante em termos de dinâmica sedimentar, produzindo sedimentos bioclásticos e atuando na mobilização e transporte de sedimentos. Além disso, os níveis de energia e os processos sedimentares induzidos pelas ondas desempenham um papel essencial na distribuição de habitats e organismos bentônicos (HEMER, 2006). Por exemplo, os rodolitos podem se beneficiar das tensões de cisalhamento de fundo geradas pelas ondas, que podem eventualmente causar movimentos de arrasto e rolamento dos rodolitos (HARRIS et al., 1996). Segundo Hall-Spencer (1998), os rodolitos requerem certa proteção contra a ação das ondas para evitar que sejam soterrados ou dispersos para áreas *offshore* sem luminosidade; no entanto, eles também precisam de níveis hidrodinâmicos suficientes para evitar o sufocamento com o lodo produzido. Portanto, o desenvolvimento de campos de rodolitos está diretamente relacionado à ação das ondas na plataforma correspondente.

Os campos de rodolitos são compostos por populações de macroalgas vermelhas coralinas não-geniculadas e formam grandes habitats biogênicos que ocorrem desde a zona entremarés até profundidades de até 250 m (BOSENCE, 1983; LITTLER et al., 1991; FOSTER, 2001; KONAR et al., 2006). Na plataforma insular de Fernando de Noronha, leitos de rodolitos têm sido observados em vários locais, principalmente na porção leste do arquipélago, ocorrendo em profundidades de 10 a 100 m (AMADO-FILHO et al., 2012). Assim, para melhorar o entendimento sobre a distribuição e o desenvolvimento dos rodolitos, a mobilidade potencial induzida por ondas foi calculada para toda a plataforma insular. Poucos estudos avaliaram a mobilidade de rodolitos por ação das ondas, com Joshi et al. (2017a, b) abordando velocidades críticas e mobilidade de rodolitos na Baía de Galway (Irlanda), e Lavenère-Wanderley et al. (2021) estimando a mobilidade de rodolitos no grande campo de rodolitos de Abrolhos (Brasil).

A Figura 3.8 mostra a mobilidade potencial dos rodolitos na plataforma insular de Fernando de Noronha em relação aos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando uma distribuição espacial uniforme, densidade média de  $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$  e tamanhos de 3 cm (Figura 3.8a, c) e 6 cm (Figura 3.8b, d). Nossos resultados mostram que a porcentagem de tempo de remobilização depende principalmente da profundidade local e do clima de ondas. Valores máximos de mobilidade foram observados na porção sul e leste da plataforma insular, especialmente durante as condições de inverno, quando além das ondas de sudeste ocorre a incidência de *swells* de sul. De acordo com Amado-Filho et al. (2012), os maiores diâmetros foram encontrados em um campo de rodolitos localizado na área central do lado leste da ilha a

aproximadamente 16 m de profundidade, corroborando os resultados obtidos neste estudo; nesta área, os rodolitos de 6 cm mostram estar sujeitos à mobilidade induzida pelas ondas durante uma baixa porcentagem de tempo nos cenários de inverno e verão.

Maiores tempos de mobilidade ocorreram nos primeiros 10 m de profundidade. Embora os rodolitos dependam de movimentos de rolamento periódicos para que a luz alcance todos os seus lados (STENECK, 1986), a mobilidade contínua induzida por ondas de alta energia não favorece os rodolitos, pois além de soterrar os rodolitos, pode resultar na fragmentação de suas estruturas (HINOJOSA-ARANGO et al., 2009). Ondas em profundidades abaixo de 10 m possuem intensa energia, atuando como possíveis restritores ambientais na distribuição dos rodolitos, causando seu soterramento, pois as interações dessas ondas com o fundo oceânico também são mais intensas nessas áreas e os grãos carbonáticos estão em constante mobilidade. Assim, nossos resultados indicando 100% de mobilidade nas áreas mais próximas à costa (principalmente durante o inverno para os dois tamanhos de grão e durante o verão para os grãos de 3 cm) denotam, de fato, que nessas áreas dificilmente encontraríamos rodolitos.



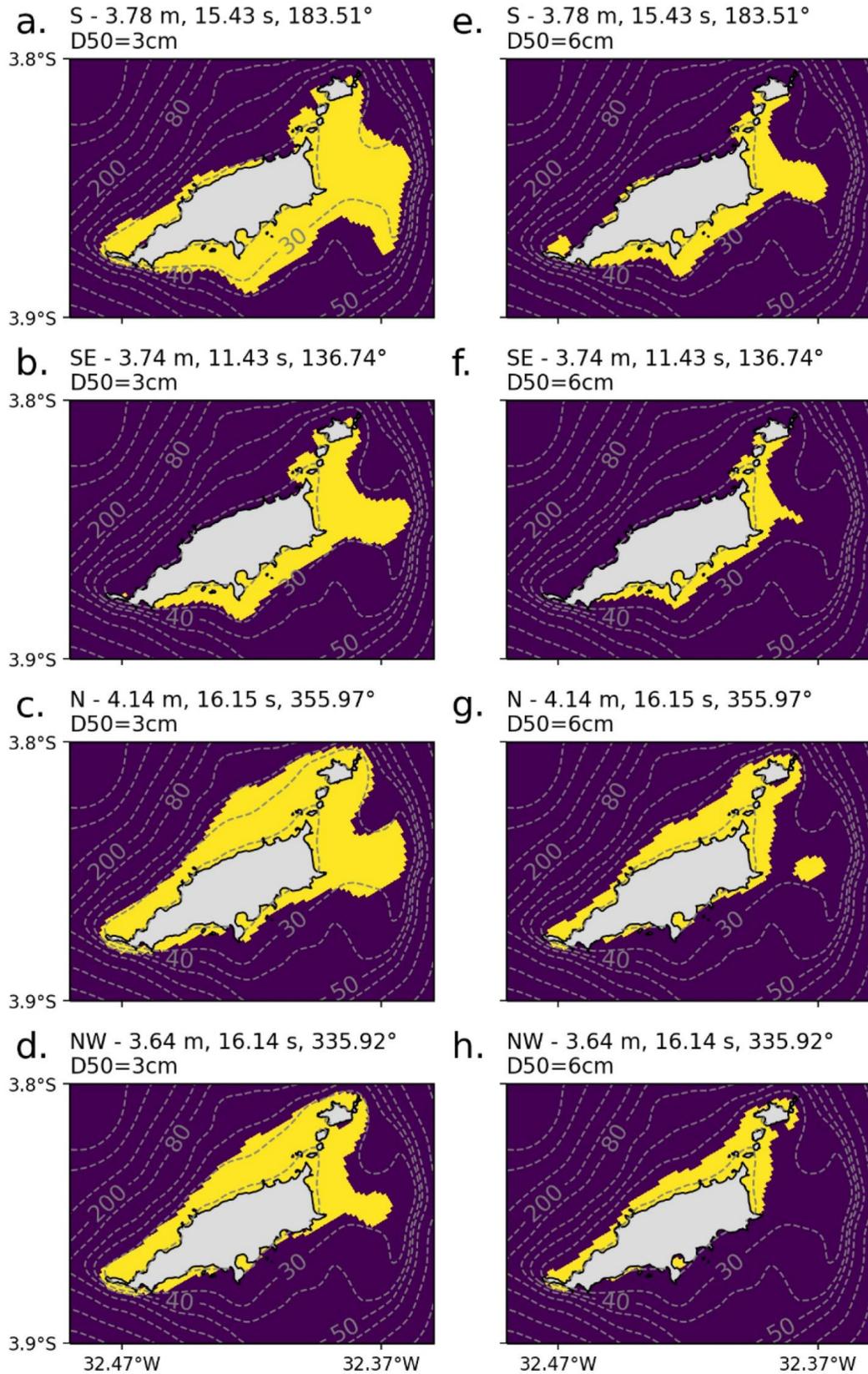
**Figura 3.8** Porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade de rodolitos na plataforma insular de Fernando de Noronha nos cenários de inverno (esquerda) e de verão (direita), considerando os tamanhos médios: a. b. 3 cm; e c. d. 6 cm. As cores no mapa representam as porcentagens de tempo em que ocorre mobilidade de rodolitos e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos.

Ondas mais energéticas podem interagir com o fundo oceânico em maiores profundidades e causar movimentos em menores porcentagens de tempo ao longo do ano, representando uma situação ideal para a manutenção da vida dos rodolitos. Portanto, simulamos quatro cenários adicionais caracterizando ondas de alta energia, representando eventos extremos de ondas incidentes em diferentes direções (sul, sudeste, norte e noroeste), para identificar o campo de máxima mobilidade induzida por ondas ao redor da plataforma insular de Fernando de Noronha. Os resultados são mostrados na Figura 3.9, onde as regiões azuis indicam nenhuma mobilidade e as áreas amarelas indicam mobilidade de sedimentos/rodolitos.

Estes resultados mostram que ondas mais energéticas podem remobilizar os rodolitos em profundidades superiores a 30 m em diferentes porções da plataforma, e esse comportamento é dependente da direção de incidência das ondas. A baixa frequência desses eventos somada à alternância das áreas afetadas pode ser um fator favorável ao desenvolvimento de leitos de rodolitos. De acordo com Amado-Filho et al. (2012), a plataforma insular de Fernando de Noronha é dominada por leitos de rodolitos com sedimentos moles próximos à costa. Os autores encontraram campos de rodolitos em profundidades de 10 a 100 m; alguns locais onde leitos de rodolitos foram mapeados são indicados na Figura 3.1b. Nossos resultados mostram que as condições de onda são mais favoráveis para o desenvolvimento de rodolitos na área costeira, com profundidades entre aproximadamente 10 e 30 m, onde eventualmente ocorre a mobilização dos rodolitos. No entanto, a interpretação ideal desses resultados dependeria de uma análise mais detalhada em que o tipo de fundo (arenoso ou rochoso) e o conjunto de espécies fossem considerados. Ainda há carência de informações quantitativas sobre os organismos bentônicos que compõem os recifes dessa região (ESTON et al., 1986).

Em resumo, notamos que a variabilidade do clima de ondas do Arquipélago de Fernando de Noronha apresenta um comportamento semelhante ao das ilhas do Havaí (STOPA et al., 2011; LI et al., 2016), incluindo uma combinação de ondas locais e *swells* de diferentes direções. Isso desempenha um papel importante na distribuição espacial e temporal da energia das ondas ao redor da plataforma insular, causando remobilização de sedimentos e rodolitos alternada entre as diferentes partes da plataforma. Tal padrão de variabilidade sazonal é vantajoso para a manutenção da morfologia de praias arenosas e para o desenvolvimento de leitos de rodolitos.

Apesar da enorme relevância da ação das ondas na dinâmica sedimentar das ilhas oceânicas, pesquisas relacionadas à mobilidade potencial induzida pelas ondas são escassas. A maioria dos estudos aborda a ressuspensão e o transporte de sedimentos impulsionados pelas ondas, especialmente nas proximidades de estruturas de recifes de corais, usando conjuntos de dados de nível do mar e correntes e aplicando modelos de ondas, hidrodinâmico e transporte de sedimentos acoplados (por exemplo, OGSTON et al., 2004; STORLAZZI et al., 2004; PRESTO et al., 2006; STORLAZZI et al., 2011). Neste estudo, mostramos que a modelagem de ondas e a aplicação de formulações empíricas de transporte (sem conjuntos de dados de correntes ou maré) podem fornecer informações importantes sobre a dinâmica de tais ambientes, apoiando estudos biológicos e motivando o desenvolvimento de novos estudos detalhados que incluem modelagem hidrodinâmica e do transporte de sedimentos.



**Figura 3.9** Ocorrência de mobilidade de rodolitos na plataforma insular de Fernando de Noronha, considerando os tamanhos médios de 3 cm (esquerda) e 6 cm (direita) nos cenários de ondas extremas: a. e. S - Hs: 3,78 m, Tp: 15,43 s, Dm: 183,51°; b. f. SE - Hs: 3,74 m, Tp: 11,43 s, Dm: 136,74°; c. g. N - Hs: 4,14 m, Tp: 16,15 s, Dm: 355,97°; e d. h. NW - Hs: 3,64 m, Tp: 16,14 s, Dm: 335,92°. As cores no mapa representam se ocorre mobilidade de rodolitos (azul: sem mobilidade e amarelo: mobilidade) e as linhas tracejadas em cinza mostram os contornos batimétricos.

### 3.5 Conclusões

A partir dos resultados obtidos, temos que as principais conclusões deste capítulo são:

- A estreita plataforma insular de Fernando de Noronha, com quebra de plataforma em aproximadamente 60 m de profundidade, está exposta à alta energia das ondas, pois esse tipo de plataforma não é eficiente na atenuação da energia das ondas. A variabilidade sazonal no clima de ondas é representada principalmente pelas diferenças entre os meses de verão e inverno, sendo que o verão é marcado pela incidência de *swells* de norte, enquanto no inverno há predominância de ondas de sudeste geradas pelos ventos alísios e *swells* de sul. Essa inversão de direções expõe as porções norte e sul da plataforma ao aumento da ação das ondas em diferentes períodos do ano;
- A porção norte da Ilha de Fernando de Noronha, onde está localizada a maior parte das praias arenosas, está sujeita aos *swells* vindos da direção norte. Durante os meses de verão, essas ondas são responsáveis por aumentar a força de onda que atinge a costa e a intensidade do transporte longitudinal a 5 m de profundidade (preferencialmente para sudoeste);
- A variabilidade sazonal do clima de ondas e a profundidade local desempenham um papel importante na distribuição da porcentagem de tempo durante o qual os sedimentos carbonáticos bioclásticos são mobilizados pelas ondas em torno da plataforma insular. As faces sul e leste da ilha apresentam maiores porcentagens de mobilização, desde a linha de costa até profundidades de aproximadamente 30 m nas duas estações do ano analisadas, inviabilizando a deposição de sedimentos arenosos nessas áreas. Isso ocorre porque essas áreas estão expostas tanto às ondas locais geradas pelos ventos alísios (de sudeste-leste) quanto aos *swells* de quadrante sul. Por outro lado, a face norte apresenta 100% de mobilização apenas na zona costeira que compreende os primeiros 10 m de profundidade, ocorrendo especialmente nos meses de verão devido à incidência de *swells* de norte. Esta intensa remobilização de sedimentos arenosos induzida por ondas durante os meses de verão pode explicar a erosão sazonal dos perfis das praias arenosas na porção norte da ilha;
- A mobilidade dos rodolitos (com tamanhos de 3 cm e 6 cm) concentra-se em áreas muito próximas da costa (em profundidades <10 m). Maiores porcentagens de tempo

de mobilização são encontradas principalmente em algumas regiões da plataforma sul e leste, especialmente durante o inverno. Poucas áreas apresentam o movimento intenso e constante que pode limitar a ocorrência desses organismos. Em geral, os parâmetros de onda que caracterizam o regime de onda dominante têm baixo potencial para remobilizar rodolitos. No entanto, a ocorrência de eventos extremos de ondas aumenta as áreas sujeitas à movimentação em profundidades superiores a 30 m, e esses eventos ocorrem em diferentes porções da plataforma insular de acordo com a direção das ondas. Este movimento menos frequente (esporádico) dos rodolitos favorece o desenvolvimento de leitos de rodolitos, proporcionando alguma mobilidade desejada, evitando o soterramento em zonas de fundo mole e a quebra das suas estruturas.

Estes resultados sem precedentes fornecem informações importantes sobre a distribuição de habitats e o balanço de sedimentos nessa plataforma de largura limitada. A mobilidade dos sedimentos ao longo da plataforma tem um papel determinante no suprimento de sedimentos nas praias, impulsionado pelo clima de ondas local.

# Capítulo 4 Influência do clima de ondas na variabilidade da linha de costa

## 4.1 Apresentação do capítulo

Neste capítulo utilizou-se a aplicação de modelo numérico de propagação de ondas e de ferramentas de geoprocessamento de imagens multiespectrais de média resolução (aproximadamente 3 m), com a finalidade de identificar possíveis relações entre a variabilidade sazonal e interanual da força de onda que atinge a costa e da morfologia das praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró.

## 4.2 Introdução

A zona costeira é uma área de transição entre o oceano e o continente e, portanto, está suscetível a diversas condicionantes ambientais de natureza marítima e continental. Dentre os principais agentes modeladores da morfologia costeira, podemos citar a ação de ventos, ondas, maré e descarga fluvial.

Dos diversos ambientes encontrados na zona costeira, destaca-se o ambiente praias. Segundo a definição proposta por King (1972), as praias são ambientes sedimentares costeiros, que se estendem desde onde inicia a interferência da velocidade orbital das ondas sobre o fundo até o limite mais continental da ação das ondas de tempestade. Embora ocupem pequena parcela das terras emersas do planeta, as praias possuem grande relevância ambiental e socioeconômica. Além da intensa ocupação urbana, estes ambientes são amplamente utilizados para lazer, pesca, atividades portuárias e outras.

O formato, tamanho e composição de cada praia, assim como o seu comportamento morfológico, é resultado das características geológicas e proximidade da fonte de sedimentos, interações com os processos modeladores e características da plataforma interna adjacente (KOMAR, 1998). A grande mobilidade das praias é reflexo de um equilíbrio dinâmico extremamente frágil e sensível aos impactos de origem antrópica e natural. Obras costeiras, como molhes, píeres ou espigões, podem modificar a dinâmica do sistema praias e alterar o balanço sedimentar, acelerando processos erosivos e/ou deposicionais. Fatores naturais de curto termo, como variações sazonais da hidrodinâmica, ou mesmo de longo termo, como aumento

do nível médio do mar, podem gerar efeito semelhante (SOUSA, 2007; IPCC, 2007; BIRD, 2008; NICHOLLS e CAZENAVE, 2010; SOUSA et al. 2013).

O litoral brasileiro é bastante conhecido por suas praias continentais, que possuem grande relevância turística. Entretanto, existem as ilhas oceânicas localizadas ao largo da costa brasileira que também abrigam inúmeras praias. Dentre estas, podemos citar o Arquipélago de Fernando de Noronha (PE), cuja ilha principal conta com 32 praias, sendo 15 praias arenosas, algumas consideradas as mais bonitas do Brasil e até do mundo (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Imagem de satélite do Arquipélago de Fernando de Noronha (PE), indicando a localização das principais praias (Fonte: Google Earth) (CALLIARI et al., 2016).

Como as ilhas oceânicas encontram-se no assoalho oceânico e são cercadas por águas profundas, a influência dos processos marítimos, especialmente aqueles relacionados a ação das ondas, é mais efetiva que nas praias continentais. Isso pode resultar em uma dinâmica sedimentar mais intensa, com maior capacidade de transporte de sedimentos e mudanças frequentes na forma e posição das praias.

No caso da Ilha de Fernando de Noronha, área de interesse deste estudo, as praias arenosas são mais numerosas e extensas na porção setentrional da ilha. Nessas praias predominam areias calcárias, com tamanho de grão de areia fina a média (BARCELLOS et al., 2018; MANSO et al., 2011). O estágio morfodinâmico dessas praias varia predominantemente de refletivo a terraço de baixa-mar. As condições refletivas prevalecem nas praias de areia

ligeiramente mais grossa (Sancho, Baía dos Porcos, Cacimba do Padre, Americano e Bode) e/ou durante os meses mais calmos do verão boreal. Durante o inverno boreal, a incidência de ondas mais altas e enérgicas mantêm condições de terraço de baixa-mar a bancos transversais e correntes de retorno, particularmente nas praias de areia ligeiramente mais fina (Boldró, Conceição, Meio e Cachorro). As ondas tendem a quebrar fortemente no terraço de baixa-mar e as correntes de retorno topográficas atuam em muitas das praias (CALLIARI et al., 2016).

A maioria das praias arenosas de Fernando de Noronha também são delimitadas e sustentadas e/ou apoiadas por praias rochosas, que ficam expostas quando a areia é erodida. Manso et al. (2011) monitoraram os volumes de areia de quatro praias localizadas na costa norte da ilha (Conceição, Boldró, Cacimba do Padre e Sancho) e identificaram que o volume médio das praias apresentou valor mínimo de  $98 \text{ m}^3/\text{m}$  e máximo de  $327 \text{ m}^3/\text{m}$ , com mobilidade entre 14 e 59%. Segundo os autores, a mobilidade das praias investigadas resulta da sazonalidade do clima de ondas atuante na costa norte da ilha, com ondas mais energéticas e erosão dos perfis praias dominando durante o inverno boreal, e condições mais calmas e recuperação das praias durante o verão boreal.

Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo principal avaliar a relação entre a força de onda que atinge a costa setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha e a largura dos perfis de praia, com ênfase nas praias arenosas localizadas na porção central da ilha principal (Cachorro, Meio, Conceição e Boldró), através de métodos que incluem a combinação de modelagem numérica e sensoriamento remoto. Além disso, busca-se entender o tempo de resposta da morfologia das praias às variações da energia de onda, que ocorrem em diferentes escalas temporais.

## **4.3 Métodos**

### ***4.3.1. Sensoriamento remoto***

Com o objetivo de analisar a variabilidade da linha de costa de algumas das praias arenosas localizadas na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, foram obtidas imagens multiespectrais de alta resolução da constelação de satélites *PlanetScope* (PS), cedidas pela empresa Planet para fins educacionais e pesquisas não-comerciais. Tais imagens são geradas a partir de sensores ópticos em 4 bandas espectrais, compreendendo a região do visível (*Blue*: 455 - 515 nm; *Green*: 500 - 590 nm; *Red*: 590 - 670 nm - RGB) e do infravermelho próximo (*Near-Infrared*: 780 - 860 nm - NIR), com resolução radiométrica de 12 bits, resolução espacial

de 3 m e resolução temporal de 24 h (revisita diária). Deste modo, as imagens *PlanetScope* têm sido amplamente utilizadas por importantes instituições em todo o mundo em análises que requerem elevada capacidade de recobrimento com alta qualidade e precisão (BARROSO, 2016).

Foram obtidas 24 cenas mensais, cobrindo o recorte espacial que abrange as praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, sendo uma imagem para cada mês dos anos de 2020 e 2021. A seleção das imagens foi feita com base na cobertura de nuvens e condição de maré. Informações de maré astronômica foram adquiridas do banco de dados do modelo oceânico global de previsão de marés *Oregon State University TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution* (TPXO) para as coordenadas Lat. 3°46,80'S e Long. 32°25,80'W. Assim, para cada mês foi selecionada a imagem que apresentou menor cobertura de nuvens e que foi obtida em condição de maré mais baixa. Algumas das principais características das imagens selecionadas podem ser visualizadas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

**Tabela 4.1** Descrição das imagens de satélite selecionadas para o ano de 2020.

Data da imagem	Maré [m]	Instrumento	Resolução de pixel [m]	Ângulo off-nadir [°]	Cobertura de nuvens [%]
22/01/2020 11:19:32	-0,826	Dove Classic (PS2)	3,000	2,0	5,0
07/02/2020 12:09:09	-0,848	Dove Classic (PS2)	3,000	5,1	4,0
07/03/2020 12:20:21	-0,827	Dove Classic (PS2)	3,000	0,2	3,0
08/04/2020 12:11:18	-0,995	Dove Classic (PS2)	3,000	0,1	15,0
19/05/2020 12:13:14	-0,649	Dove Classic (PS2)	3,000	2,6	8,0
07/06/2020 12:14:55	-0,523	Dove Classic (PS2)	3,000	4,9	2,0
02/07/2020 12:13:13	-0,811	Dove Classic (PS2)	3,000	3,0	0,0
29/08/2020 12:10:32	-0,617	Dove Classic (PS2)	3,000	4,0	0,0
17/09/2020 12:58:03	-1,231	Dove R (PS2.SD)	3,000	4,1	27,0
29/10/2020 12:12:33	-0,884	Dove Classic (PS2)	3,000	4,0	2,0
16/11/2020 12:08:50	-0,777	Dove Classic (PS2)	3,000	4,1	3,0
30/12/2020 12:54:04	-0,837	Dove R (PS2.SD)	3,000	3,0	19,0

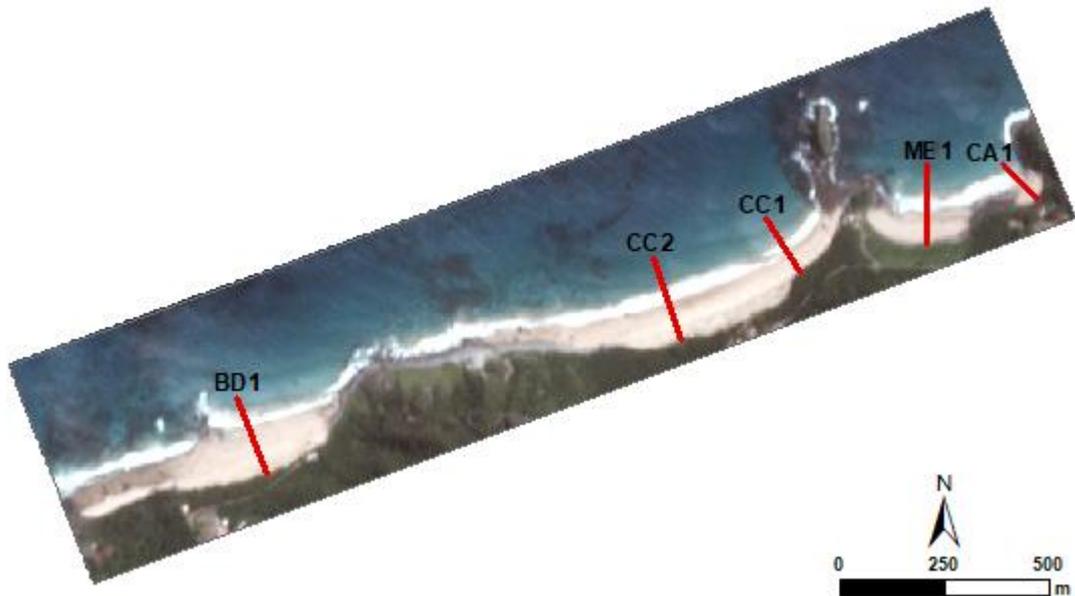
**Tabela 4.2** Descrição das imagens de satélite selecionadas para o ano de 2021.

Data da imagem	Maré [m]	Instrumento	Resolução de pixel [m]	Ângulo off-nadir [°]	Cobertura de nuvens [%]
10/01/2021 12:09:51	-0,705	Dove Classic (PS2)	3,000	3,0	5,0
26/02/2021 11:51:49	-0,841	Dove Classic (PS2)	3,000	2,1	3,0
28/03/2021 12:12:16	-1,027	Dove Classic (PS2)	3,000	3,1	3,0
07/04/2021 10:06:34	-0,640	Dove Classic (PS2)	3,000	0,0	19,0
26/05/2021 12:31:10	-1,158	Dove Classic (PS2)	3,000	0,1	14,0
25/06/2021 12:11:16	-0,859	Dove Classic (PS2)	3,000	4,9	1,0
24/07/2021 12:10:24	-0,903	Dove Classic (PS2)	3,000	2,7	1,0
22/08/2021 12:38:37	-1,100	Dove R (PS2.SD)	3,000	4,9	6,0
06/09/2021 12:37:23	-1,059	Dove R (PS2.SD)	3,000	3,1	7,0
18/10/2021 12:05:02	-1,001	Dove Classic (PS2)	3,000	3,1	4,0
04/11/2021 12:34:03	-1,156	Dove R (PS2.SD)	3,000	5,0	10,0
04/12/2021 14:54:53	-0,631	Dove Classic (PS2)	3,125	4,9	26,0

A avaliação prévia e o *download* das imagens foram feitos através da plataforma Planet Explorer e todas as imagens foram adquiridas no formato GeoTIFF, ortorretificadas e georreferenciadas ao *datum* WGS-84 no sistema de coordenadas planas de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM). O tipo de produto obtido foi o *PlanetScope Ortho Scene (Analytic SR level 3B)*, isto é, imagem analítica da refletância da superfície, radiometricamente calibrada e ortorretificada, armazenada em escala de 16 bits. As imagens disponibilizadas são previamente corrigidas através da aplicação das correções radiométrica e geométrica.

O pós-processamento das imagens e a medição da largura de praia foram realizados no programa ArcGIS. Foi feita a composição colorida das bandas espectrais e alguns ajustes de brilho, contraste e histograma para que a interface terra-água pudesse ser evidenciada e delimitada com maior facilidade. Como os corpos d'água absorvem a maior parte da radiação nas regiões do infravermelho próximo e infravermelho médio do espectro, consequentemente, a refletância da água é praticamente zero nesses comprimentos de onda. Deste modo, a banda NIR foi inserida no canal do vermelho na composição RGB e também foi analisada separadamente como uma banda única representada em níveis de cinza, proporcionando maior contraste entre

terra e água. A medição de largura de praia foi realizada ao longo de cinco transectos perpendiculares à costa, localizados nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1) (Figura 4.2), considerando a distância entre o ponto inicial do transecto e a posição da linha d'água. É importante ressaltar que nenhuma correção de maré foi aplicada às imagens. No entanto, em função do grande número de imagens analisadas, é esperado que um padrão geral do comportamento da largura da praia seja obtido.



**Figura 4.2** Localização dos transectos utilizados para monitorar a variabilidade da largura das praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1) (Fonte: PlanetScope).

#### 4.3.2. Modelagem numérica

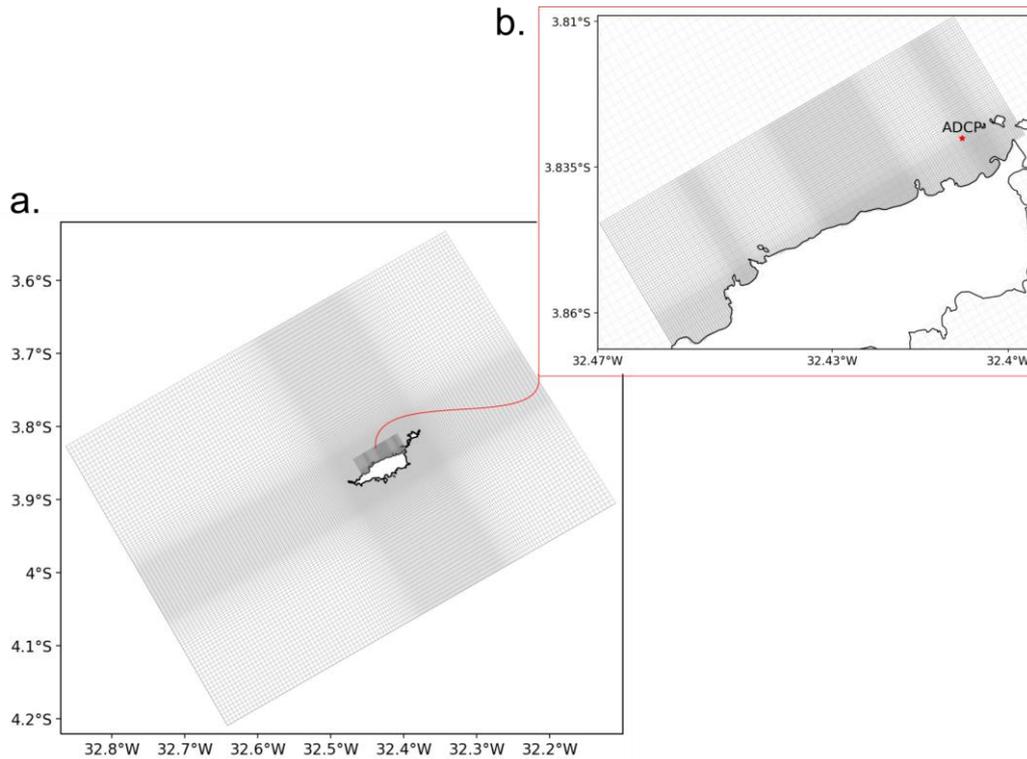
Para simular a propagação de ondas em direção à costa, foi aplicado o modelo numérico Delft3D (módulo Delft3D-WAVE), desenvolvido pela Deltares. Este modelo descreve a geração, o crescimento, o decaimento e a transformação de ondas gravitacionais geradas pelo vento em águas oceânicas e costeiras (DELTARES, 2014). O Delft3D-WAVE inclui o modelo espectral de ondas de terceira geração *Simulation Waves Nearshore* (SWAN), desenvolvido pela *Delft University of Technology* (HOLTHUIJSEN et al., 1993; BOOIJ et al., 1999; RIS et al., 1999).

O domínio do modelo cobre uma grande extensão oceânica ao redor do Arquipélago de Fernando de Noronha, incluindo toda a plataforma insular até profundidades de aproximadamente 4.000 m. Para compor o domínio do modelo, foi utilizada a posição da linha de costa obtida por meio de imagens de satélite e um conjunto de dados batimétricos que inclui: a) levantamento aéreo a laser do fundo marinho realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e b) cartas

náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Todas as informações geoespaciais foram georreferenciadas ao *datum* WGS-84 no sistema de coordenadas geográficas.

Para representar mais detalhadamente a ação das ondas na zona costeira ao redor do arquipélago, e ao longo das praias da porção setentrional, sem um gradiente abrupto de resolução, o domínio do modelo foi decomposto em duas grades computacionais estruturadas (Figura 4.3) com resolução variável: uma grade regional incluindo toda a plataforma insular (tamanho das células variando de 650 a 150 m) e uma grade local e mais refinada cobrindo as praias da porção setentrional da ilha principal (tamanho das células variando de 50 a 18 m). Desse modo, os dados batimétricos foram interpolados ao longo dos elementos de grade usando o método da triangulação.

Para a simulação da propagação de ondas em direção à costa do Arquipélago de Fernando de Noronha, foram obtidos os parâmetros de ondas oceânicas (altura significativa, período de pico e direção média) a partir da 5ª geração da reanálise climática global do centro operacional europeu European Centres for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). O ERA5 (5ª ECMWF Re-Analysis) é baseado no Sistema de Previsão Integrada (Integrated Forecasting System - IFS) Cy41r2, utilizando o esquema 4D-Var de assimilação de dados observacionais, e apresenta resolução horizontal de 31 km. Os dados de onda são disponibilizados com resolução espacial de 0,5° e resolução temporal de 1 hora. Assim, os parâmetros de ondas utilizados como condição de contorno no modelo foram extraídos para as coordenadas Lat. 3°30'S e Long. 32°30'W e para o período da simulação, compreendendo os anos de 2020 e 2021. Maiores informações sobre a reanálise global ERA5 podem ser consultadas em Hersbach et al. (2020).



**Figura 4.3** a. Representação do domínio do modelo com os elementos das grades computacionais; e b. detalhe da variabilidade da resolução horizontal, indicando a localização do ADCP utilizado para medições de ondas *in situ*.

O modelo de propagação de ondas implementado foi devidamente calibrado e validado, através de comparações estatísticas entre os resultados do modelo e dados de ondas adquiridos *in situ* com um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) fundeado nas proximidades da praia do Porto (profundidade média de 24 m) (Figura 4.3), durante o mês de janeiro de 2014 (AMBROSIO et al., 2022). Os procedimentos e resultados da avaliação do desempenho do modelo de ondas podem ser verificados no Capítulo 3.

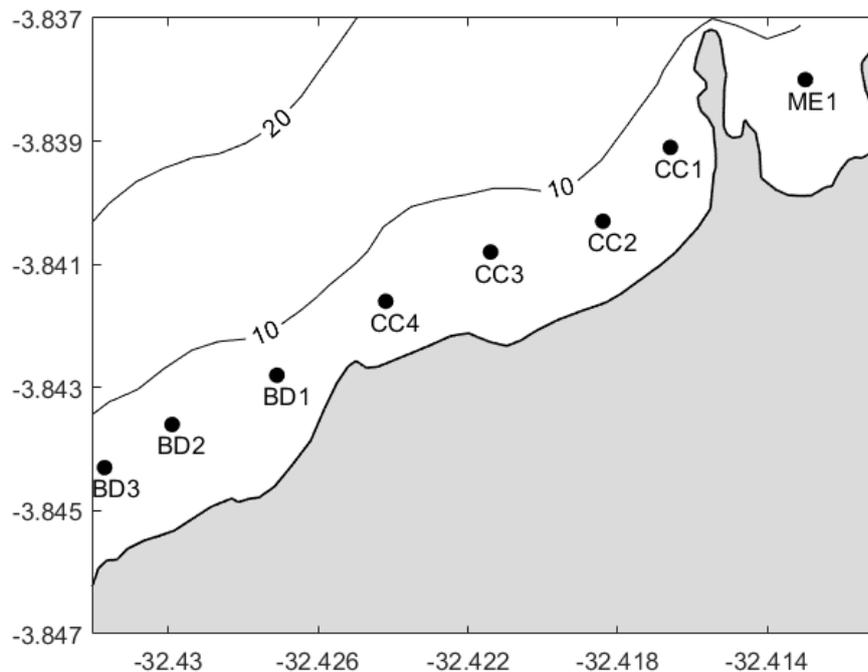
Os parâmetros de ondas (altura significativa, período de pico e direção média) resultantes das simulações foram obtidos para todo o domínio do modelo e para alguns pontos costeiros localizados na isóbata de 5 m (Figura 4.4). Utilizando tais parâmetros foi calculada a força ou potência de onda ( $P$ ), que, de acordo com a teoria linear de onda exposta em Holthuijsen (2007), é dada pelo produto de sua energia por unidade de área com a velocidade de grupo, podendo ser estimada a partir da Equação (4.1):

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_p}{32\pi} \text{ [W/m]} \quad (4.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade da água do mar ( $1.025 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  é a aceleração da gravidade ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $H_s$  é a altura significava (em metros) e  $T_p$  é o período de pico (em segundos) de onda.

Assim, foi possível obter a distribuição espacial da média mensal da força de onda perto da costa e a variabilidade temporal da força de onda em cada mês dos anos de 2020 e 2021. Além disso, foi feito o cálculo da média dos maiores valores de força de onda (considerando o percentil 75 ou terceiro quartil como limiar) observados em um período de 7 dias antes da tomada de cada imagem de satélite utilizada para avaliar a largura das praias. Os cálculos e a representação gráfica dos resultados foram realizados através de rotinas desenvolvidas no programa MATLAB.

Adicionalmente, foram feitas análises de regressão linear simples através de ferramentas do programa Microsoft Excel para estudar a possível relação linear entre a largura de praia (variável dependente) e a força de onda (variável independente). Neste caso, foi utilizada a média dos maiores valores de força de onda identificados nos 7 dias que antecedem a aquisição das imagens de satélite.



**Figura 4.4** Localização dos pontos utilizados para extrair resultados da modelagem de ondas nas proximidades das praias investigadas.

#### 4.4 Resultados e discussão

A Figura 4.5 apresenta a variabilidade mensal da largura de praia (considerando a parte emersa do perfil praial, isto é, até a linha d'água) ao longo de transectos perpendiculares à costa, localizados nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), durante os anos de 2020 e 2021. A estatística básica das medições de largura de praia obtida para cada transecto, abrangendo todas as medições de largura feitas através das imagens de satélite, pode ser visualizada na Tabela 4.3.

Ao analisar a variabilidade mensal da largura de praia (Figura 4.5), notamos que o padrão de variação temporal é similar em todos os transectos monitorados. De maneira geral, observa-se o estreitamento das praias e maior variabilidade da largura nos meses de outubro a abril. Já nos meses entre maio e setembro as praias tendem a apresentar maiores larguras e maior estabilidade da posição da linha de costa. Esse resultado é coerente com a sazonalidade do clima de ondas da região, caracterizado pelo predomínio de vagas de leste e sudeste geradas pela atuação constante dos ventos alísios e pela incidência de *swells* de sul durante a primavera e verão boreal e de *swells* de norte que ocorre especialmente durante outono e inverno boreal (COSTA, 2016; AMBROSIO et al., 2022). Consequentemente, a exposição da face setentrional da ilha a ação dessas ondas mais energéticas vindas do quadrante norte, pode contribuir para a maior erosão e instabilidade dos perfis de praia nos meses que compreendem o outono e inverno do hemisfério norte.

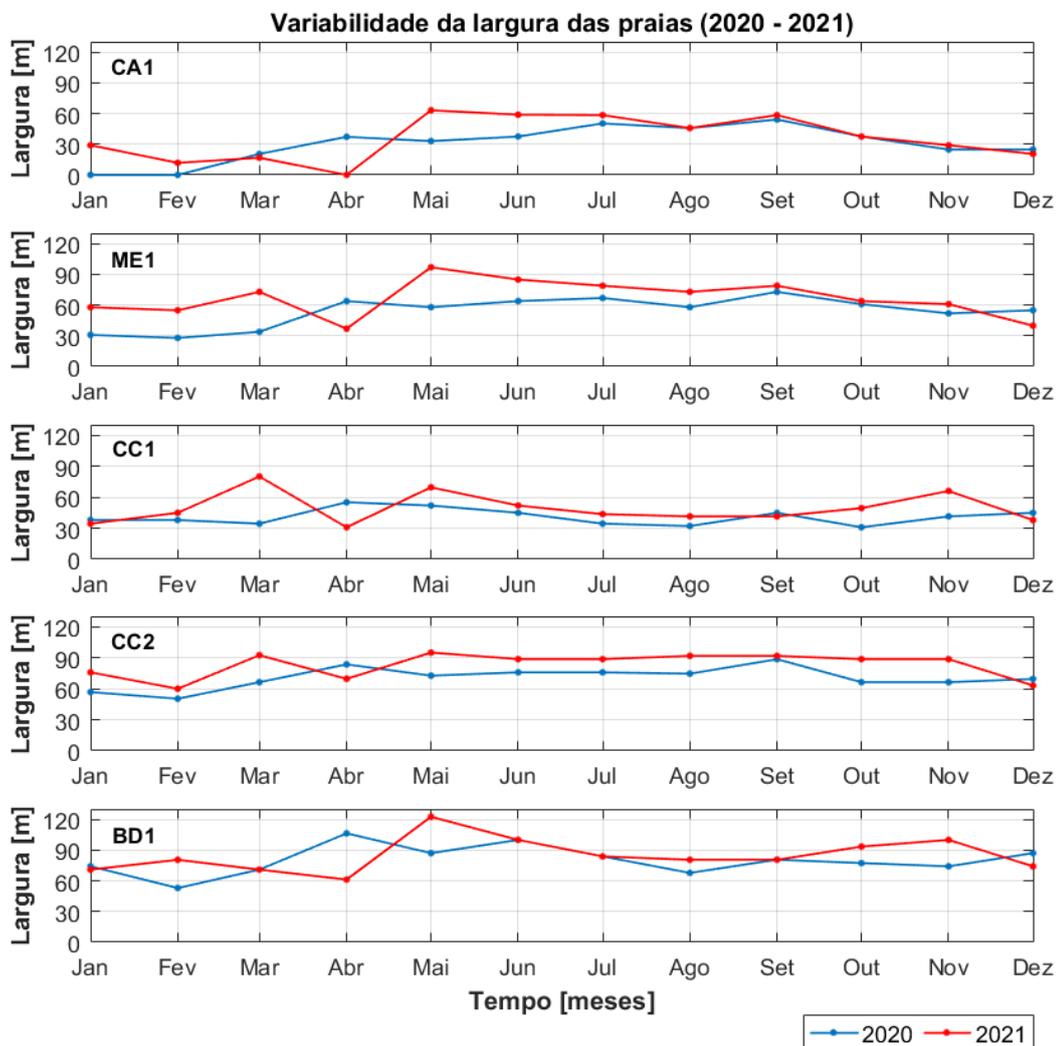
De certa forma, este padrão geral se mantém na escala interanual, havendo semelhanças na variabilidade mensal das larguras de praia representativas dos anos de 2020 e 2021, ainda que existam alguns meses que apresentam variação contrária (por exemplo, abril, maio e dezembro). Além disso, os resultados não apontam tendência a existência de processos erosivos na escala interanual durante o biênio analisado.

Menores larguras de praia são observadas nos perfis CA1 e CC1 relativamente aos demais, com larguras máximas inferiores a 90 m. Já as maiores larguras de praia ocorrem no perfil BD1, atingindo máximo de aproximadamente 120 m. Quanto à mobilidade dos perfis de praia, aqui avaliados pelo desvio padrão e pela diferença máxima das larguras medidas, notamos uma maior variabilidade nas praias do Cachorro, Meio e Boldró, e menor mobilidade na praia da Conceição. Isso pode ser explicado pelo fato de a praia da Conceição ser a praia mais extensa e aberta dentre as outras praias investigadas, o que contribui para um maior aporte e estoque de sedimentos (Tabela 4.3).

A única praia que apresentou erosão total do perfil de praia emerso (meses de janeiro e fevereiro de 2020), com perda do sedimento arenoso e exposição do material sedimentar rochoso, foi a praia do Cachorro. Essa praia diferencia-se das demais praias analisadas, por se tratar de uma praia menos extensa e mais confinada entre promontórios rochosos, o que restringe o aporte sedimentar via correntes de deriva litorânea, podendo limitar a espessura de sedimentos arenosos depositados sobre o perfil de praia (Figura 4.5; Tabela 4.3).

É importante ressaltar que pode haver alguma incerteza nas medições de largura de praia, principalmente na identificação da posição da linha d'água através das imagens de satélite. A frequente ocorrência de nuvens na região, devido a influência da Zona de Convergência

Intertropical (ZCIT), limitou a seleção das imagens a serem analisadas. A cor clara da areia predominantemente calcária e da água do mar com baixa concentração de material particulado, e a quebra de ondas formando espuma bem próximo à face praial em um perfil de praia mais próximo ao refletivo, dificultaram a exata definição da posição da linha d'água. Adicionalmente, deve-se considerar que não foi aplicada nenhuma correção dos efeitos da maré nas medições de largura de praia, portanto, existe certa interferência do nível da água no instante do imageamento sobre a posição da linha de costa mapeada, que se acentua em perfis menos íngremes. Por fim, o tamanho do pixel das imagens (aproximadamente 3 m) também pode gerar incertezas, especialmente nas praias menores.



**Figura 4.5** Variabilidade mensal da largura das praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1) ao longo dos anos de 2020 e 2021.

**Tabela 4.3** Estatística descritiva básica da largura de praia (em metros).

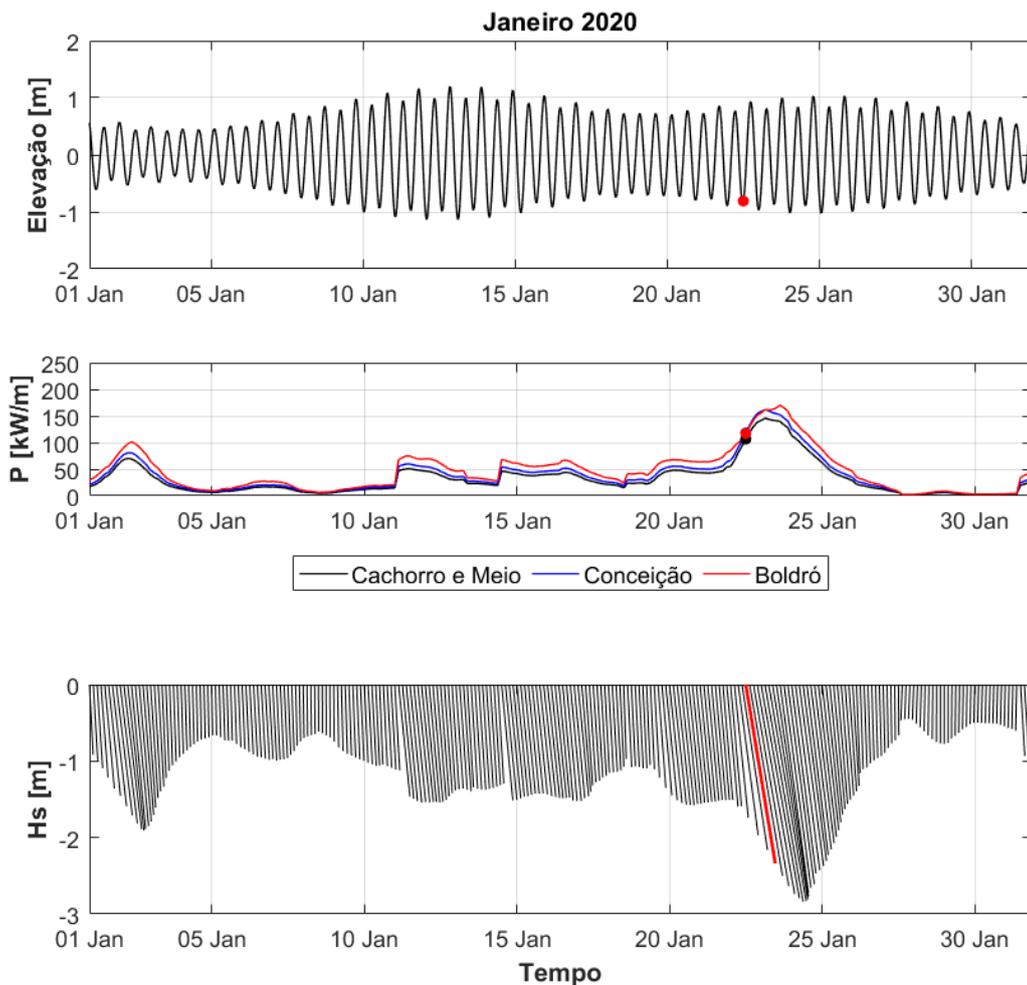
Largura [m]	CA1	ME1	CC1	CC2	BD1
<b>Mínima</b>	0,0	27,8	30,9	50,3	52,9
<b>Média</b>	33,1	60,1	45,1	76,6	82,5
<b>Máxima</b>	63,1	96,8	80,0	94,9	122,5
<b>Desvio padrão</b>	19,2	17,3	12,5	12,8	15,4
<b>Diferença máxima</b>	63,1	69,0	49,1	44,6	69,6

As Figuras 4.6 a 4.29 mostram as séries temporais da maré astronômica (em metros), da força de ondas (em kW/m) e dos vetores de direção da altura significativa de onda na costa para cada mês dos anos de 2020 (Figuras 4.6 a 4.17) e 2021 (Figuras 4.18 a 4.29), indicando o instante da tomada da imagem de satélite selecionada para o mês. É possível analisar a elevação do nível da água devido à ação da maré astronômica e da força de onda atuantes na costa no momento do imageamento por satélite. Além disso, pode-se observar a direção predominante de incidência de onda na costa, apresentada juntamente com a magnitude da altura significativa correspondente. Note que há pouca variação da direção de incidência das ondas, pois no ponto analisado (isóbata de 5 m) a onda já encontra-se refratada. Adicionalmente, as Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam a estatística básica das séries temporais mensais da força de onda que atinge as praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, durante os anos de 2020 e 2021.

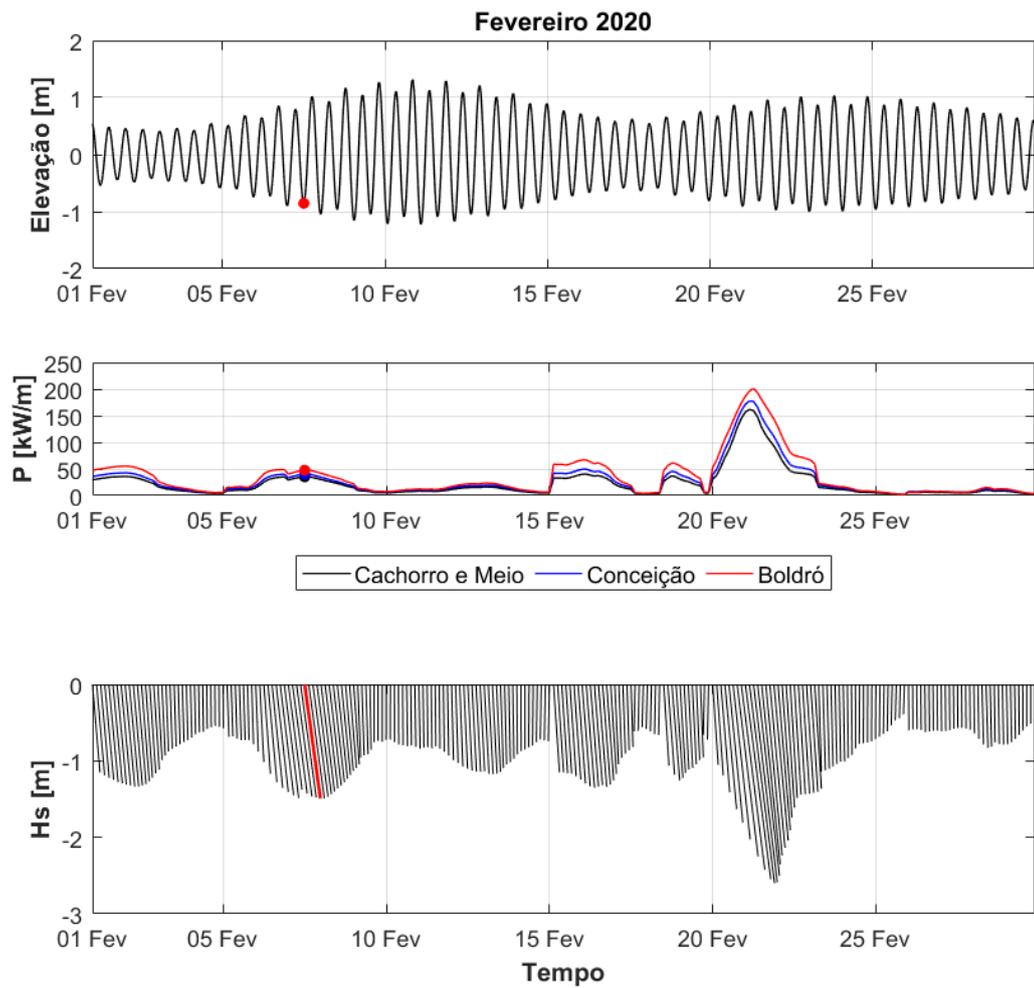
Analisando a variabilidade temporal da força de onda que atinge a costa setentrional de Fernando de Noronha mensalmente, percebemos que há uma redução expressiva da força de onda entre os meses de maio a setembro (Figuras 4.10 a 4.14; Figuras 4.22 a 4.26), quando o clima de ondas da região é dominado pela combinação da incidência de vagas de leste e sudeste e de *swells* de sul. A partir do mês de outubro até o mês de abril (Figuras 4.15 a 4.17; Figuras 4.6 a 4.9; Figuras 4.27 a 4.29; Figuras 4.18 a 4.21), tem-se a ocorrência de *swells* de norte, ocasionando picos de alta energia de onda na costa norte do arquipélago. Portanto, a variabilidade mensal da força de onda incidente na costa é coerente com as características do clima de ondas local e sua sazonalidade, como descrito por Costa (2016) e Ambrosio et al. (2022). Além disso, a variabilidade da força de onda, em resposta à sazonalidade do clima de ondas expondo alternadamente as porções norte e sul da plataforma insular às condições de ondas mais energéticas, também mostrou-se coerente com o padrão geral de variabilidade da largura de praia, discutido anteriormente e apresentado na Figura 4.5.

O mês de fevereiro foi caracterizado por produzir maiores forças de onda em todas as praias analisadas, tanto no ano de 2020 (mínimo de 1,76 kW/m e máximo de 201,07 kW/m) quanto no ano de 2021 (mínimo de 1,52 kW/m e máximo de 137,69 kW/m) (Tabelas 4.4 e 4.5).

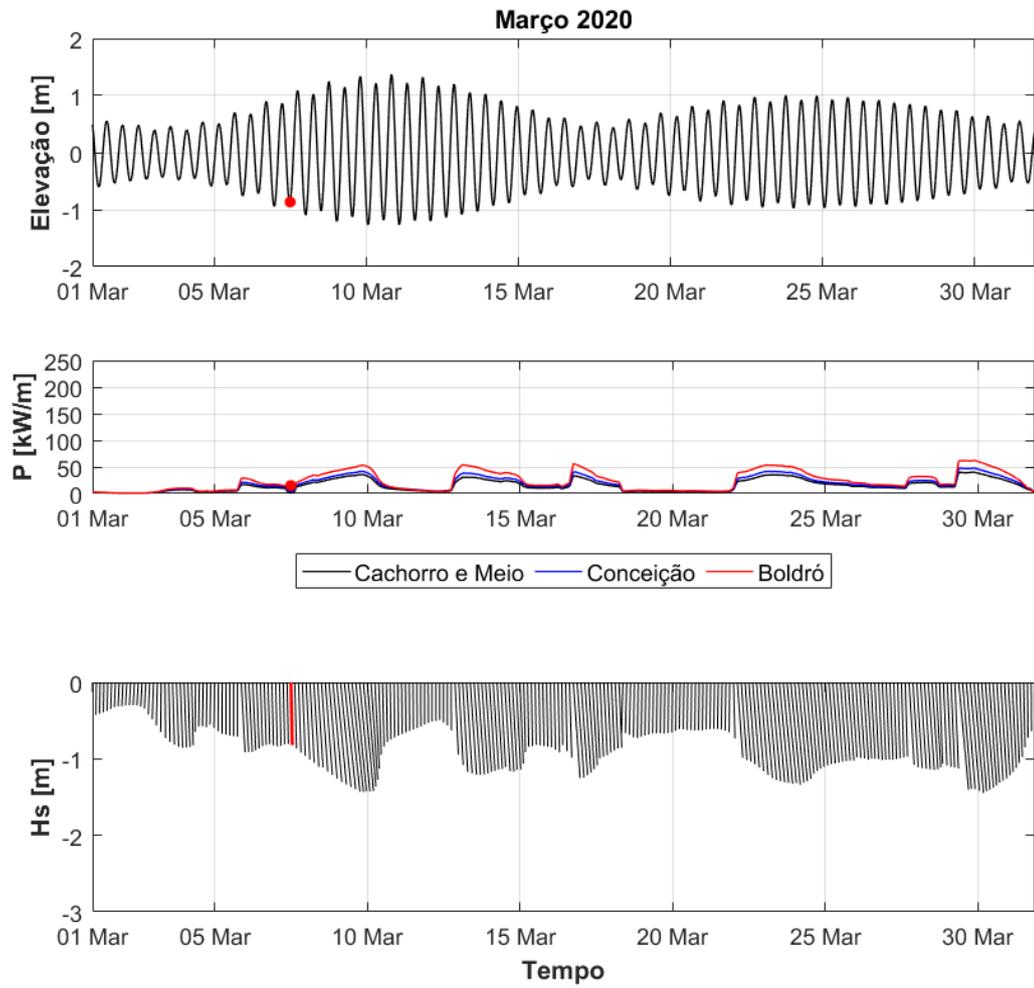
Ao observar a variabilidade espacial da força de onda, isto é, as variações entre as praias investigadas neste estudo, notamos uma sutil diferença com o nível de energia de onda aumentando de nordeste para sudoeste (da praia do Cachorro em direção a Boldró). Isso pode ser observado nas diferenças entre as séries temporais mensais da força de onda obtida em cada praia (Figura 4.5 e Tabelas 4.4 e 4.5). As praias do Cachorro e Meio são praias embaiadas, confinadas entre promontórios rochosos, menos extensas e voltadas mais para norte-nordeste. Esses fatores, juntamente com as características da morfologia do fundo, podem ser responsáveis por uma menor força de onda atingindo essas praias. Por sua vez, as praias Conceição e Boldró são mais abertas e extensas, voltadas para norte-noroeste e ambas apresentam fundo mais irregular (rochoso) em sua porção sudoeste, como pode ser visualizado na imagem de satélite da Figura 4.2, e todas essas características fazem com que essas praias concentrem maior energia de onda.



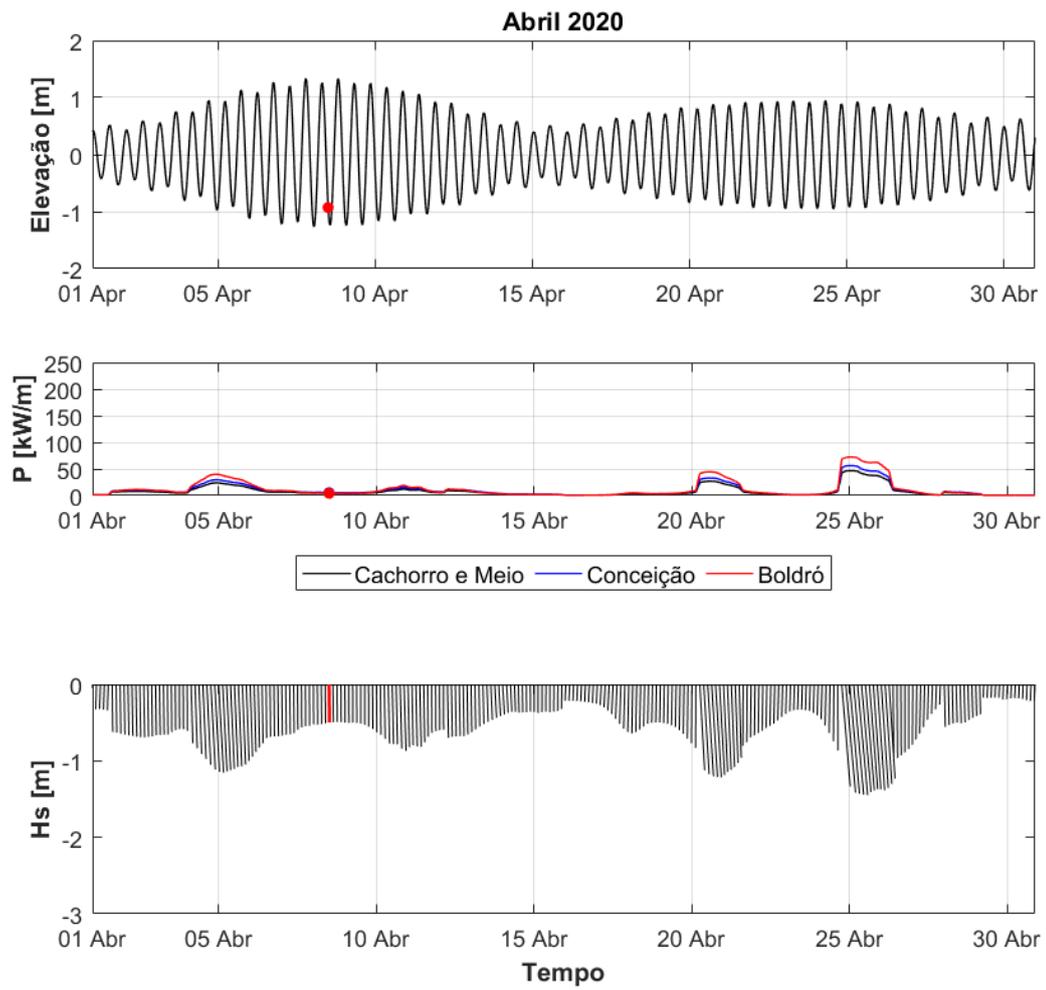
**Figura 4.6** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de janeiro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



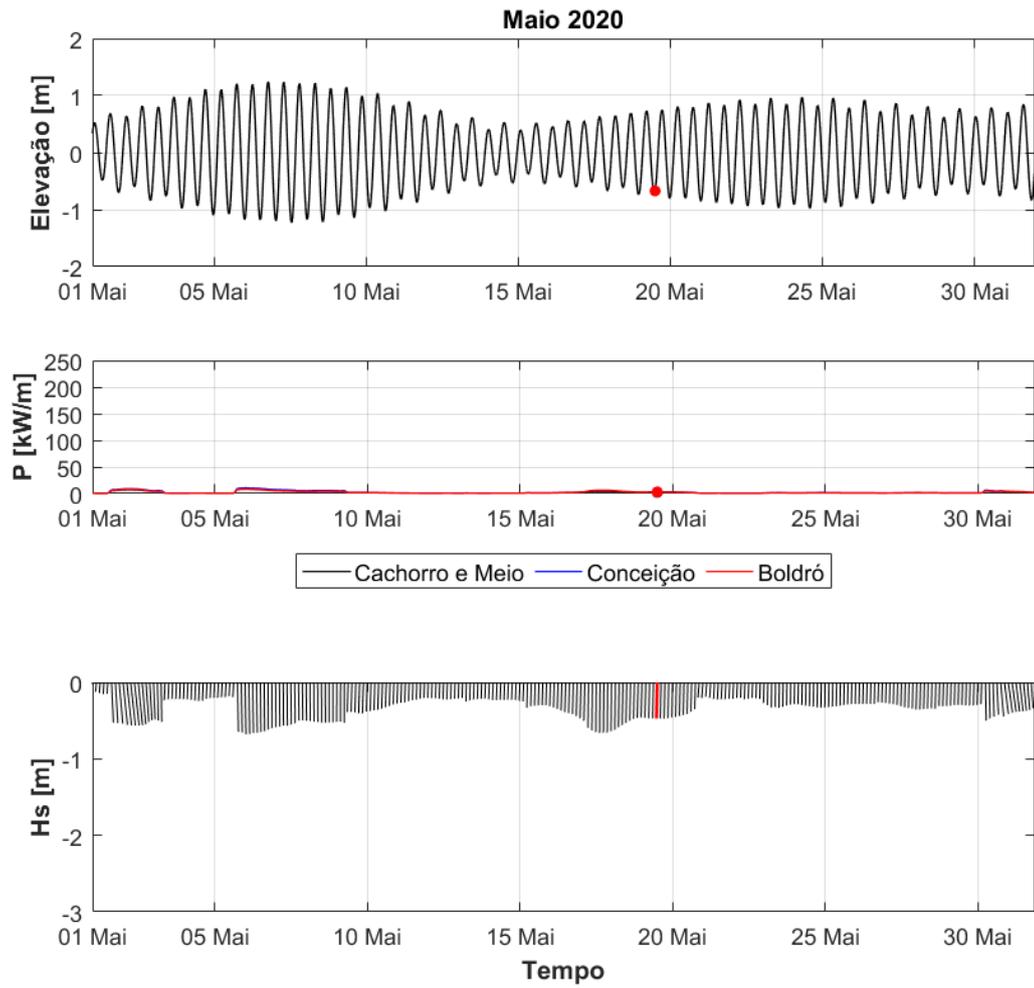
**Figura 4.7** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de fevereiro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



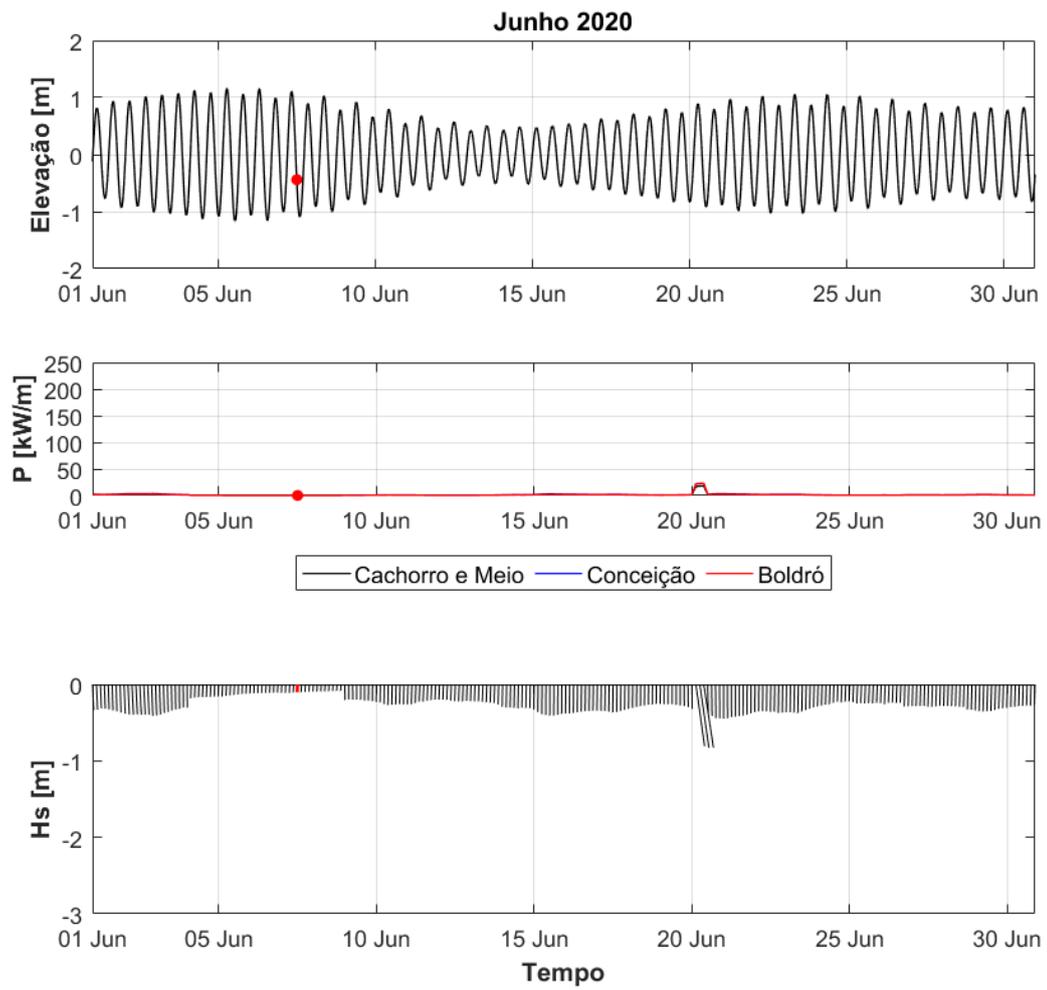
**Figura 4.8** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de março de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



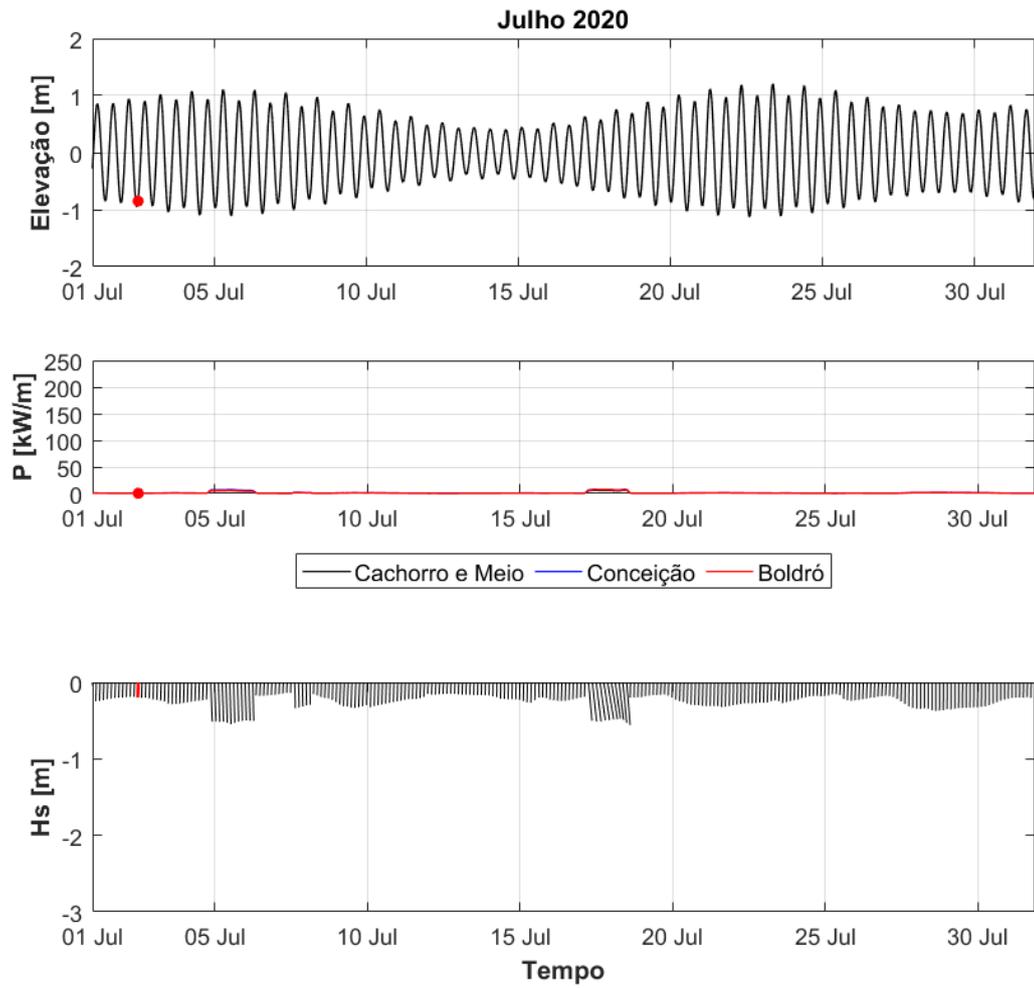
**Figura 4.9** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de abril de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



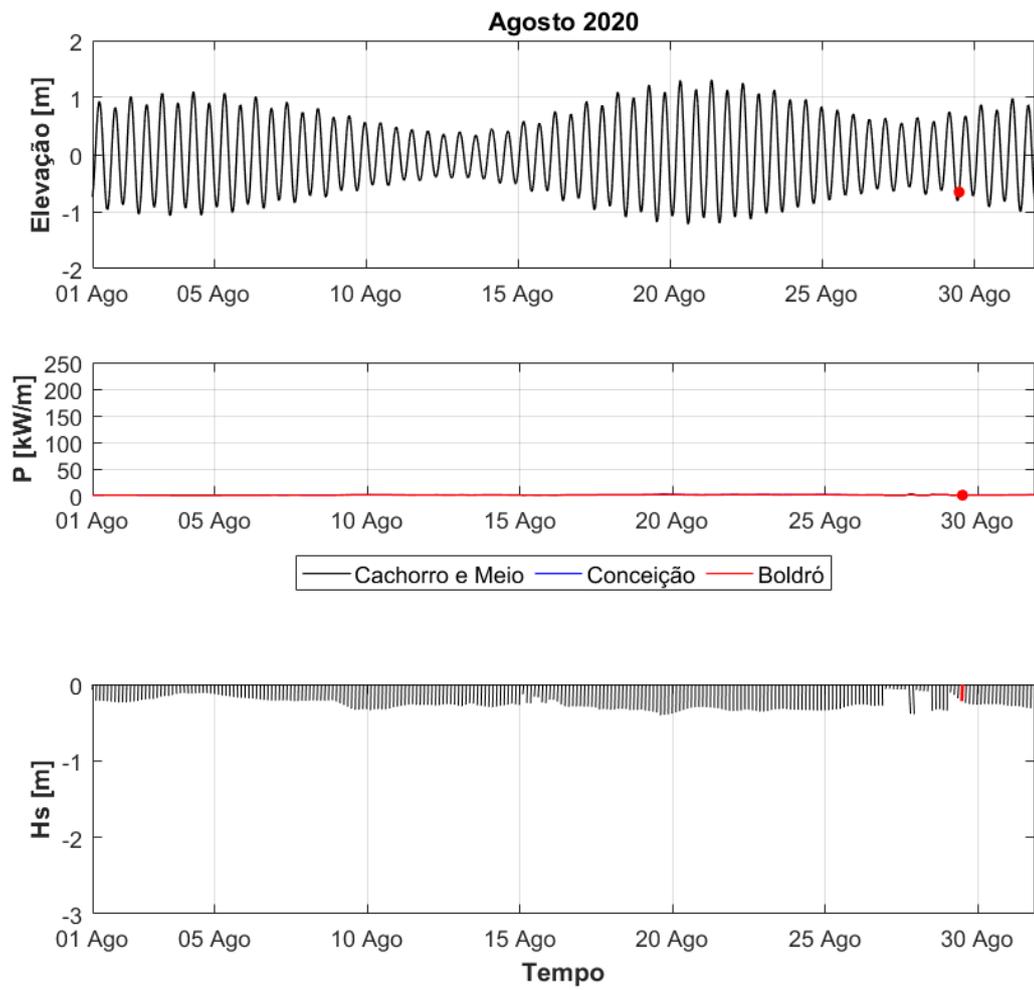
**Figura 4.10** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de maio de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



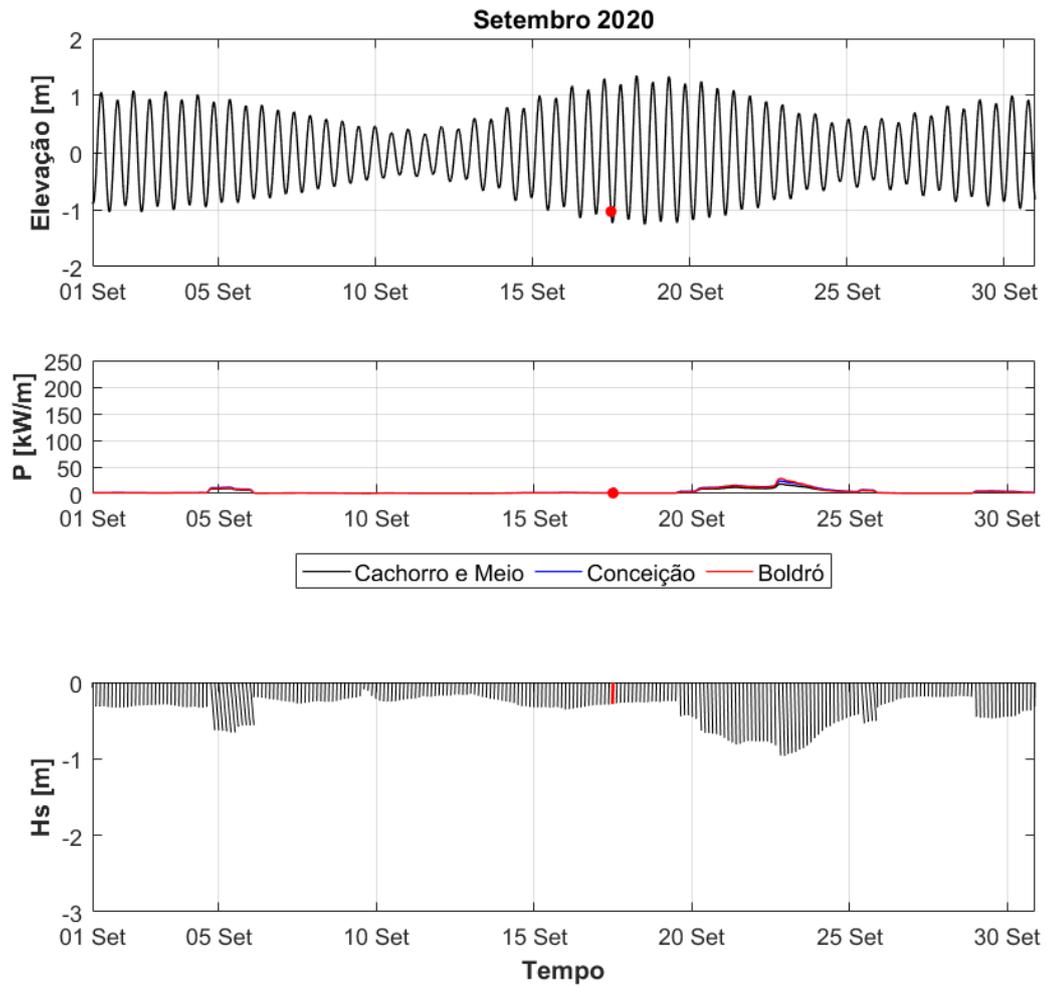
**Figura 4.11** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de junho de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



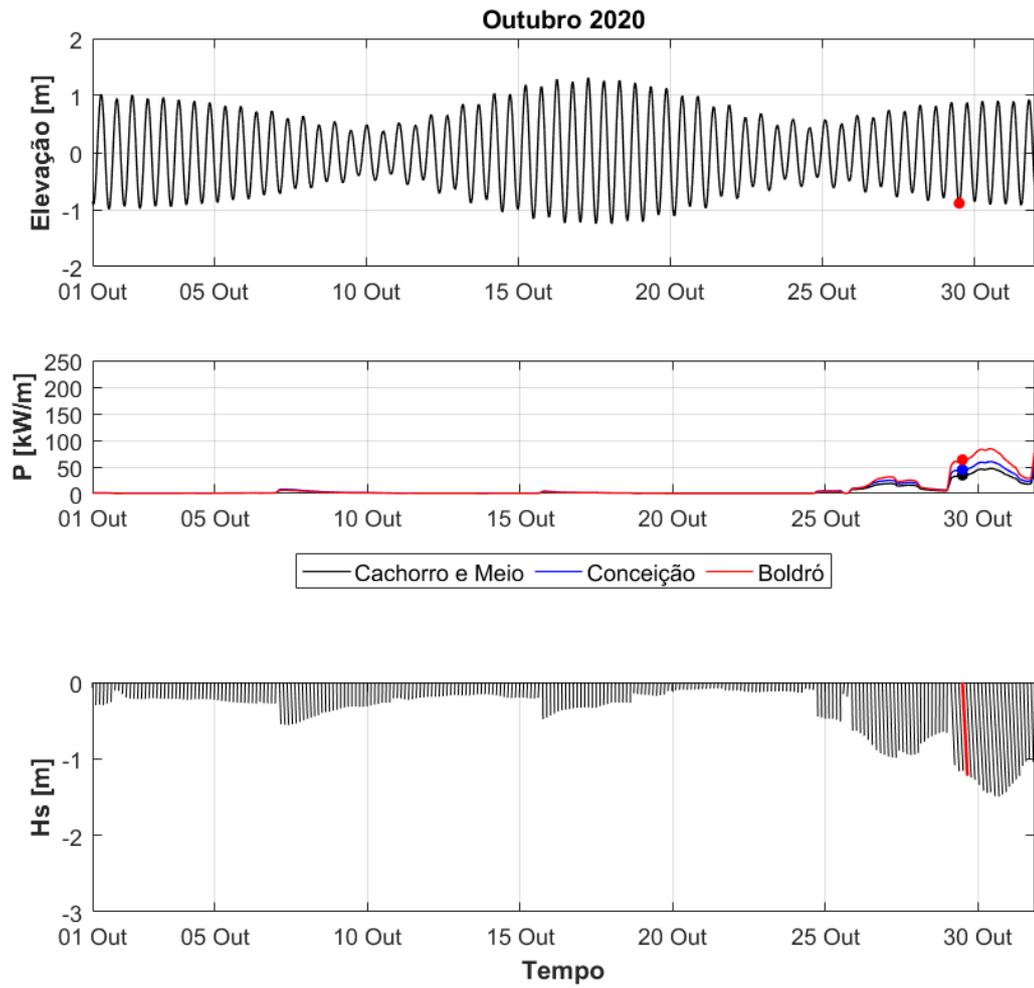
**Figura 4.12** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de julho de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



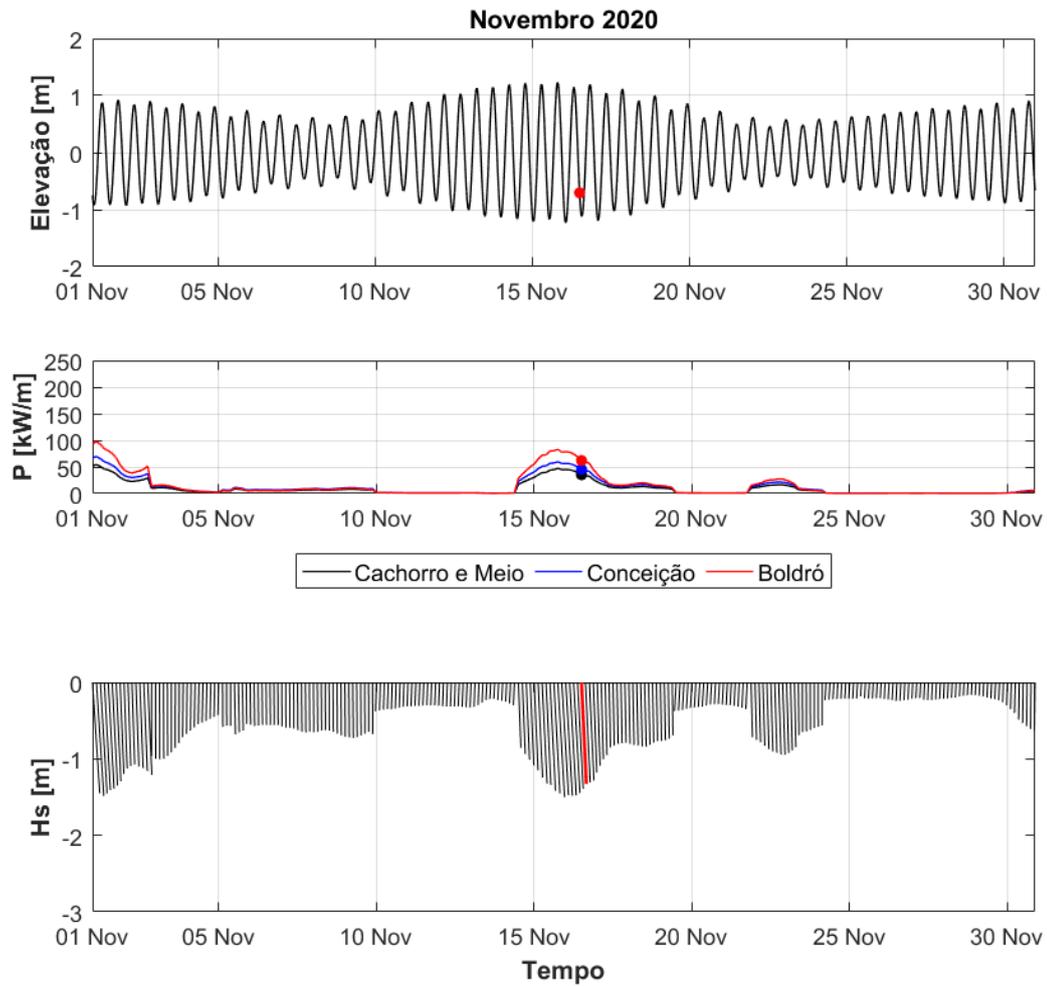
**Figura 4.13** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de agosto de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



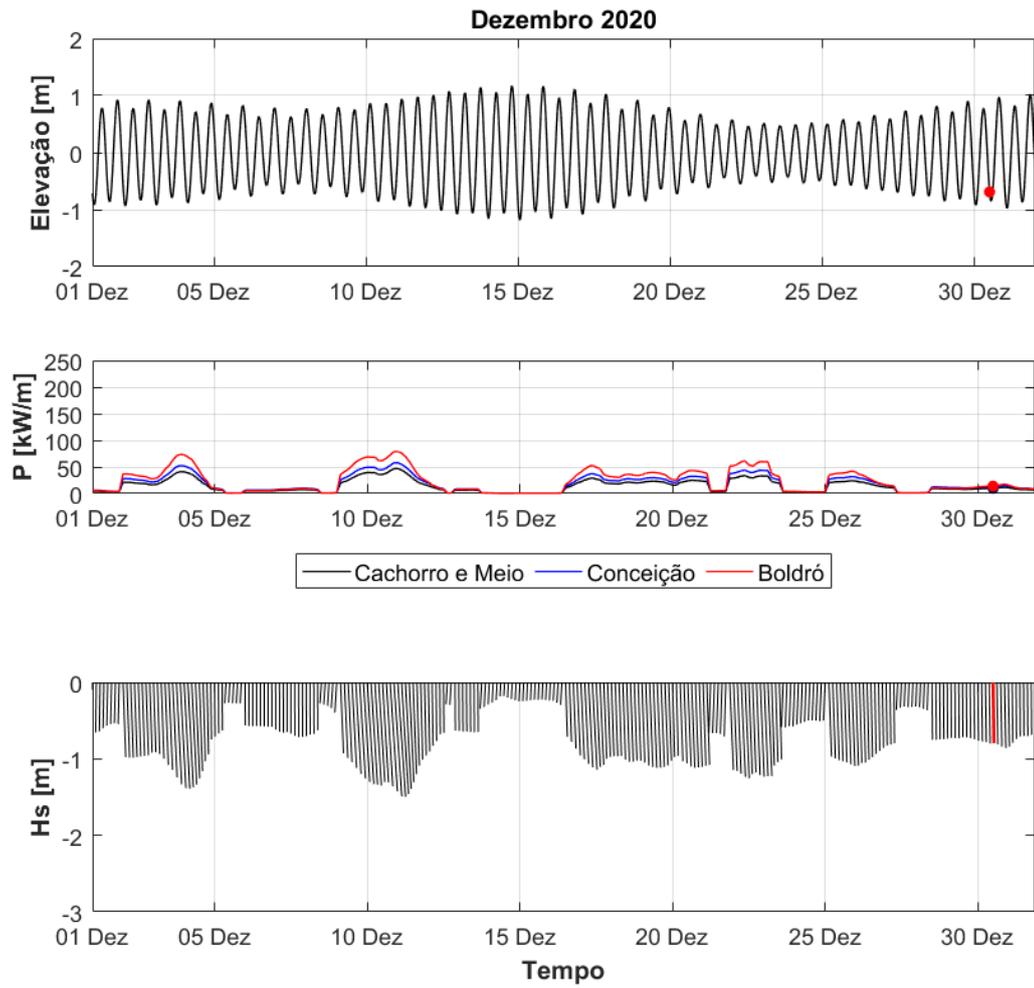
**Figura 4.14** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de setembro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



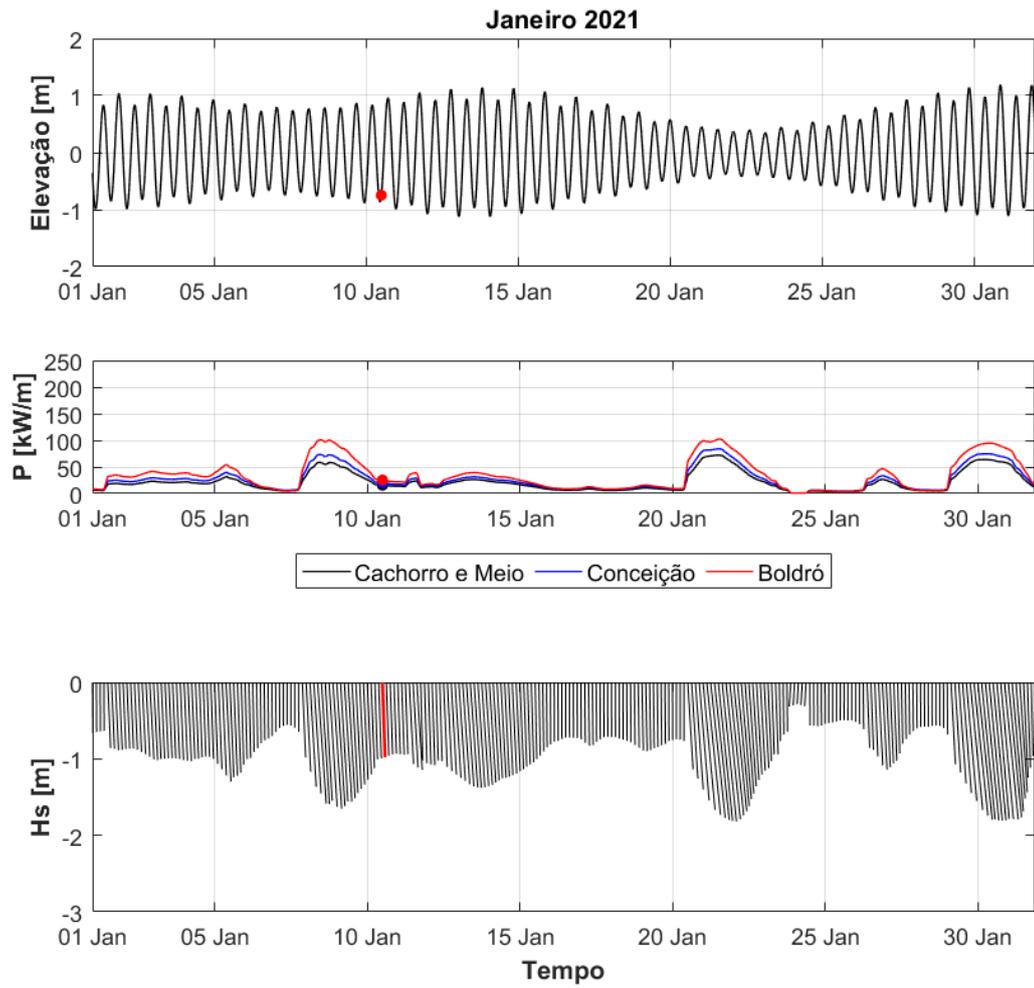
**Figura 4.15** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de outubro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



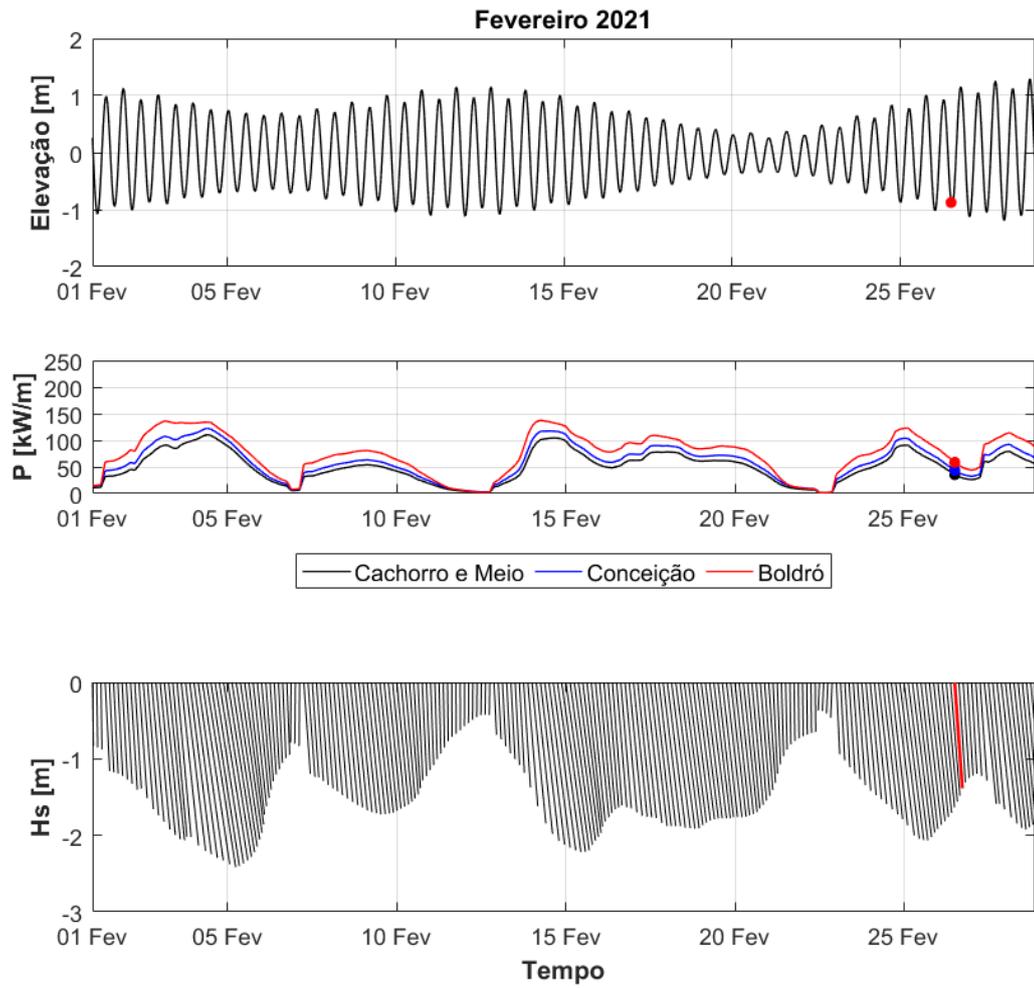
**Figura 4.16** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de novembro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



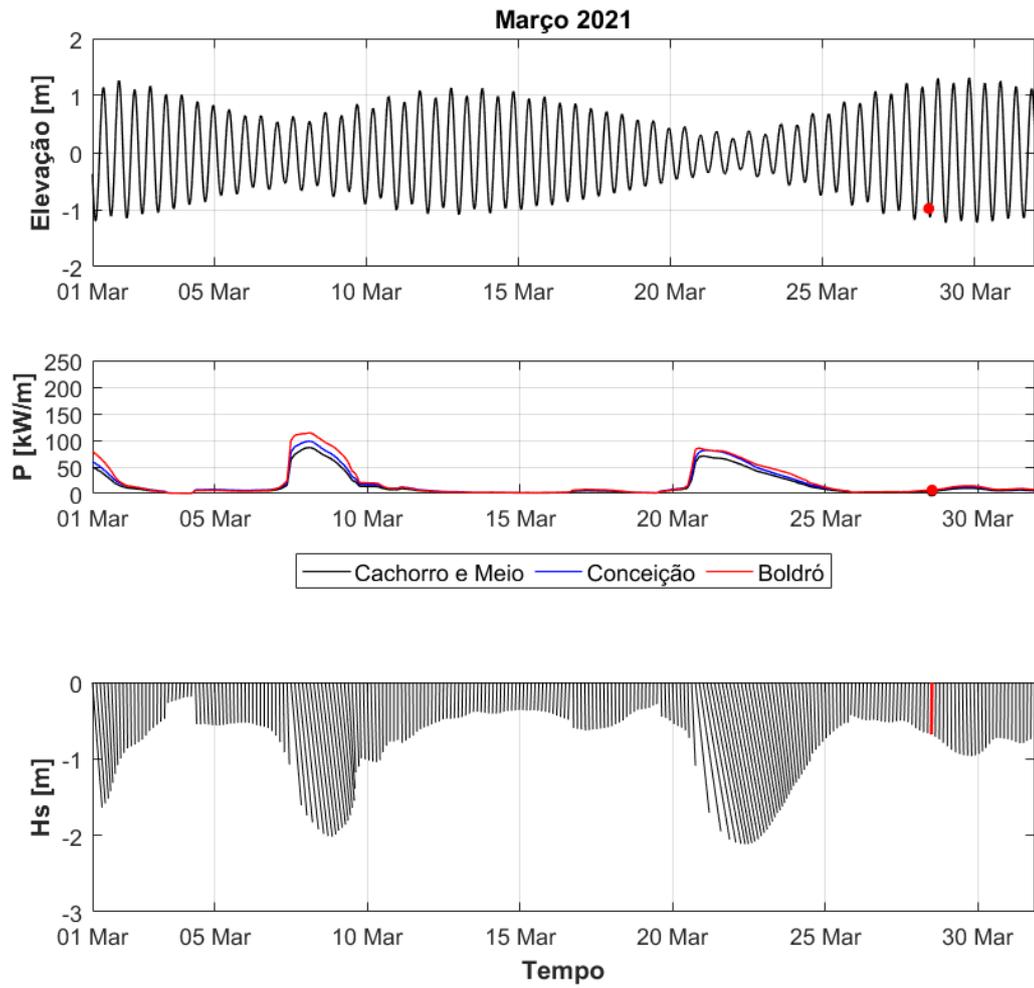
**Figura 4.17** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de dezembro de 2020, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



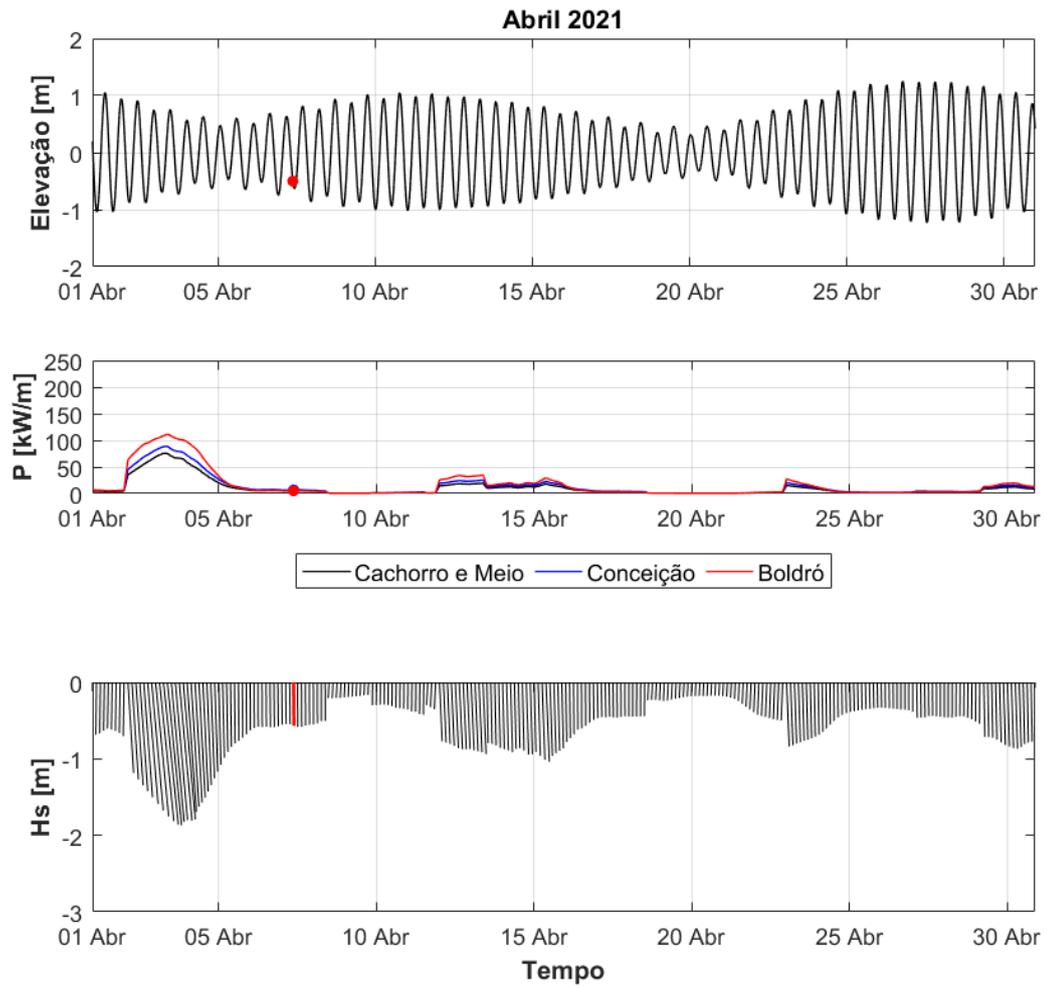
**Figura 4.18** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de janeiro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



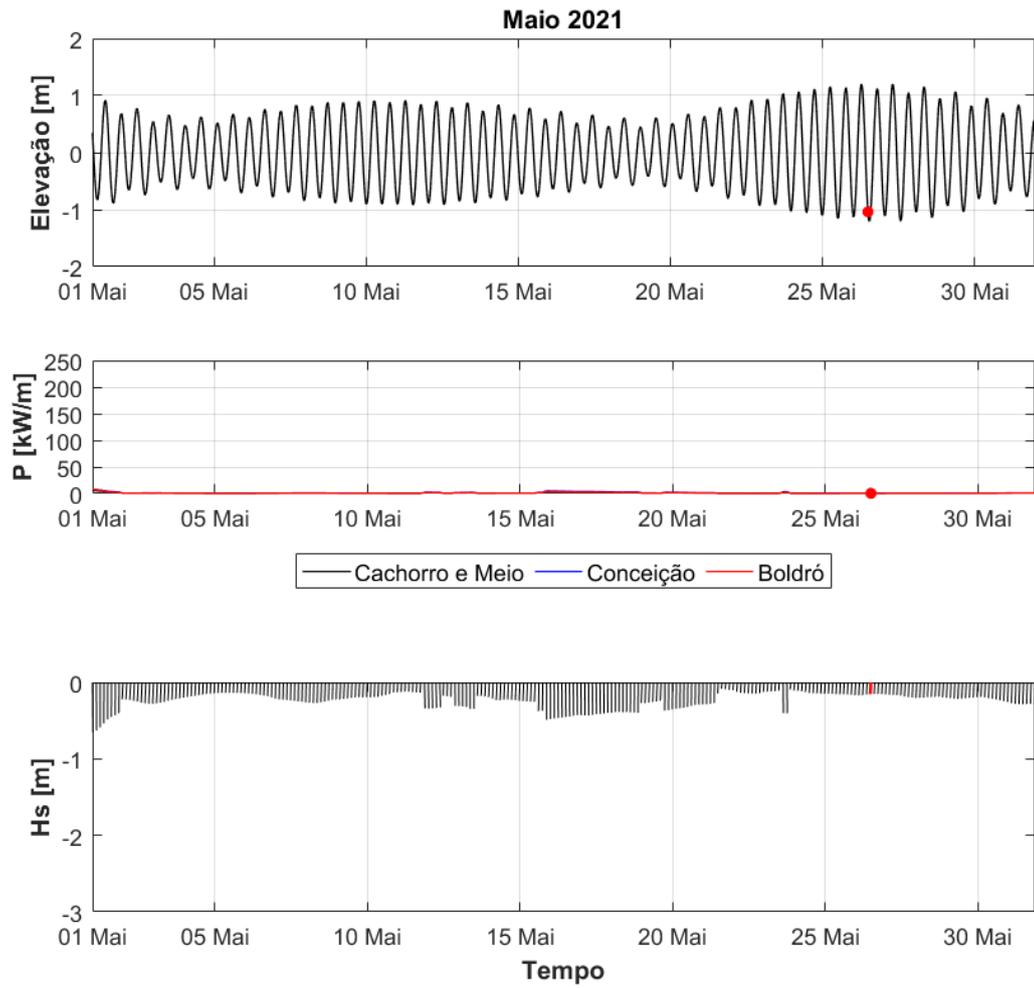
**Figura 4.19** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de fevereiro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



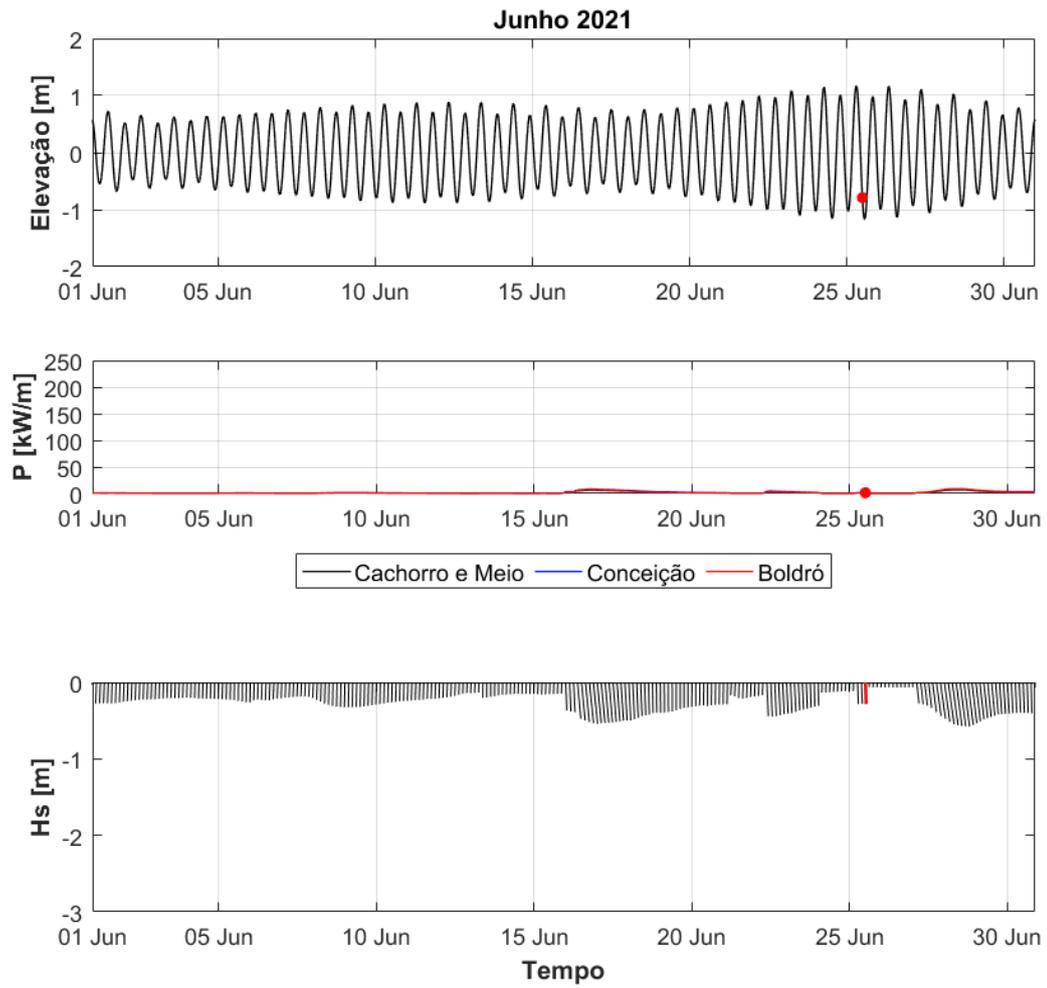
**Figura 4.20** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de março de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



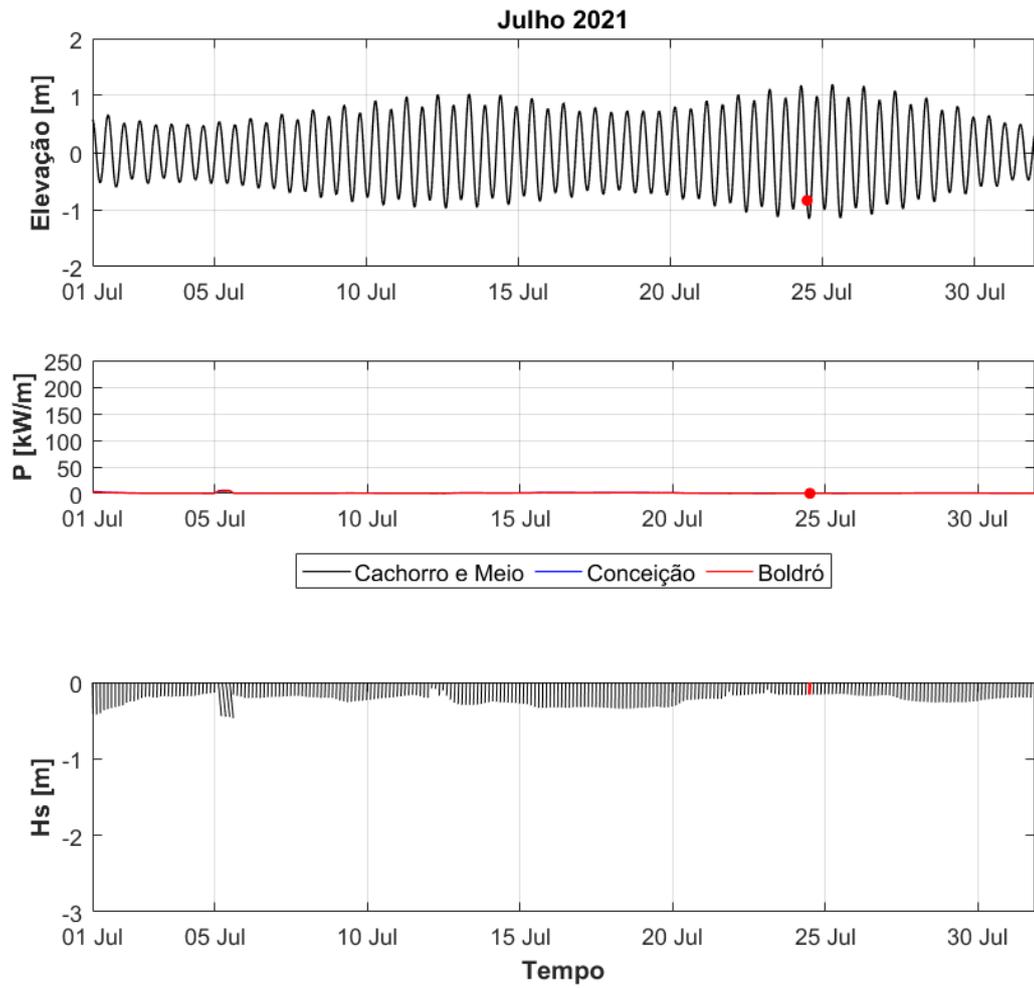
**Figura 4.21** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de abril de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



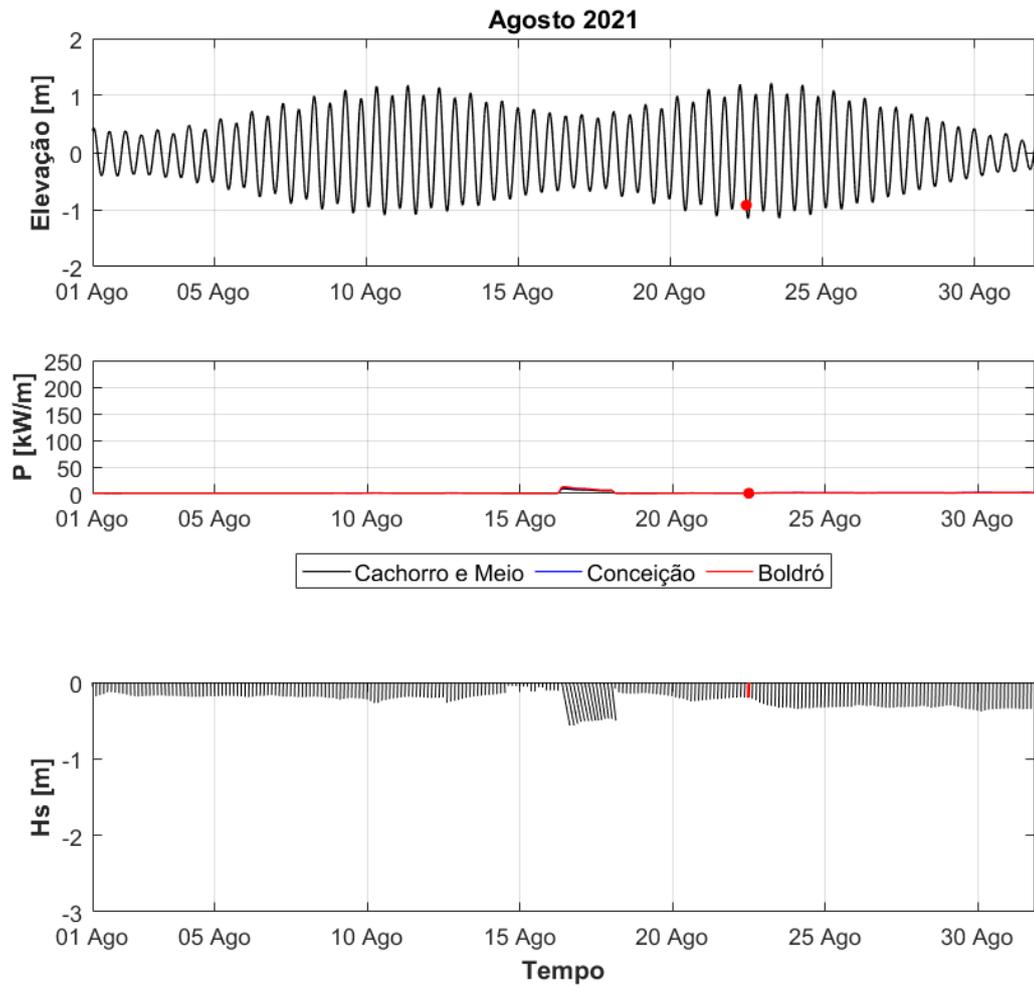
**Figura 4.22** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de maio de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



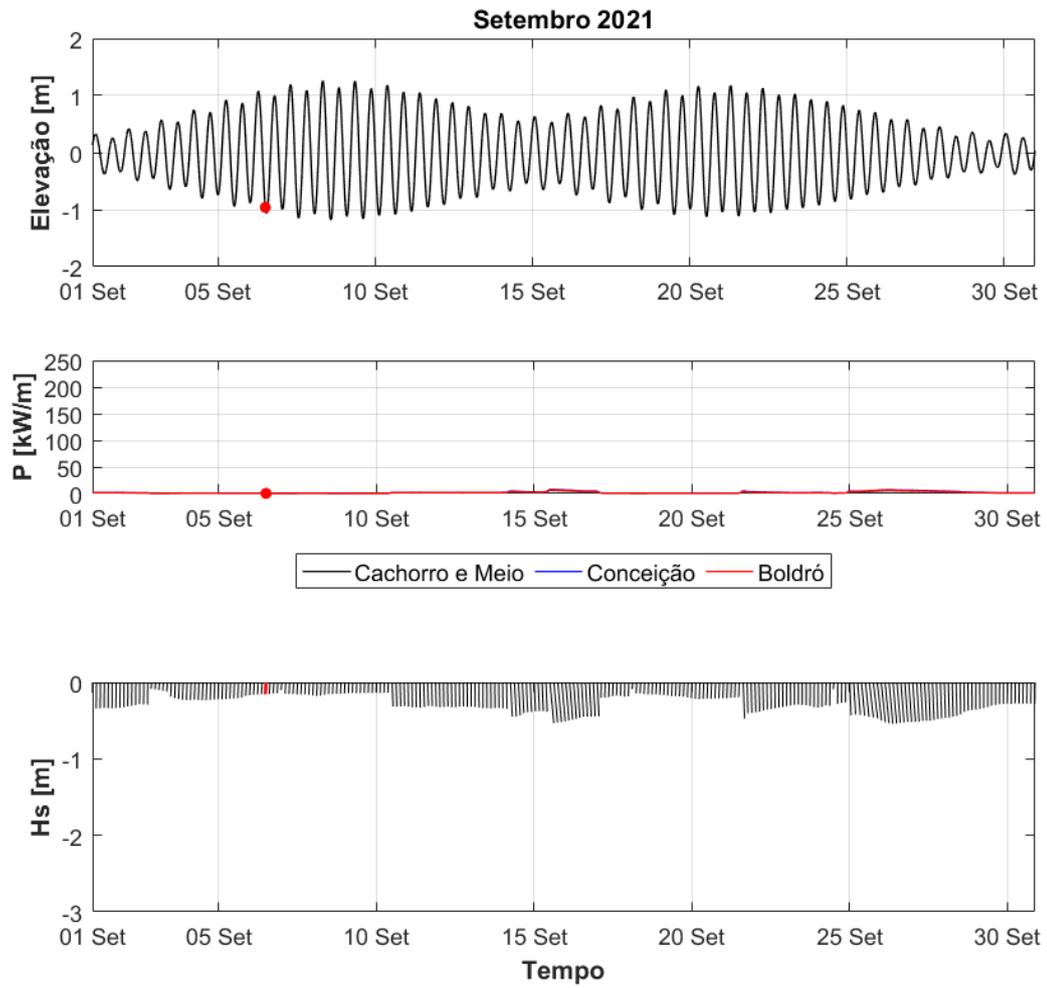
**Figura 4.23** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de junho de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



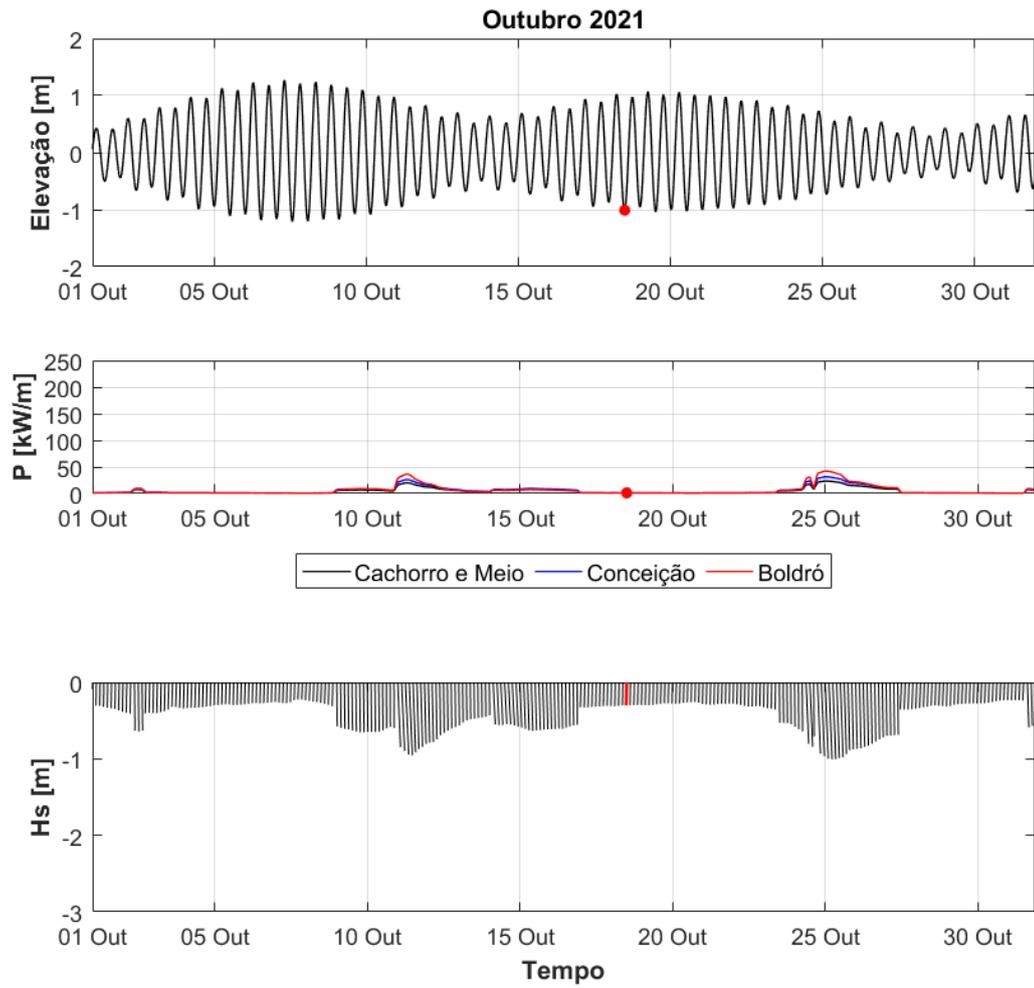
**Figura 4.24** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de julho de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



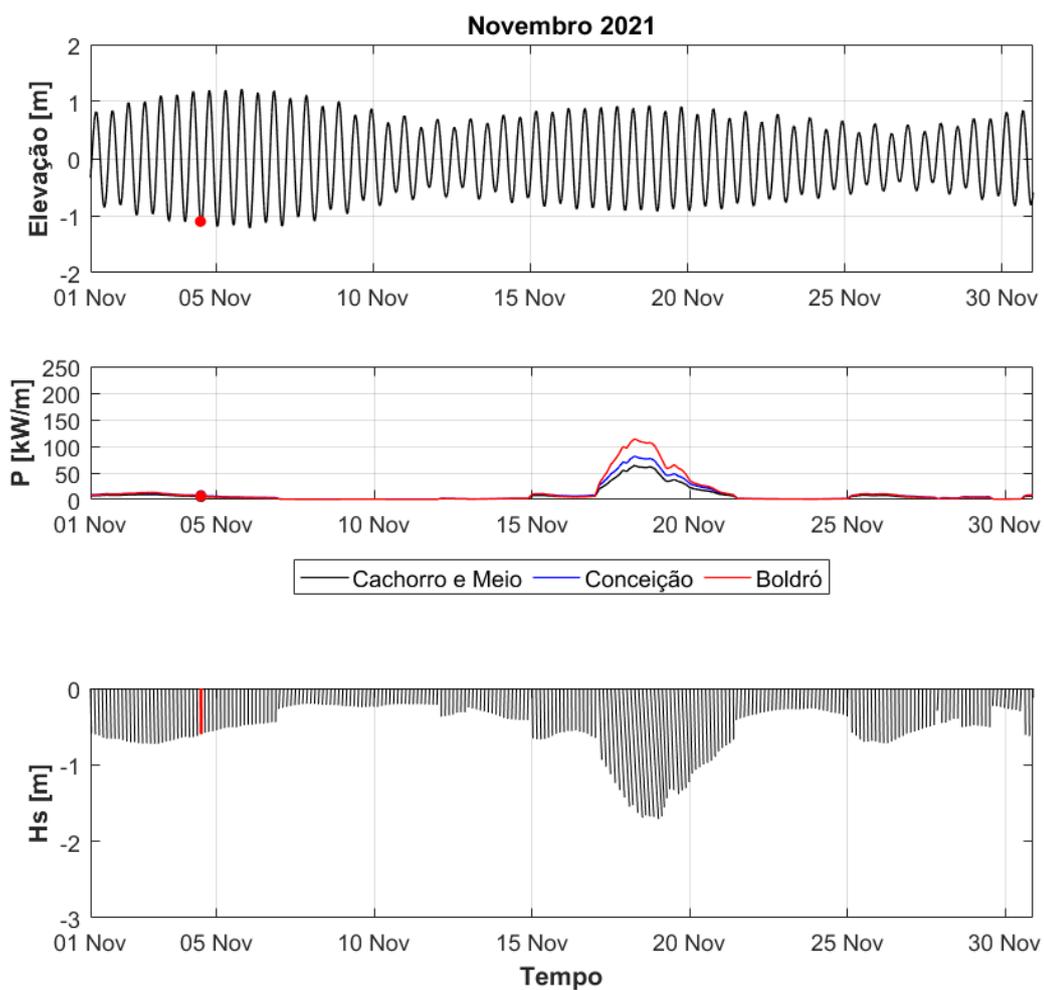
**Figura 4.25** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de agosto de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



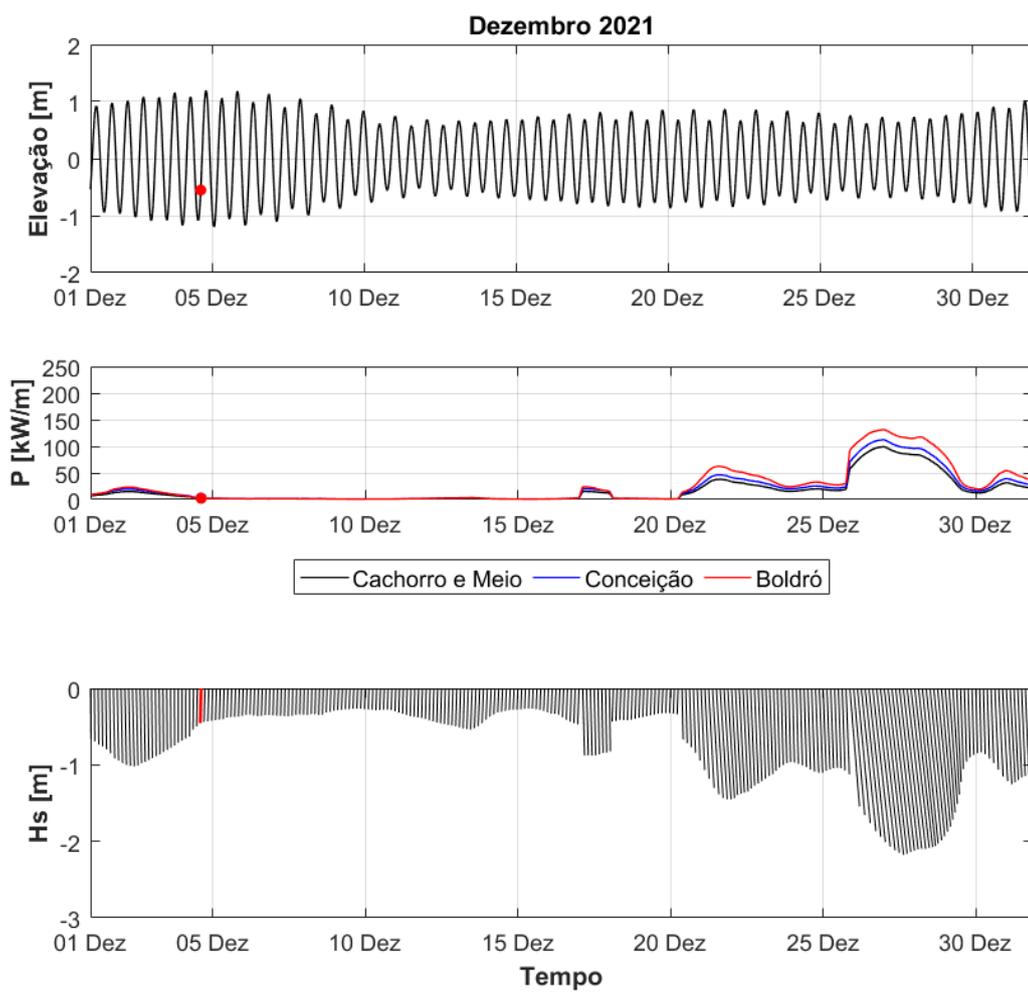
**Figura 4.26** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de setembro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



**Figura 4.27** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de outubro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



**Figura 4.28** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de novembro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.



**Figura 4.29** Variação da maré, da força de onda e dos vetores de direção da altura significativa de onda ao longo do mês de dezembro de 2021, com indicação do instante da tomada da imagem de satélite selecionada.

**Tabela 4.4** Estatística descritiva básica da força de onda (em kW/m) que atinge as praias investigadas durante cada mês do ano de 2020.

Força de onda [kW/m]									
2020	Cachorro e Meio			Conceição			Boldró		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
Jan	1,88	32,54	145,92	2,41	38,01	162,31	2,40	45,90	170,33
Fev	1,76	23,12	161,86	2,17	27,84	177,47	1,89	34,51	201,07
Mar	0,75	15,10	40,34	0,93	18,43	47,85	0,99	23,44	62,39
Abr	0,42	8,08	46,61	0,43	10,14	56,14	0,36	11,87	72,38
Mai	0,27	2,17	8,24	0,23	2,66	10,55	0,20	2,30	8,58
Jun	0,12	1,43	17,95	0,10	1,67	23,20	0,09	1,41	23,08
Jul	0,28	1,28	6,65	0,26	1,47	8,14	0,23	1,27	7,73
Ago	0,08	1,05	2,69	0,05	1,18	3,14	0,05	0,95	2,76
Set	0,16	3,02	17,71	0,12	3,76	23,42	0,11	3,46	28,13
Out	0,11	5,40	47,26	0,09	6,89	61,06	0,08	8,51	85,78
Nov	0,39	9,10	54,29	0,38	11,74	69,70	0,33	14,40	97,44
Dez	0,47	14,23	46,80	0,43	18,45	57,77	0,38	23,35	78,92

**Tabela 4.5** Estatística descritiva básica da força de onda (em kW/m) que atinge as praias investigadas durante cada mês do ano de 2021.

Força de onda [kW/m]									
2021	Cachorro e Meio			Conceição			Boldró		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
Jan	0,90	21,75	72,10	0,99	26,91	84,11	0,97	34,27	102,64
Fev	1,52	50,28	110,40	1,80	59,34	122,41	1,64	74,07	137,69
Mar	0,50	15,30	86,61	0,49	18,42	98,52	0,42	20,73	114,19
Abr	0,39	10,36	75,48	0,38	12,97	88,83	0,33	15,66	111,69
Mai	0,14	1,02	6,19	0,10	1,18	8,15	0,09	0,97	8,03
Jun	0,08	1,71	7,38	0,05	2,01	8,85	0,05	1,77	8,82
Jul	0,12	0,87	4,86	0,09	0,97	5,87	0,08	0,80	5,40
Ago	0,04	1,16	9,24	0,02	1,31	11,75	0,03	1,20	12,62
Set	0,14	1,73	6,46	0,11	2,02	7,90	0,09	1,73	7,23
Out	0,67	4,53	23,62	0,72	5,78	31,61	0,60	6,02	42,41
Nov	0,55	7,94	64,13	0,56	10,24	81,43	0,48	12,05	114,07
Dez	0,88	17,05	99,49	0,96	20,66	112,63	0,83	25,27	131,57

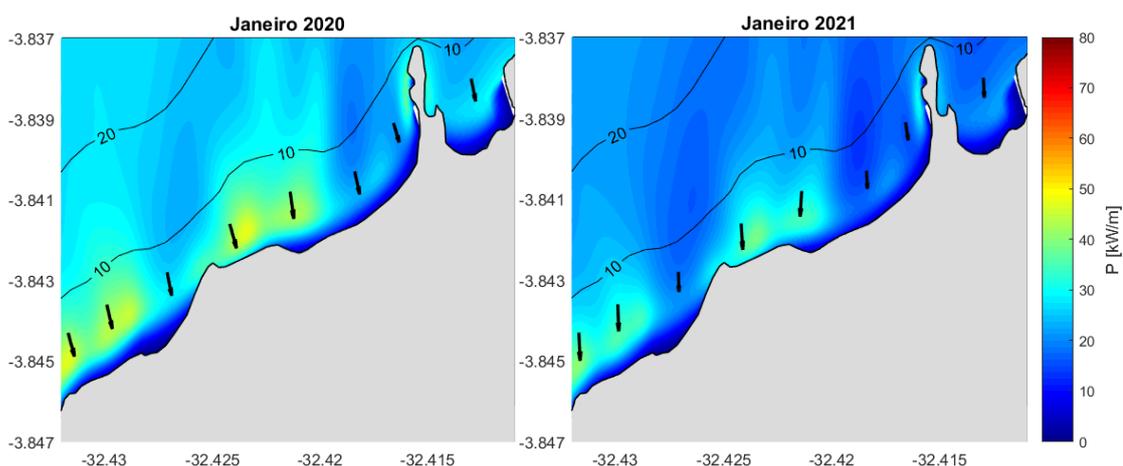
As Figuras 4.30 a 4.41 mostram a distribuição da média mensal da força de onda que atinge a região costeira adjacente às praias investigadas neste estudo, referente aos anos de 2020 e 2021.

Observando a distribuição espacial da força de onda na costa, notamos maiores níveis de energia de onda na parte sudoeste das praias Boldró e Conceição. Essas áreas são caracterizadas por um fundo mais irregular devido à maior concentração de fragmentos rochosos (substrato rochoso), visível nas imagens de satélite (por exemplo, Figura 4.2), que

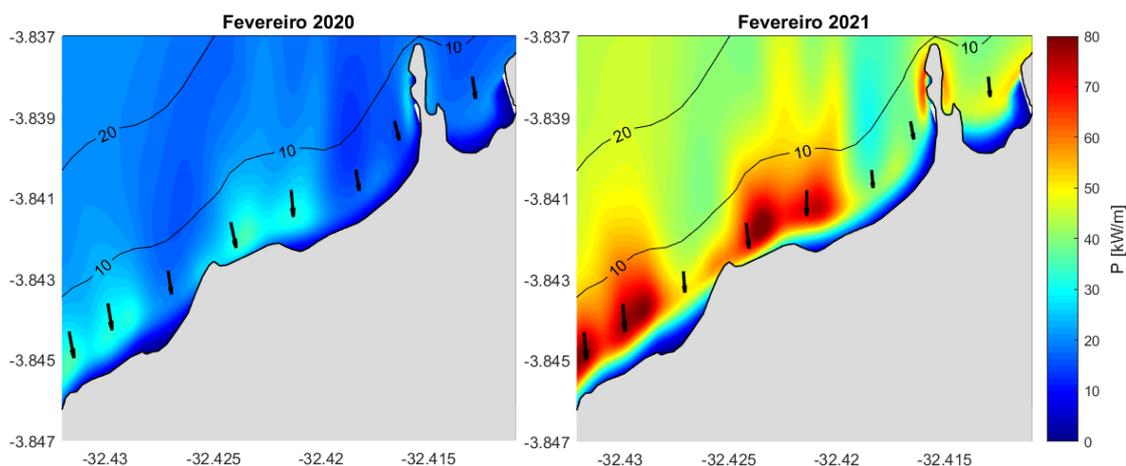
somada aos aspectos geomorfológicos dessas praias pode favorecer a concentração de energia das ondas na costa.

Já quando analisamos a variabilidade temporal da força de onda, em escala mensal, verificamos maiores níveis de energia atingindo a costa entre os meses de outubro e abril, o que está relacionado à variabilidade sazonal do clima de ondas atuante na região do arquipélago e a ocorrência de *swells* de norte neste período do ano (COSTA, 2016; AMBROSIO et al., 2022), aumentando os valores médios de energia de onda que chega nas praias localizadas na porção setentrional da plataforma insular. Nesses meses foram observadas médias mensais com valores em torno de 25 kW/m; os valores máximos foram observados em fevereiro de 2021, atingindo valores de aproximadamente 80 kW/m.

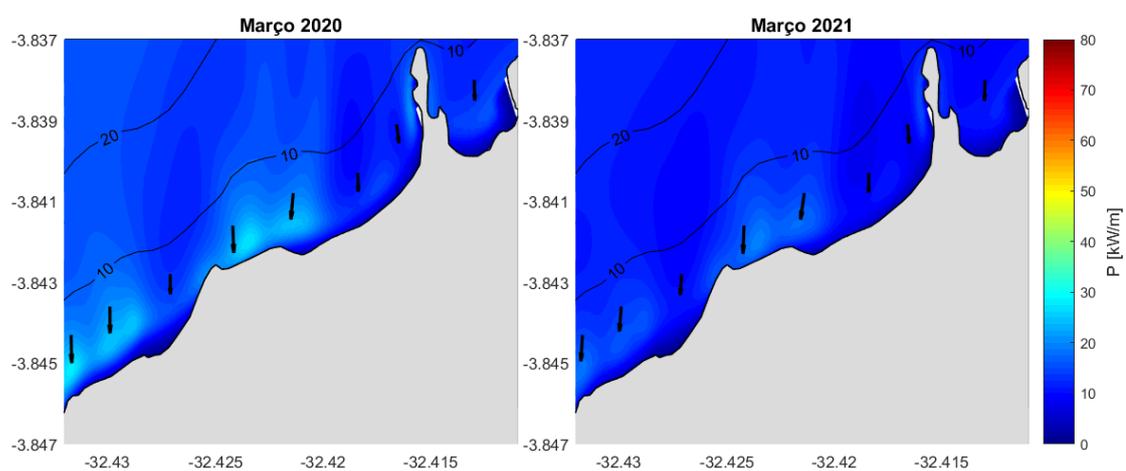
Ao comparar a distribuição da média mensal da força de onda nos anos de 2020 e 2021, avaliando assim as alterações ocorridas em escala interanual, observamos que para alguns meses há uma diferença razoável entre os anos comparados, especialmente nos meses em que a ocorrência de *swells* de norte é mais frequente, como acontece por exemplo nos meses de janeiro, fevereiro, março e dezembro (Figuras 4.30 a 4.32 e Figura 4.41). Isso ocorre porque a incidência de *swells* gera picos de alta energia, com ocorrência esporádica e magnitude variável (como observado nas séries temporais mensais da força de onda apresentadas nas Figuras 4.6 a 4.29), que podem alterar as médias mensais da força de onda.



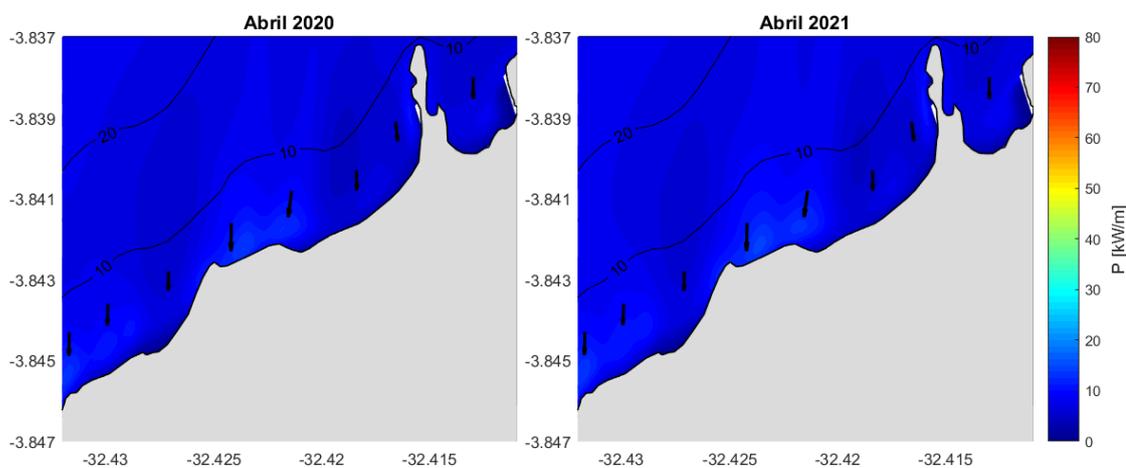
**Figura 4.30** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de janeiro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



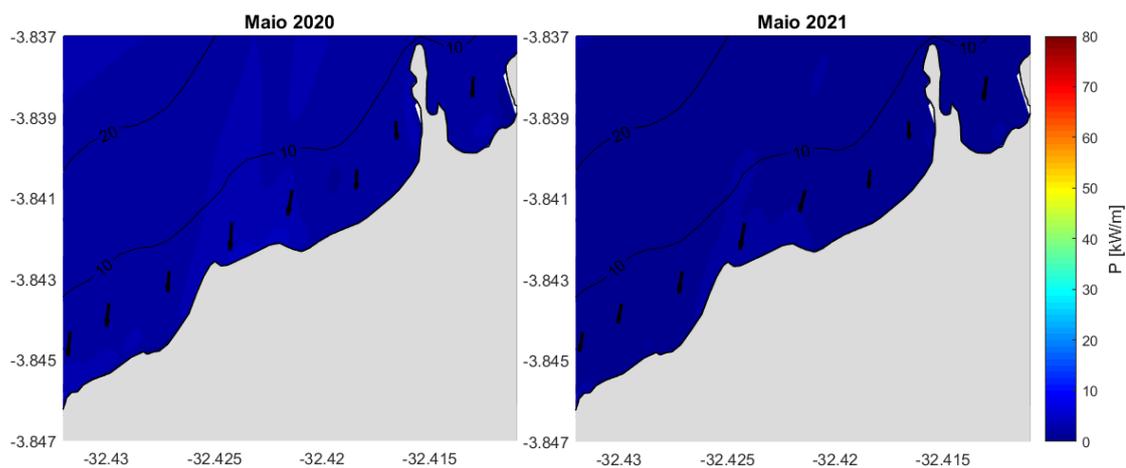
**Figura 4.31** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de fevereiro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



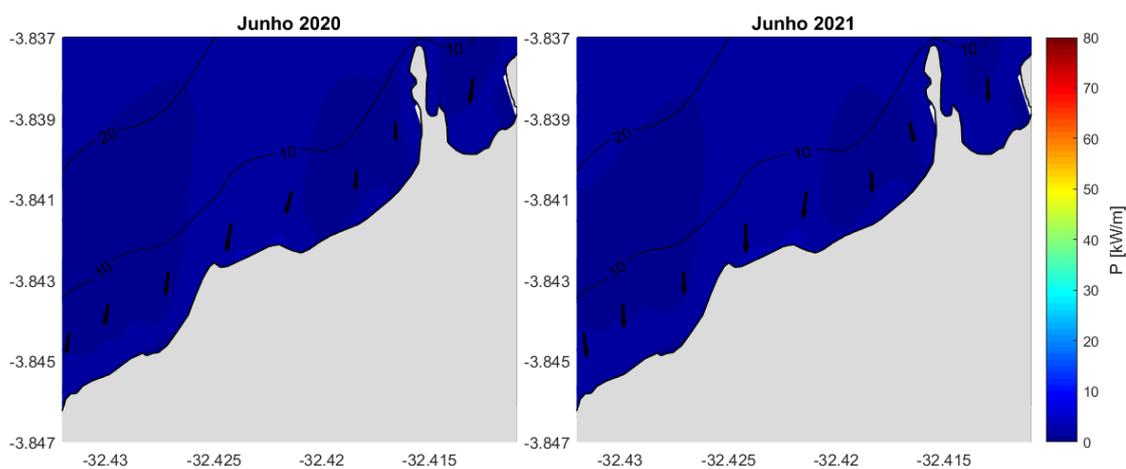
**Figura 4.32** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de março dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



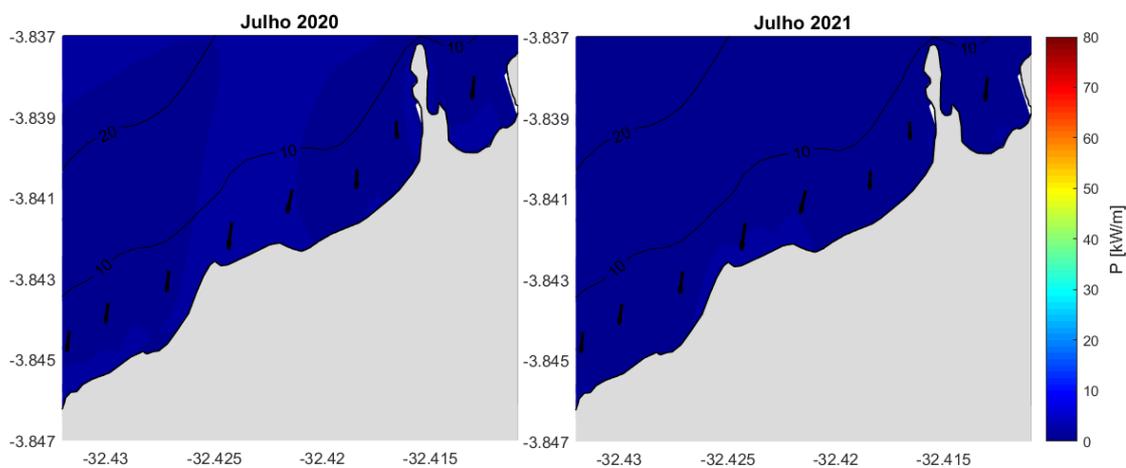
**Figura 4.33** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de abril dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



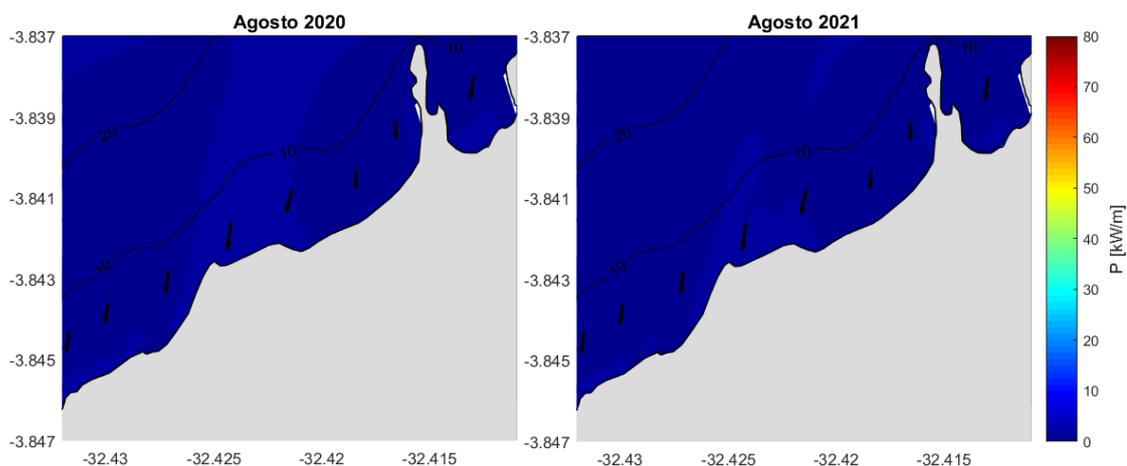
**Figura 4.34** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de maio dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



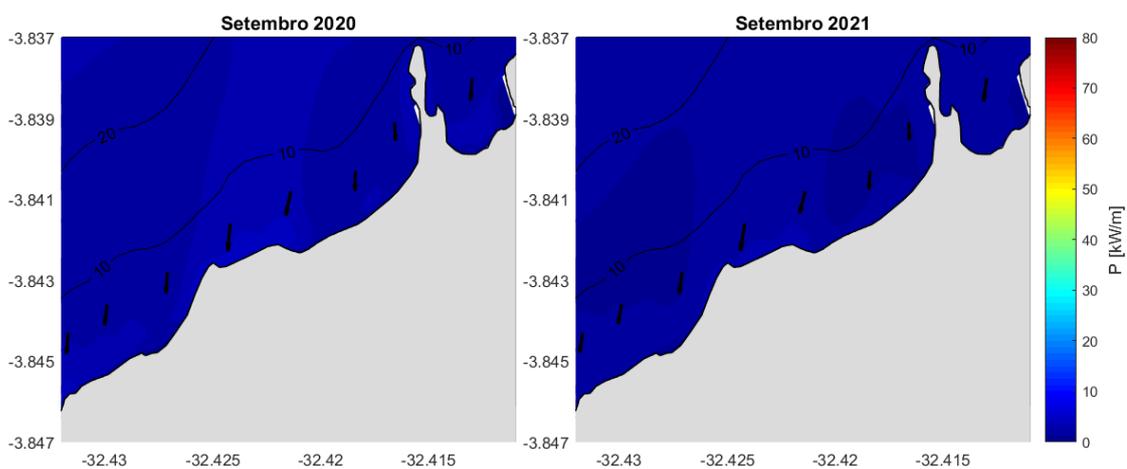
**Figura 4.35** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de junho dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



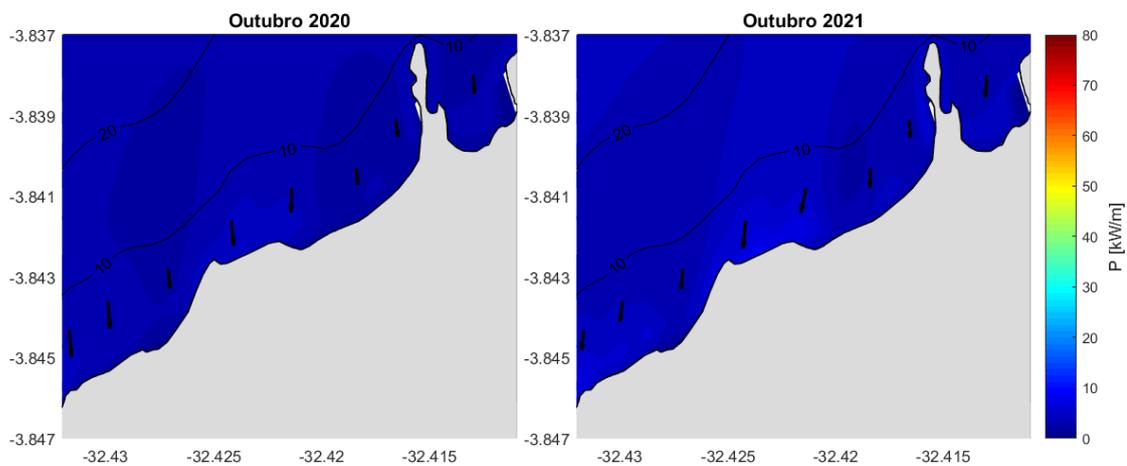
**Figura 4.36** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de julho dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



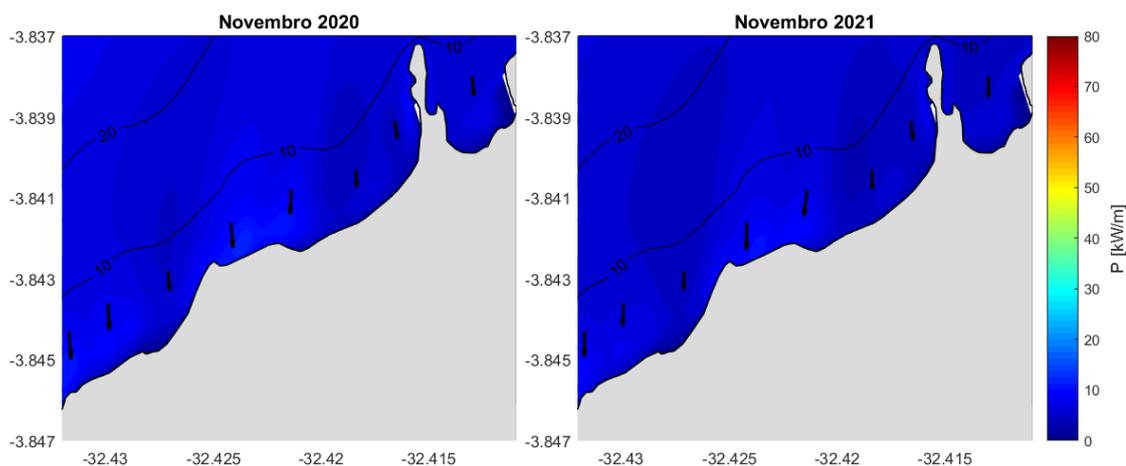
**Figura 4.37** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de agosto dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



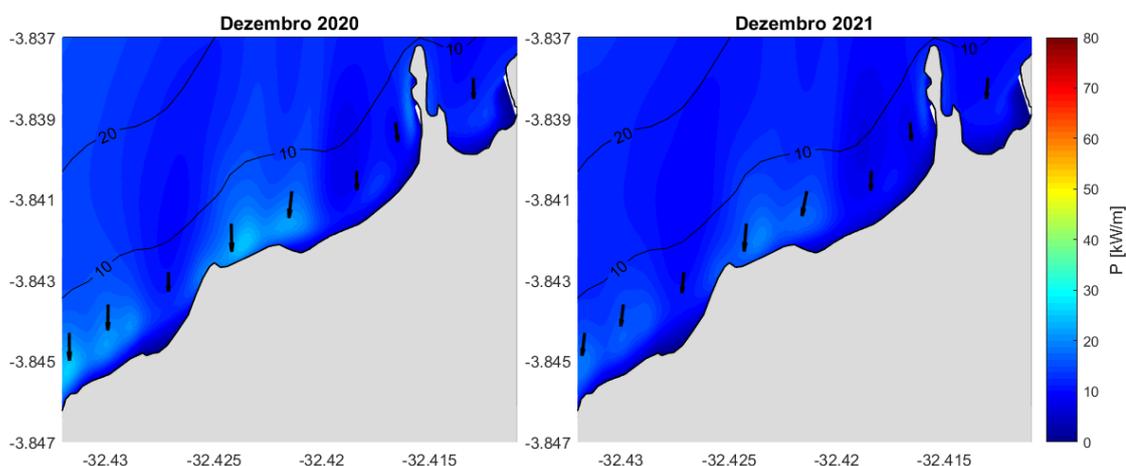
**Figura 4.38** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de setembro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



**Figura 4.39** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de outubro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



**Figura 4.40** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de novembro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).



**Figura 4.41** Distribuição da média mensal da força de onda ao longo das praias investigadas, referente ao mês de dezembro dos anos de 2020 (esquerda) e 2021 (direita).

Uma vez que notamos certa coerência entre a variabilidade da largura de praia e da força de onda, buscamos avaliar se existe correlação e/ou algum grau de relação linear entre essas variáveis. Para isso, foram realizadas análises de regressão linear simples, para cada conjunto de dados referente as praias investigadas (praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1)). Neste caso, temos a força de onda como variável independente (eixo x) e a largura de praia como variável dependente (eixo y). Nas Figuras 4.42 a 4.46 são apresentados os gráficos de dispersão dos dados, juntamente com a reta ajustada aos dados, a equação de reta correspondente e o coeficiente de correlação.

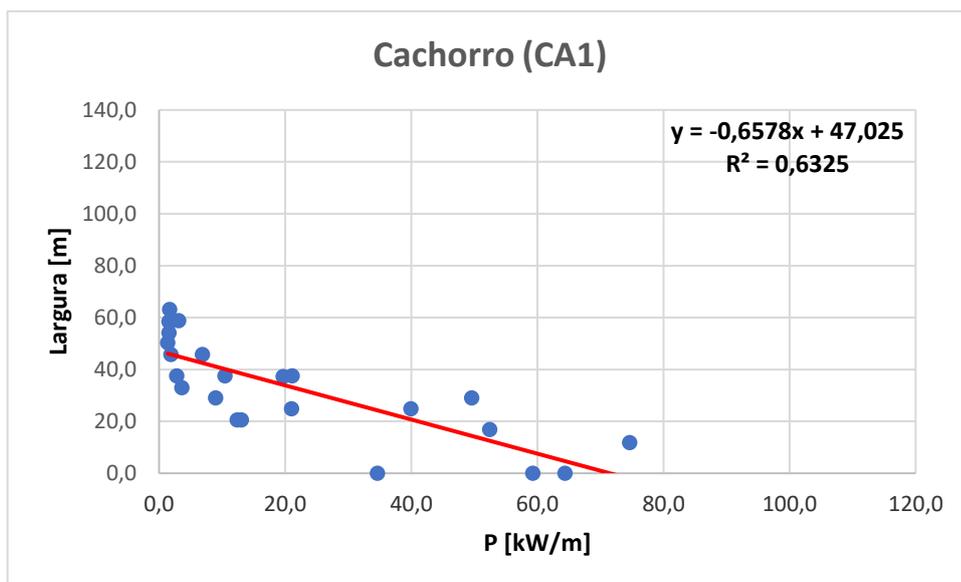
Analisando os resultados obtidos, é possível observar que há relação com tendência linear entre as variáveis e essa relação é inversamente proporcional, isto é, a largura de praia tende a diminuir com o aumento da força de onda que chega na costa. Entretanto, são observados baixos valores de coeficiente de correlação ( $R^2$ ), sendo na maioria dos casos inferior a 0,3, indicando a

fraca relação entre as variáveis. Isso se dá pela interferência de outras variáveis que influenciam a largura de praia, dentre elas a elevação do nível da água causada pela maré. Além disso, pode haver a interferência de efeitos das limitações do método utilizado, relacionados principalmente a precisão no mapeamento da linha d'água e na tomada de medidas da largura de praia através de imagens de satélite e os erros intrínsecos à modelagem numérica.

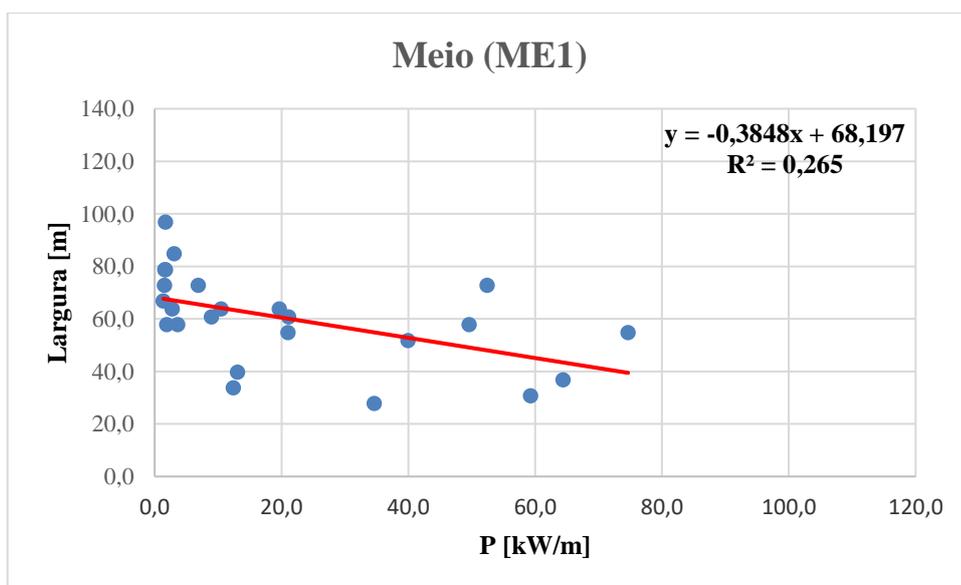
A praia que apresentou relação mais forte entre as variáveis ( $R^2$  de 0,6) foi a praia do Cachorro, o que mostra que a morfologia do perfil dessa praia é mais dependente da força de onda, conseqüentemente, mais suscetível a variabilidade da ação das ondas. Como apontado nos resultados anteriores essa foi a única praia que apresentou erosão total do perfil praiado emerso, mesmo não sendo a praia mais exposta a energia das ondas. Isso pode indicar o predomínio do transporte transversal à costa relativamente ao transporte longitudinal. Logo, espera-se menor aporte sedimentar e menor estoque de sedimentos, restringindo os processos de restauração do perfil praiado em condições energéticas.

Já o perfil CC1, localizado na porção nordeste da praia da Conceição, foi o que apresentou menor correlação ( $R^2$  de 0,01), indicando quase ausência de relação entre a largura de praia e a força de onda. Todos os demais perfis, ME1, CC2 e BD1, apresentaram coeficientes de correlação semelhantes e próximos a 0,3, indicando assim que há uma fraca correlação entre as variáveis. Neste caso, pode haver influência significativa de outros fatores, como a elevação do nível da água pela maré e o transporte longitudinal à costa, possibilitando a troca de sedimento entre praias, que representa um aporte adicional de sedimento que pode ser responsável pela manutenção parcial do perfil de praia erodido pela ação das ondas.

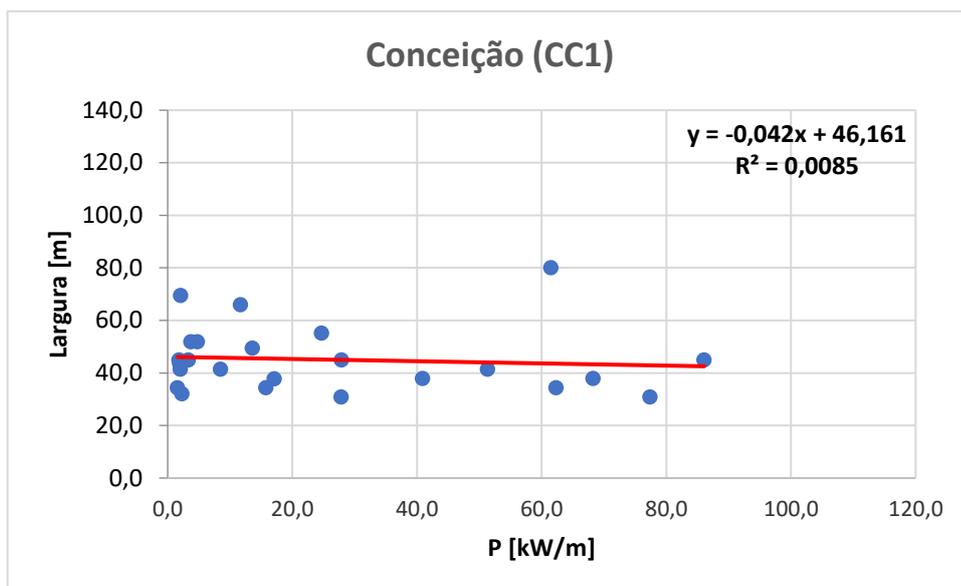
É importante ressaltar que conhecer outras características dos perfis, tal como cota topográfica máxima, inclinação e volume sedimentar, possibilitaria melhor entendimento dos processos erosivos ocasionados pelas ondas. Esses aspectos são fundamentais na determinação da resposta morfológica aos eventos de alta energia e, conseqüentemente, da intensidade da dinâmica sedimentar. Além disso, é desejável avaliar o tempo de resposta da morfologia de praia às condições energéticas, considerando análises em escalas temporais inferiores (sinótica, de semanas) através de medições morfométricas realizadas *in situ* ou da aplicação de modelos numéricos para simulações morfossedimentares.



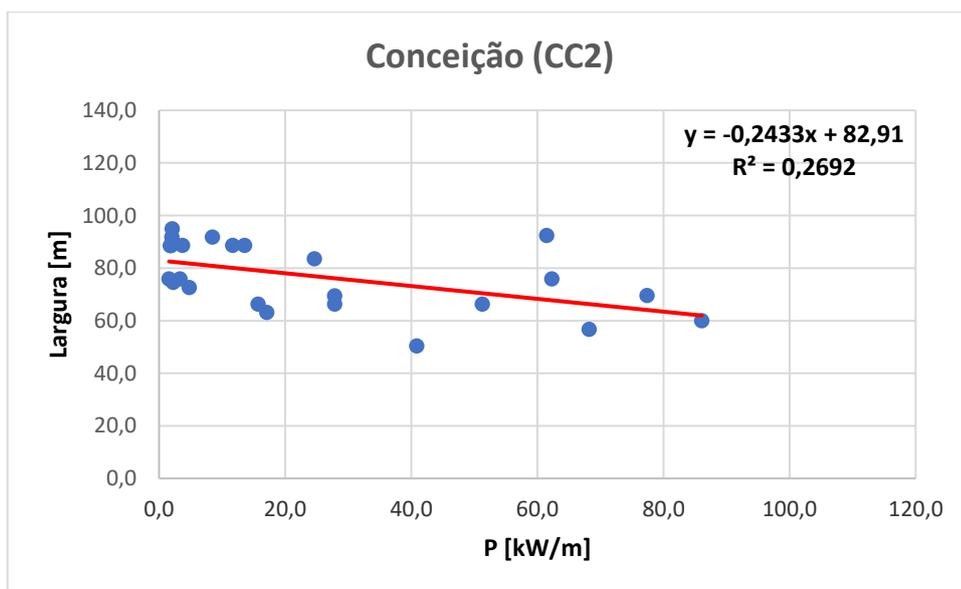
**Figura 4.42** Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia do Cachorro (CA1).



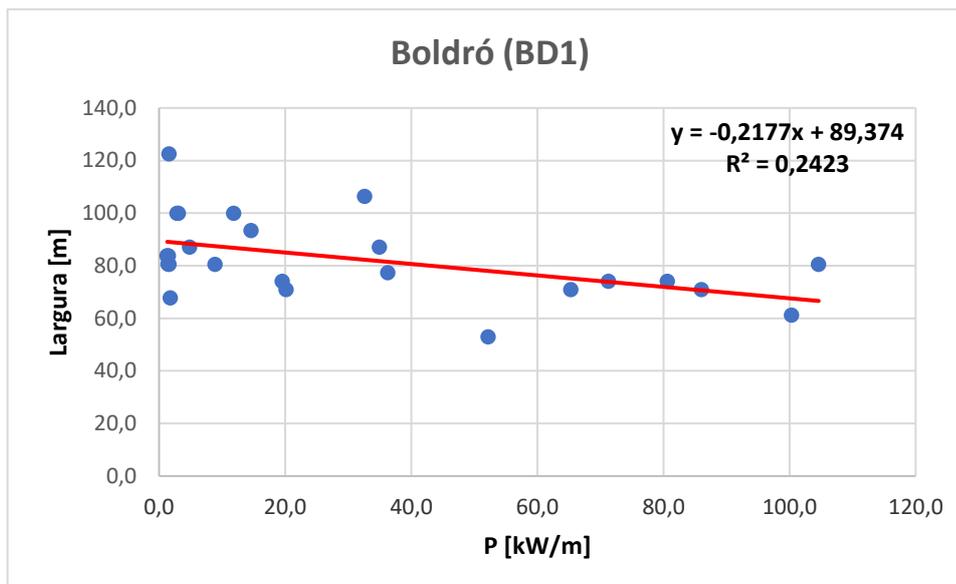
**Figura 4.43** Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia do Meio (ME1).



**Figura 4.44** Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia da Conceição (CC1).



**Figura 4.45** Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia da Conceição (CC2).



**Figura 4.46** Análise de regressão linear entre largura de praia e força de onda – Praia do Boldró (BD1).

#### 4.5 Conclusões

A partir de análises quantitativas utilizadas para avaliar as possíveis relações entre a largura de praia e a força de onda que atinge a costa em quatro praias localizadas na porção setentrional e central da Ilha de Fernando de Noronha, é possível concluir o seguinte:

- De acordo com os resultados de modelagem numérica para a simulação da propagação de ondas em direção, a força de onda que atinge a costa setentrional da ilha (Mar de Dentro) tende a ser maior durante os meses de outubro a abril, devido à incidência esporádica e sazonal de *swells* de norte nesse período equivalente às estações de outono e inverno boreal. Essas ondas causam picos de aumento da energia de onda. Tais picos podem afetar a média mensal da força de onda e, conseqüentemente, causar alguma diferenciação de magnitude em escala interanual. O inverso ocorre durante os meses de maio a setembro, estações de outono e inverno austral, quando ocorre a incidência de ondas de *swells* de sul expondo a outra face da ilha à maior energia de onda, enquanto na costa norte observa-se um período de calmaria, com menor força de onda chegando na costa;
- A distribuição espacial da força de onda na costa é maior nas praias Conceição e Boldró, especialmente em suas porções sudoeste, devido a morfologia de fundo irregular com presença de substrato rochoso;
- Existe relação com tendência linear inversamente proporcional entre a largura de praia e a força de onda na costa. Logo, a variabilidade sazonal do clima de ondas

resulta em alterações da morfologia das praias arenosas estudadas. Durante os períodos de maior força de onda na costa (outubro a abril), devido à incidência de *swell* de norte, ocorrem menores larguras de praia e maior mobilidade do perfil praial;

- Dentre as praias investigadas, a praia do Cachorro, apesar de não ser a praia sujeita às maiores forças de onda, foi a única praia que teve o perfil praial emerso totalmente erodido, com retirada total do sedimento arenoso. Além disso, essa foi a única praia que apresentou correlação moderada entre largura de praia e força de onda. Portanto, os resultados indicam possível predomínio do transporte transversal à costa, conseqüentemente, menor aporte e estoque sedimentar, restringindo os processos de restauração do perfil praial em condições energéticas. Assim, essa é a praia que apresenta dinâmica sedimentar mais intensa.

# Capítulo 5 Resposta morfológica das praias ao clima de ondas: experimentos numéricos morfodinâmicos

## 5.1 Apresentação do capítulo

Este capítulo aborda a implementação de um modelo numérico morfodinâmico na porção setentrional do arquipélago, com ênfase nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró. São apresentados todos os procedimentos envolvidos na modelagem numérica: construção do domínio e grades computacionais, calibração, validação e elaboração dos experimentos numéricos. Foram realizadas simulações de dois cenários de incidência de ondas (*swell* de norte e calmaria) para duas escalas temporais (escala de evento e mensal). A partir dos resultados, são discutidos os principais padrões hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos arenosos e de morfologia das praias em resposta à variabilidade do clima de ondas, a fim de compreender o comportamento morfodinâmico das praias. Adicionalmente, é avaliada a importância das forçantes ambientais maré e ondas no comportamento das correntes e do transporte sedimentar.

## 5.2 Introdução

As praias arenosas oceânicas são ambientes transicionais e altamente sensíveis e dinâmicos, que se ajustam constantemente aos níveis de energia local através de retrabalhamento por processos hidráulicos, eólicos e biológicos (HOEFEL, 1998). De acordo com a definição proposta por King (1972), as praias são ambientes sedimentares costeiros, que se estendem desde onde inicia a interferência da velocidade orbital das ondas sobre o fundo até o limite mais continental da ação das ondas de tempestade. O formato, tamanho e composição de cada praia, assim como o seu comportamento morfológico, é resultado das características geológicas e proximidade da fonte de sedimentos, interações com os processos modeladores e características da plataforma interna adjacente (KOMAR, 1998).

Estes ambientes estão sob a influência de processos continentais e oceânicos, e a grande mobilidade das praias é consequência de um equilíbrio dinâmico extremamente frágil e sensível

aos impactos de origem antrópica e natural. Dentre os principais agentes modeladores da morfologia costeira estão as marés, ondas, vento, correntes, drenagem continental e eventos de tempestade. Além disso, devem ser considerados os fatores de longo termo, como por exemplo o aumento do nível médio do mar relacionado às mudanças climáticas, e os fatores relacionados às atividades antrópicas, como a ocupação urbana e as obras costeiras (SOUSA, 2007; IPCC, 2007; BIRD, 2008; NICHOLLS e CAZENAVE, 2010; SOUSA et al. 2013).

Entender os padrões naturais de variabilidade da morfologia costeira e a sua vulnerabilidade às interferências antrópicas, aos efeitos das mudanças do clima e à erosão costeira é fundamental para o planejamento e gestão sustentável e eficiente das áreas costeiras, reduzindo os riscos ambientais e à população. O campo do conhecimento que visa estudar o ajuste mútuo entre a dinâmica dos processos costeiros e a morfologia das praias, denomina-se morfodinâmica de praias. Os estudos de morfodinâmica consideram a constante interação entre os efeitos dos agentes modificadores, incluindo as características sedimentares do ambiente, na determinação das alterações morfológicas, e vice-versa (WRIGHT e SHORT, 1984; CALLIARI et al., 2003).

Neste contexto, a modelagem numérica emerge como uma ferramenta valiosa para esse tipo de estudo. Os sistemas de modelagem numérica permitem criar representações do ambiente de interesse, incluindo a interação entre processos complexos, assim permitindo prever as respostas a diferentes condições ambientais, possibilitando uma análise integrada e sistêmica. É possível definir os mais diversos cenários e manipular as variáveis independentes para que os efeitos de um evento isolado possam ser analisados (RANASINGHE; PATTIARATCHI, 1999). Além disso, os modelos numéricos preenchem as lacunas espaciais e temporais dos dados medidos *in situ* (SIEGLE, 2003).

O litoral brasileiro é bastante conhecido por suas praias, que possuem grande diversidade de paisagens e relevância turística. Dentre estas, podemos citar as 32 praias localizadas no Arquipélago de Fernando de Noronha (PE), sendo 15 praias arenosas, algumas consideradas as mais bonitas do Brasil e até do mundo.

A morfologia da costa da Ilha de Fernando de Noronha apresenta contorno bastante irregular, com a presença de reentrâncias e promontórios rochosos, formando algumas baías ao longo da ilha. Essa geomorfologia pode limitar a atuação das correntes costeiras e o transporte de sedimentos entre as praias. A orientação e o relevo da ilha inibem a ação dos ventos alísios e das correntes predominantes de sudeste na região do Mar de Dentro. Por esse motivo, a porção setentrional é caracterizada por condições hidrodinâmicas menos intensas que as encontradas

no Mar de Fora e por concentrar a maior parte das praias arenosas do arquipélago (SERAFINI et al., 2010; WILDNER; FERREIRA, 2012).

Algumas dessas praias sofrem sazonalmente erosão total de suas areias, podendo inclusive expor seus substratos rochosos. A aparente reposição que se verifica subsequentemente não assegura que haja um equilíbrio de massa. Esse mecanismo natural é influenciado principalmente pelo regime insular de ondas, o qual é regido por variações sazonais. Conseqüentemente, as praias desenvolvem perfis praias sazonais de erosão e de acumulação, denominados perfil de temporal e de calmaria, respectivamente (MANSO et al., 2011).

Desta forma, o objetivo principal desta pesquisa é identificar os padrões gerais de circulação costeira e de transporte de sedimentos arenosos em resposta à atuação das diferentes condições de incidência de ondas, impostas pela variabilidade sazonal do clima de ondas. Além disso, espera-se identificar as conseqüências desses eventos nas alterações morfológicas das praias e do fundo. Assim, promover o aperfeiçoamento do entendimento a respeito da dinâmica sedimentar das praias arenosas da porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha e sua variabilidade em função das condições de ondas.

### **5.3 Métodos**

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, os métodos aplicados incluem a combinação de ferramentas de aquisição e análise de dados e a aplicação de modelo numérico para a realização de simulações computacionais hidrodinâmica e morfológica.

A seguir, são descritos os métodos utilizados no levantamento e processamento dos dados, medidos *in situ* e obtidos através de bancos de dados. Além disso, é detalhado todo o processo de implementação do modelo numérico (estruturação do domínio, avaliação do modelo, elaboração de cenários e aplicação). Uma síntese dos métodos utilizados pode ser visualizada no diagrama apresentado na Figura 5.1.

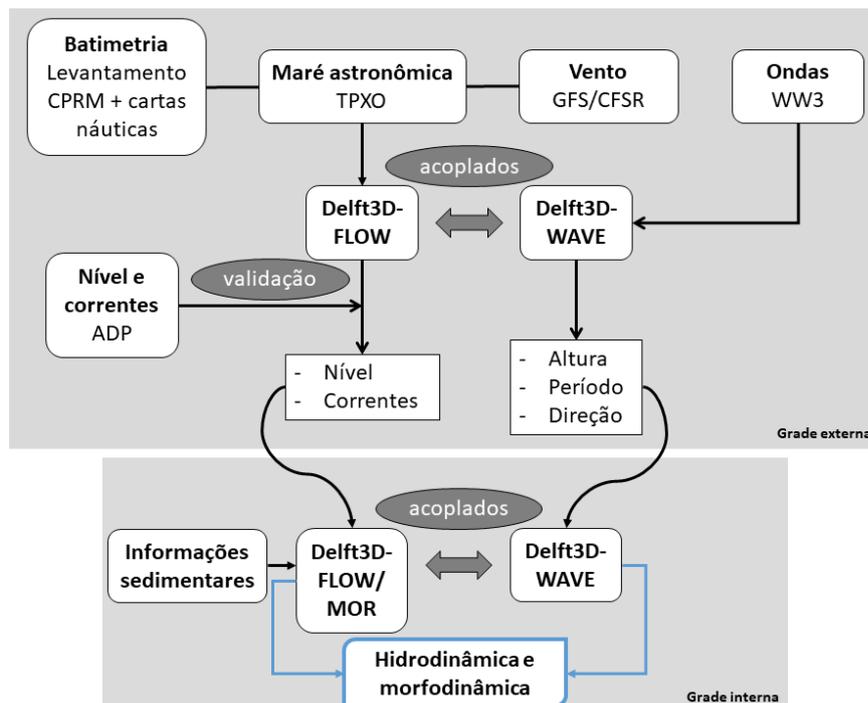


Figura 5.1 Fluxograma esquemático sintetizando os métodos aplicados.

### 5.3.1. Levantamento e análise de dados

#### 5.3.1.1. Dados medidos *in situ*

Os dados medidos *in situ* utilizados neste trabalho foram coletados durante expedições do projeto de pesquisa “Recifes profundos do Arquipélago de Fernando de Noronha: mapeamento, conectividade e proteção”. Foram coletados dados de variação do nível da água e velocidade das correntes a partir de medições eulerianas utilizando *Acoustic Doppler Profiler* (ADP). A aquisição de dados foi realizada por um ADP *Nortek AS* com frequência de 1 MHz fundeado no Mar de Dentro, entre a Baía do Sancho (a leste) e a Baía dos Golfinhos (a oeste), nas coordenadas 3° 51,330' S e 32° 26,926' W e profundidade de aproximadamente 20 m (Figura 5.2). O perfilador acústico foi configurado para realizar medições a cada 30 minutos em 20 células de 1 m cada, a partir de 0,40 m do fundo. Assim, foram obtidas séries temporais de dados oceanográficos, compreendendo o período de 16 a 31 de julho de 2016.

O tratamento e a análise dos dados foram realizados através de rotinas computacionais desenvolvidas no programa MATLAB, a partir das quais foram avaliados os parâmetros *heading*, *pitch* e *roll*, que indicam a estabilidade do equipamento; as direções das correntes medidas foram corrigidas com o valor da declinação magnética; os dados de pressão medidos

(em dbar) foram convertidos para variação do nível da água em torno do nível de referência local. O conjunto de dados tratado foi utilizado nos procedimentos de avaliação do modelo hidrodinâmico.

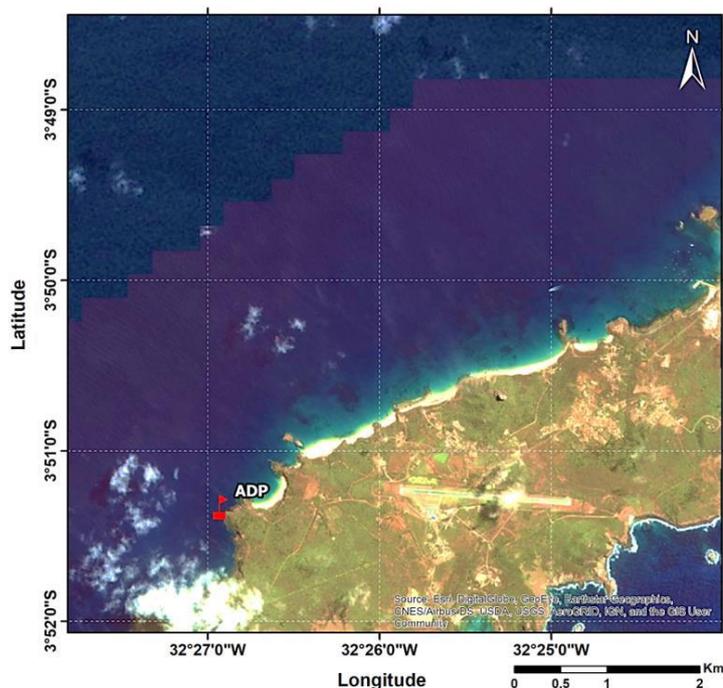


Figura 5.2 Localização do equipamento fundeado para aquisição de dados oceanográficos *in situ*.

### 5.3.1.2. Informações de maré astronômica

Foram adquiridas informações de maré astronômica do banco de dados do modelo oceânico global de previsão de marés *Oregon State University TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution* (TPXO), que apresenta as constituintes harmônicas da maré, de acordo com sua amplitude e fase. Esse modelo resolve a equação laplaciana de marés com base na assimilação de dados de altimetria obtidos por meio de observações do satélite *TOPEX/Poseidon* (EGBERT et al., 1994). A condição de maré astronômica, representada pela composição entre as constantes harmônicas (amplitude e fase) das componentes de maré, foi imposta como condição de contorno no modelo numérico hidrodinâmico.

### 5.3.1.3. Informações de vento

As informações de vento de superfície (10 m acima da superfície do mar) utilizadas neste trabalho foram produzidas pelas simulações numéricas do *Global Forecast System* (GFS), um modelo atmosférico global desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Esse modelo é bastante utilizado para fornecer condições iniciais e/ou condições de contorno para outros modelos do NCEP, dentre eles o modelo de ondas WAVEWATCH III (WW3). A descrição do modelo GFS pode ser encontrada na página eletrônica do *Environmental Modeling Center* (EMC), [http://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical\\_forecast\\_systems/gfs.php](http://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php) (Acesso em: 08 set. 2023).

Foram obtidas as componentes zonal (Leste-Oeste) e meridional (Norte-Sul) do vento, correspondentes ao período de 2008 a 2018, com resolução temporal de 3 h e espacial de  $0,5^\circ$ . Com a utilização do programa MATLAB, foram extraídos os dados referentes às coordenadas  $4^\circ 00' S$  e  $32^\circ 30' W$  e realizado o processamento. As informações de vento de superfície obtidas foram usadas para caracterizar o regime de ventos da região e como forçante do modelo hidrodinâmico.

### 5.3.1.4. Informações de ondas

Os parâmetros de ondas (altura significativa, período de pico e direção de pico) foram obtidos a partir do modelo global de previsão de ondas WAVEWATCH III (WW3), desenvolvido pelo *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). O modelo empregado é baseado na equação do balanço da densidade de ação espectral para o espectro direcional da onda, e considera os processos de crescimento, refração e decaimento para cada frequência específica. Informações detalhadas referentes ao modelo podem ser obtidas em Tolman (1999).

Os dados são disponibilizados no formato grib2, com espaçamento horizontal de  $0,5^\circ$  e temporal de 3 h. Esses dados foram processados no programa MATLAB, sendo extraída uma série temporal histórica, compreendendo o período entre 1979 e 2018, nas coordenadas  $3^\circ 30' S$  e  $32^\circ 30' W$ . Os parâmetros de ondas oceânicas obtidos foram utilizados para caracterizar o

clima de ondas da região e como condição de contorno no modelo numérico de propagação de ondas.

### **5.3.2. Modelagem numérica: Modelo numérico Delft3D**

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, optou-se por utilizar o modelo numérico Delft3D, desenvolvido pela instituição holandesa Deltares. O Delft3D é um sistema de modelagem numérica de código aberto, modular e multidimensional, que foi desenvolvido para permitir uma avaliação sistêmica de ambientes costeiros, estuarinos, fluviais e lacustres. Além disso, este é um modelo baseado em processos, isto é, baseia-se em princípios físicos (como conservação de massa, momento, energia, etc.) e utiliza equações matemáticas para descrever a propagação de ondas, a hidrodinâmica, o transporte de sedimentos e partículas, as alterações morfológicas, a qualidade da água e a ecologia.

Os módulos do modelo numérico aplicados neste trabalho são o módulo hidromorfodinâmico (Delft3D-FLOW) e o módulo de ondas (Delft3D-WAVE). Tais módulos serão brevemente apresentados nos próximos itens, entretanto, informações detalhadas a respeito do modelo numérico Delft3D e cada um de seus módulos podem ser encontradas nos manuais do usuário, disponibilizados na página eletrônica da Deltares, <https://oss.deltares.nl/web/delft3d/manuals> (Acesso em: 08 set. 2023).

#### **5.3.2.1. Módulo hidro-morfodinâmico (Delft3D-FLOW)**

O módulo Delft3D-FLOW simula os processos hidrodinâmicos resolvendo as equações da continuidade e de *Navier-Stokes* integradas verticalmente na coluna de água, incluindo os efeitos da força de *Coriolis*, fricção do vento, atrito com o fundo e viscosidade turbulenta. As soluções matemáticas são baseadas nos princípios físicos de conservação (como conservação de massa, momento, energia, etc.) e na utilização das aproximações de águas rasas, de *Boussinesq* e hidrostática. As simulações podem ser bidimensionais (2D), feitas sobre uma malha de diferenças finitas, ou tridimensionais (3D), sendo considerada uma pilha de malhas idênticas onde a dimensão vertical é discretizada em coordenadas *sigma* ou *Z* (DELTAIRES, 2019).

Os processos morfossedimentares, que anteriormente eram computados através do módulo Delft3D-MOR, podem ser ativados dentro do módulo hidrodinâmico, que por sua vez

pode funcionar acoplado ao módulo de ondas (Delft3D-WAVE). Assim, a cada passo de tempo ocorrem interações entre os módulos, fazendo com que exista a retroalimentação da morfologia de fundo com a hidrodinâmica (correntes e ondas) e vice-versa. Dessa maneira, é possível realizar a simulação do transporte que ocorre em suspensão e junto ao fundo para sedimentos coesivos e não-coesivos, assim como a constante modificação da morfologia do fundo.

Para o transporte em suspensão, é utilizada a equação de advecção-difusão integrada verticalmente e processos como a influência da concentração de sedimentos em suspensão na densidade e na turbulência são considerados. A velocidade de deposição para partículas não-coesivas segue o método de Van Rijn (1993), que depende do diâmetro do sedimento. Para o cálculo do transporte junto ao fundo, é utilizado o método de aproximação desenvolvido por Van Rijn et al. (2003), que considera o impacto das ondas no transporte sedimentar. O transporte em suspensão, resultante da assimetria de ondas, também é incluído no vetor de transporte junto ao fundo através do método de aproximação proposto por Van Rijn (2001). Informações mais detalhadas a respeito do Delft3D-FLOW, incluindo as formulações empregadas para descrever os processos hidrodinâmicos e morfossedimentares, podem ser encontradas em Deltares (2019).

### 5.3.2.2. Módulo de ondas (Delft3D-WAVE)

O módulo Delft3D-WAVE é utilizado para simular a propagação de ondas curtas geradas aleatoriamente pelo vento. Esse módulo considera a geração e propagação de ondas de gravidade geradas pelo vento em águas profundas, intermediárias e rasas. Os processos de transformação das ondas, devido às interações com o fundo, vento, correntes, nível da água, entre ondas e com obstáculos, também são considerados.

O Delft3D-WAVE inclui o modelo *Simulation Waves Nearshore* (SWAN), desenvolvido pela *Delft University of Technology*, para a propagação e geração computacional de ondas. Este é um modelo de terceira geração que baseia-se na equação de balanço do espectro de ação discreto e é completamente espectral em todas as direções e frequências. Os processos físicos considerados são: geração de ondas pelo vento, crescimento da onda por efeito do vento, refração e empinamento devido às variações batimétricas, bloqueio e reflexão na presença de obstáculos, difração, quebra da onda induzida pela profundidade, dissipação de energia devido à quebra da crista da onda por efeito do vento (*white-capping*), dissipação de energia devido à fricção de fundo, interações não-lineares entre ondas, interações entre onda e corrente e efeito

da variação temporal do nível da água. Outras informações a respeito do modelo SWAN podem ser encontradas em Holthuijsen et al. (1993), Booij et al. (1999) e Ris et al. (1999).

Uma característica especial deste módulo é a possibilidade de interação dinâmica com o módulo Delft3D-FLOW (ou seja, a interação bidirecional ondas-correntes). Assim, tanto os efeitos das ondas nas correntes (por forçamento, maior turbulência e maior tensão de cisalhamento do leito) quanto os efeitos do fluxo nas ondas (por *set-up*, refração por correntes e fricção de fundo aumentada) são contabilizados (DELTARES, 2014).

### 5.3.2.3. Domínio do modelo e grades computacionais

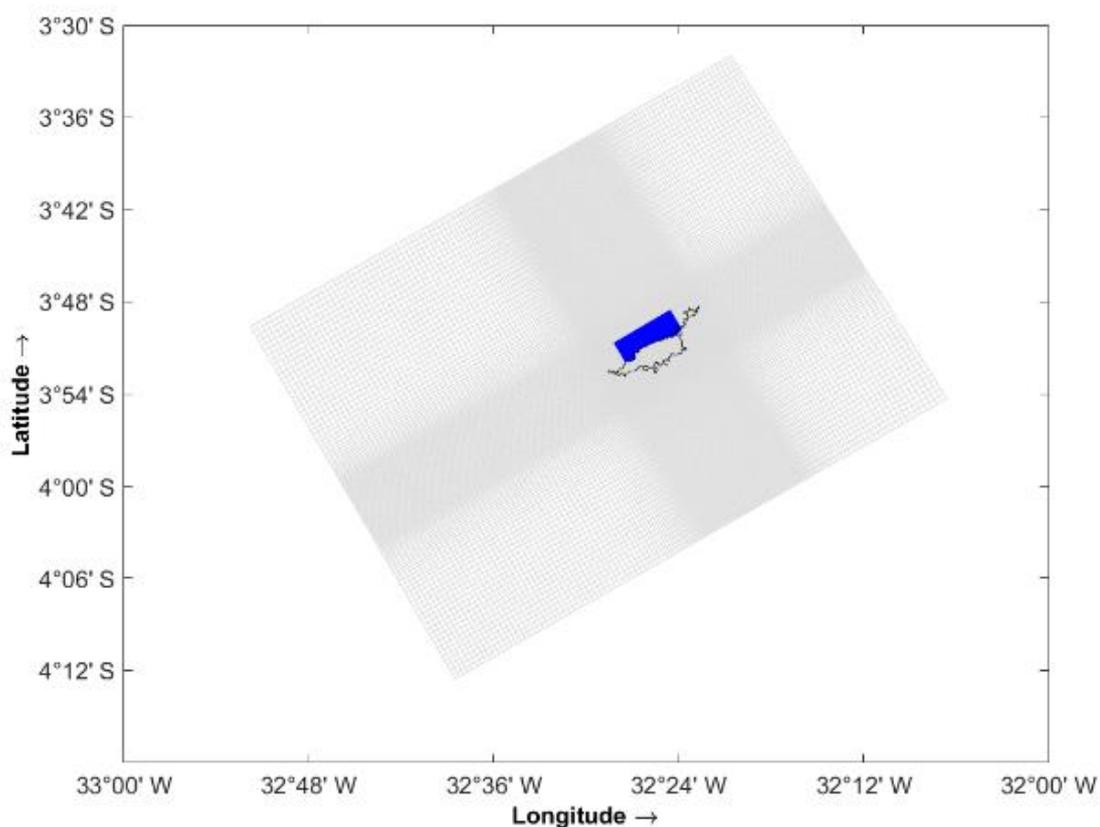
O domínio do modelo abrange a região oceânica ao redor do Arquipélago de Fernando de Noronha, incluindo toda a plataforma insular (Figura 5.3). Desta forma, a área de interesse está situada na região central do domínio, distante dos efeitos de borda (problemas de cálculos computacionais que ocorrem nas bordas abertas do domínio).

Para compor o domínio do modelo, foram utilizados dados do posicionamento da linha de costa do arquipélago e dados batimétricos da região. A posição da linha de costa foi obtida através da vetorização de imagens de satélite do programa Google Earth e a batimetria utilizada é composta por um levantamento batimétrico detalhado realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), com uso da tecnologia de aerolevanteamento a *laser* do fundo marinho, em conjunto com dados de profundidade das cartas náuticas nº 52 e nº 22000 da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Além disso, considerando a aplicação da modelagem morfológica, foi necessário incluir a topografia das praias nos dados batimétricos. Na ausência de dados topobatimétricos de alta precisão, a topografia da área emersa das praias foi estimada de maneira hipotética com base em alguns perfis topográficos monitorados por Manso et al. (2011). Deste modo, a topografia definida nesta pesquisa inicia na cota de 2 m na parte mais alta do perfil praial (pós-praia) e estes valores diminuem gradativamente em direção à porção mais baixa (antepraia). Todos os dados foram georreferenciados ao *datum* WGS-84 em um sistema de coordenadas geográficas.

Considerando as características da área de estudo e os processos alvo de interesse desta pesquisa, julgou-se adequada e suficiente a adoção de um domínio bidimensional. Trata-se de uma plataforma insular estreita e rasa, portanto, é esperado que haja maior homogeneidade vertical dos parâmetros físico-químicos. Além disso, o objeto de interesse da pesquisa são os processos hidrodinâmicos e morfodinâmicos que ocorrem no sistema praial, onde praticamente

toda a coluna de água está sob ação dos processos de mistura ocasionados pela atuação de vento e ondas.

Com o objetivo de capturar a dinâmica da plataforma insular, mas também representar com maior detalhamento as praias da porção setentrional do arquipélago, o domínio do modelo foi decomposto em duas grades computacionais, geradas através do módulo Delft3D-RGFGRID: uma grade externa, menos refinada e com resolução variável (tamanho das células variando de 650 a 150 m na área de interesse) e uma grade interna e mais refinada, abrangendo as praias da porção setentrional do arquipélago, com resolução espacial variando de 50 a 18 m. A Figura 5.3 mostra a disposição das grades computacionais implementadas e a Tabela 5.1 apresenta as dimensões (número de pontos de grade nas direções x e y) e a resolução espacial (em metros) de cada uma das grades.



**Figura 5.3** Disposição das grades computacionais utilizadas para compor o domínio do modelo: grade externa em cinza e grade interna em azul.

**Tabela 5.1** Dimensões e resolução espacial das grades computacionais.

Grade	Dimensões [nº de pontos]	Resolução [m]
Grade externa	200 x 138	650 a 150
Grade interna	280 x 96	50 a 18

Utilizando o método do aninhamento de grades, através da funcionalidade do Delft3D denominada *Nesting*, a grade interna é forçada com os resultados da grade externa. Através da ferramenta NESTHD1 são gerados pontos de monitoramento inseridos na grade externa, que são definidos de acordo com a localização das bordas abertas da grade interna. Logo após a realização da simulação na grade externa, a ferramenta NESTHD2 é utilizada para gerar as condições de contorno da grade interna, a partir dos resultados obtidos nos pontos de monitoramento. Finalmente, é realizada a simulação na grade interna. Dessa maneira, é possível concentrar a alta resolução, necessária para analisar os processos costeiros, apenas na área de interesse, reduzindo assim o esforço computacional.

É importante ressaltar que se optou por utilizar grades estruturadas (não-flexíveis) e com geometria regular, garantindo grades ortogonais e evitando assim o acúmulo ou dissipação de energia indevido dentro do domínio computacional. A variação de resolução ao longo da grade foi feita de maneira a suavizar as diferenças de proporção das células dentro da mesma grade e na transição entre as grades. A ortogonalidade e a suavidade são parâmetros utilizados para avaliar a qualidade da grade computacional, buscando evitar alguns erros numéricos no processo da modelagem.

Após a elaboração das grades computacionais, os dados batimétricos foram interpolados ao longo dos elementos de grade. A interpolação foi realizada através do módulo Delft3D-QUICKIN, utilizando o método de interpolação triangular.

#### **5.3.2.4. Condições de contorno**

Para forçar a circulação e a propagação de ondas na grade externa, foram utilizadas como condições de contorno as informações de maré astronômica, vento e ondas extraídas de modelos globais. No módulo Delft3D-FLOW, as bordas abertas foram forçadas com as constantes harmônicas das componentes de maré (TPXO) e com a série temporal da intensidade e direção do vento (GFS/CFSR). Já no módulo Delft3D-WAVE, as mesmas bordas foram forçadas com a série temporal dos parâmetros de ondas oceânicas (WW3). O vento foi considerado uniforme em todo o domínio e as ondas foram consideradas uniformes ao longo das bordas, variando apenas no tempo.

As condições de contorno utilizadas nas bordas abertas da grade interna foram geradas a partir dos resultados obtidos das simulações realizadas na grade externa. No módulo Delft3D-FLOW, as bordas perpendiculares à costa foram forçadas com séries temporais de correntes e

as bordas paralelas à costa foram forçadas com séries temporais de nível da água. Já no módulo Delft3D-WAVE, todas as bordas foram forçadas com os parâmetros de ondas em águas rasas, sendo que as ondas oceânicas foram propagadas da grade externa para a grade interna através do aninhamento das grades no módulo de ondas. Neste caso, foi considerada a variação dos parâmetros de ondas ao longo das bordas, pois nessa região do domínio os processos de transformação das ondas são importantes. Entretanto, o vento não foi incluído como forçante, uma vez que o seu efeito já foi considerado na geração das demais forçantes e pelo fato de a pista de atuação do vento ser limitada pelo tamanho dessa grade.

### 5.3.2.5. Avaliação da qualidade do modelo hidrodinâmico

O processo de avaliação da qualidade do modelo numérico é essencial para a escolha dos melhores valores de parâmetros a serem utilizados (tais como coeficientes de viscosidade, rugosidade, difusividade, arrasto do vento, etc.) e para garantir que o modelo reproduz adequadamente o nível da água e os padrões de circulação encontrados na área de interesse, isto é, que os resultados do modelo são concordantes com os dados medidos em campo. Assim, a qualidade do modelo é avaliada qualitativamente, através da comparação entre séries temporais de curto período dos resultados modelados e dos dados medidos *in situ*, e quantitativamente, por meio do cálculo de parâmetros estatísticos entre esses dados.

Nesta etapa, são realizados os procedimentos de calibração e validação do modelo, que consistem, respectivamente, em ajustar os parâmetros do modelo e avaliar as comparações entre os resultados do modelo implementado e outro conjunto de dados, preferencialmente medições locais da variável que está sendo analisada.

Para a comparação quantitativa entre os dados modelados e medidos foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos:

#### Index of Agreement (IOA)

O parâmetro *Index of Agreement* (IOA) ou Índice de Concordância foi calculado através da Equação (5.1) (Willmott, 1981):

$$IOA = 1 - \frac{\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2}{\sum (|X_{mod} - \langle X_{obs} \rangle| + |X_{obs} - \langle X_{obs} \rangle|)^2} \quad (5.1)$$

onde  $\langle \dots \rangle$  denota média,  $|\dots|$  o valor absoluto,  $X_{mod}$  os valores resultantes da modelagem e  $X_{obs}$  os valores medidos *in situ*.

Este é um parâmetro adimensional, que varia no intervalo entre 0 e 1, indicando total discordância ou semelhança, respectivamente, entre os resultados da modelagem e os dados medidos. Segundo Willmott e Wicks (1980), valores de IOA superiores a 0,5 indicam que a modelagem apresenta uma redução significativa de erros.

#### Root-Mean-Square Error (RMSE)

Adicionalmente, foi calculado através da Equação (5.2) o parâmetro estatístico dimensional *Root-Mean-Square Error* (RMSE) ou Erro Quadrático Médio (WILLMOTT et al., 1985). Esta é uma medida do desvio entre os resultados do modelo e as observações nas unidades das grandezas avaliadas, conseqüentemente, RMSE igual a 0 significa concordância perfeita.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_n (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (5.2)$$

onde  $X$  é a variável que está sendo comparada e  $n$  é o número de observações.

Neste capítulo, avaliamos apenas a qualidade dos resultados hidrodinâmicos de nível da água e componentes zonal e meridional da velocidade das correntes, uma vez que o modelo já encontra-se validado para a propagação de ondas (ver AMBROSIO et al., 2022 e Capítulo 3). No entanto, por motivos de logística e falta de dados amostrados de sedimentologia e topobatimetria, foi inviável a avaliação quantitativa dos resultados da modelagem morfológica.

No procedimento de calibração foram ajustados os coeficientes de rugosidade e viscosidade. Assim, foram realizados testes de sensibilidade do modelo, nos quais o coeficiente de viscosidade era fixado, enquanto diferentes valores de coeficiente de rugosidade eram testados, e vice-versa. As simulações de calibração foram realizadas para o mês de julho de 2016 (compreendendo o período de medições de dados oceanográficos *in situ*), utilizando como forçantes a maré astronômica, vento e ondas. Alguns outros testes foram realizados de forma a avaliar a ação de cada forçante isoladamente e a resposta do modelo à variação de outros coeficientes, como os coeficientes de arrasto do vento e difusividade.

Anteriormente às comparações, o sinal referente às oscilações de alta frequência foi removido das séries temporais de velocidade das correntes medidas *in situ*, através da aplicação de filtro de médias móveis do tipo Blackman (janela de 15 pontos de 30 min cada). Além disso, foi feita a média vertical dos dados de velocidade das correntes medidos pelo ADP, para possibilitar as comparações com os resultados do modelo hidrodinâmico bidimensional implementado.

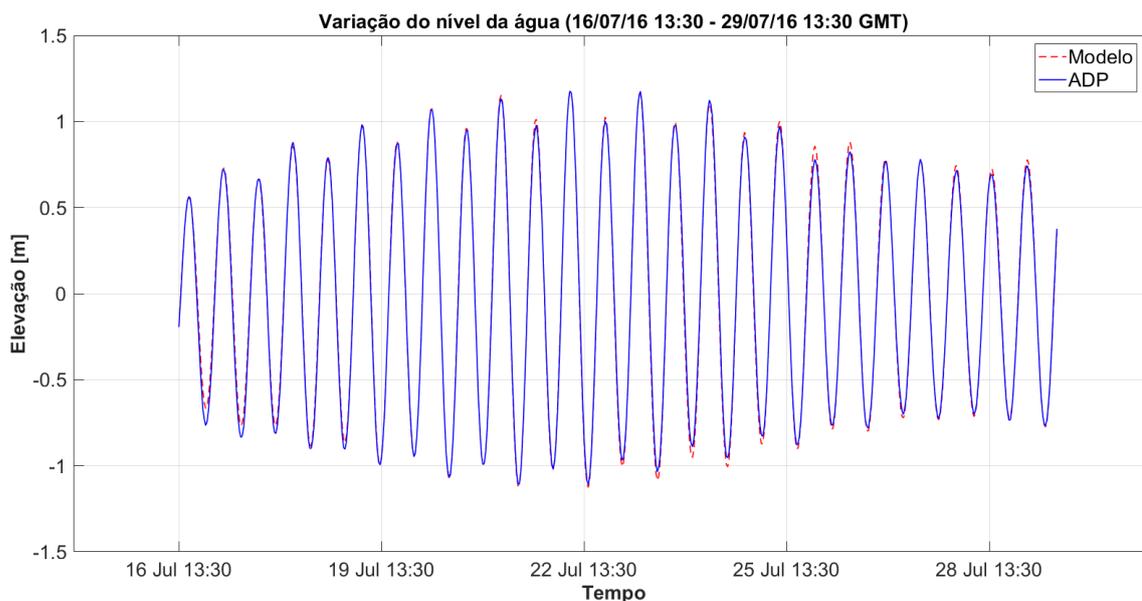
A configuração adotada a partir dos testes de sensibilidade foi:

- Coeficiente de rugosidade:  $65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$  (Chézy);
- Coeficiente de viscosidade:  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  (horizontal);
- Coeficiente de difusividade:  $1 \text{ m}^2/\text{s}$  (horizontal);
- Coeficientes de arrasto do vento: 0,00063 – 0,00723.

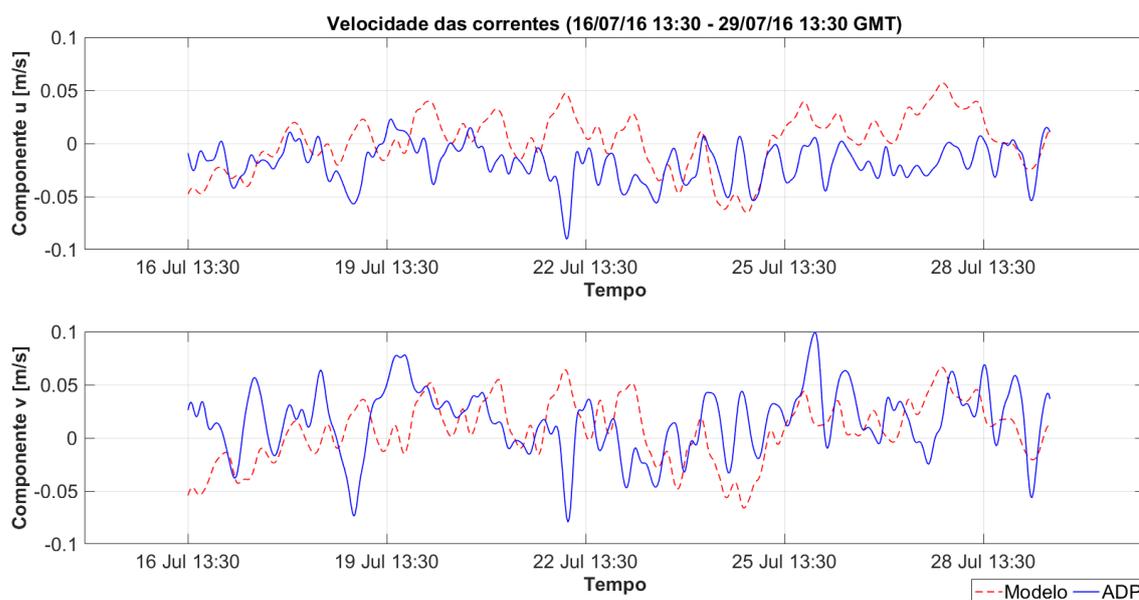
Obs. Quanto ao passo de tempo, foi de 30 s para a grade externa e de 12 s para a grade interna.

Nota-se através da Figura 5.4 que o modelo representa adequadamente as variações do nível da água em função da propagação da onda de maré. É possível verificar que tanto a amplitude quanto a fase das oscilações do nível são bem reproduzidas pelo modelo, o que fica evidente também pelos valores dos parâmetros estatísticos calculados (Tabela 5.2), com IOA próximo a 1 (0,999) e baixo valor de RMSE (0,032 m).

Na Figura 5.5, podemos verificar que o padrão hidrodinâmico foi razoavelmente reproduzido pelo modelo. Os dados medidos e modelados de velocidade das correntes (componentes  $u$  e  $v$ ) apresentam alguma concordância ao longo da série temporal, comprovada estatisticamente pelos valores de IOA e RMSE calculados (Tabela 5.2). Os valores de IOA obtidos para as componentes  $u$  e  $v$  da velocidade das correntes são superiores a 0,4. Já os valores de RMSE são de 0,036 m/s e 0,042 m/s para as componentes  $u$  e  $v$ , respectivamente. Os resultados obtidos podem ser considerados razoáveis devido à complexidade da região, em termos de batimetria, morfologia e atuação das forçantes ambientais; por isso, pode ter a influência de algum efeito local nas correntes medidas pontualmente, que não é reproduzido pelo modelo na resolução espacial adotada. Adicionalmente, em função dos baixos valores de magnitude das correntes observadas nessa posição (sempre inferiores a 0,1 m/s), torna-se difícil a sua exata reprodução pelo modelo numérico. Nesses casos, com velocidades próximas a zero, reproduzir a orientação do fluxo é difícil. Assim, importante é que o modelo indica as mesmas magnitudes das velocidades (também sempre inferiores a 0,1 m/s). Além disso, os contornos abertos do modelo foram forçados com resultados provenientes de modelos numéricos globais, que apesar de serem modelos bem consolidados e validados, podem apresentar alguns desvios em relação às condições reais.



**Figura 5.4** Comparação entre as séries temporais da variação do nível da água resultantes da modelagem numérica e medida pelo ADP.



**Figura 5.5** Comparação entre as séries temporais das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes resultantes da modelagem numérica e medida pelo ADP.

**Tabela 5.2** Parâmetros estatísticos comparativos obtidos na validação do modelo hidrodinâmico.

Parâmetro	IOA	RMSE
Nível da água	0,999	0,032 m
Componente u	0,414	0,036 m/s
Componente v	0,415	0,042 m/s

### 5.3.2.6. Experimentos numéricos

Com a finalidade de analisar os padrões de circulação costeira e a morfodinâmica das praias localizadas na porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha (Mar de Dentro), sob a influência de diferentes condições de incidência de ondas oceânicas, foram configurados quatro cenários de simulação. Tais cenários foram definidos para representar a sazonalidade do clima de ondas (condição de incidência de *swell* de norte e de calmaria) em diferentes escalas temporais (escala de evento e mensal). As especificações de cada cenário podem ser visualizadas na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3** Descrição dos experimentos numéricos elaborados para as simulações hidrodinâmicas e morfológicas.

Cenário	Condição sazonal	Escala temporal	Período
<b>Swell_evento</b>	<i>Swell</i>	Evento	01/03/2017 00:00 - 06/03/2017 00:00
<b>Swell_mensal</b>	<i>Swell</i>	Mensal	01/02/2017 00:00 - 06/03/2017 00:00
<b>Calmaria_evento</b>	Calmaria	Evento	04/08/2017 00:00 - 09/08/2017 00:00
<b>Calmaria_mensal</b>	Calmaria	Mensal	07/07/2017 00:00 - 09/08/2017 00:00

Obs. as condições de calmaria na região do Mar de Dentro são caracterizadas pela incidência de *swells* de sul.

As simulações foram realizadas em domínio 2D, utilizando os coeficientes definidos nos procedimentos de avaliação dos resultados do modelo. Os módulos Delft3D-FLOW e Delft3D-WAVE funcionaram acoplados e foi utilizado o aninhamento de grades para forçar a grade interna com os resultados da externa. As bordas abertas da grade externa foram forçadas com maré astronômica, vento (uniforme no espaço) e ondas oceânicas. Já as bordas da grade interna foram forçadas com variação do nível da água, correntes e ondas obtidos da simulação na grade externa.

Nos experimentos numéricos realizados na grade interna, foi considerado o transporte de sedimentos não-coesivos com densidade de  $2,50 \text{ g.cm}^{-3}$  e diâmetro mediano de  $0,025 \text{ cm}$  (limiar entre areia fina e areia média). As simulações dos cenários de *swell* de norte foram processadas, considerando os dados topobatimétricos descritos no item 5.3.2.3 e que os sedimentos são uniformemente distribuídos em uma camada de 2 m de espessura sobre o leito. Posteriormente, foram realizadas as simulações dos cenários de calmaria, adotando-se como condição inicial a topobatimetria e a espessura sedimentar resultantes dos cenários de *swell* de norte.

O efeito conjunto de ondas e correntes foi incluído nos cálculos de transporte sedimentar, através do acoplamento dos módulos aplicados. Além disso, a constante modificação da morfologia de fundo por processos de erosão e deposição foi considerada, ocasionando alterações no padrão hidrodinâmico e, conseqüentemente, na dinâmica sedimentar (retroalimentação).

Os períodos das simulações, apresentados na Tabela 5.3, desconsideram o período de estabilização do modelo (aquecimento) anterior a cada simulação. O aquecimento do modelo corresponde ao intervalo de tempo que leva para atingir o equilíbrio das forças atuantes no domínio e, conseqüentemente, para produzir resultados válidos. Nas simulações dos cenários em escala de evento, o período de aquecimento foi forçado com parâmetros de ondas constantes (2,14 m; 8,48 s; 118,07°, referentes aos parâmetros médios das ondas mais frequentes do clima de ondas local) para viabilizar a análise de um evento isolado.

A partir dos resultados obtidos nas simulações, foram extraídos dados referentes aos parâmetros de ondas (altura significativa, período de pico e direção média), elevação do nível da água, velocidade das correntes, transporte total de sedimentos (nas direções x e y) e alteração da cota do fundo. Alguns destes parâmetros foram obtidos em pontos específicos ao longo da costa e em perfis perpendiculares e paralelos à costa, distribuídos nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró. Estas são praias arenosas localizadas na porção central da costa norte da Ilha de Fernando de Noronha, que apresentam características diferentes entre si (orientação, formato, dimensões, etc.) e que foram alvo da pesquisa desenvolvida no Capítulo 4.

Para algumas análises dos resultados foi utilizado o cálculo da força ou potência de onda (P), que, de acordo com a teoria linear de onda exposta em Holthuijsen (2007), é dada pelo produto de sua energia por unidade de área com a velocidade de grupo, podendo ser estimada a partir da Equação (5.1):

$$P = \frac{\rho g^2 H_s^2 T_p}{32\pi} \text{ [W/m]} \quad (5.1)$$

onde  $\rho$  é a densidade da água do mar (1.025 kg/m<sup>3</sup>),  $g$  é a aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>),  $H_s$  é a altura significava (em metros) e  $T_p$  é o período de pico (em segundos) de onda.

## 5.4 Resultados e discussão

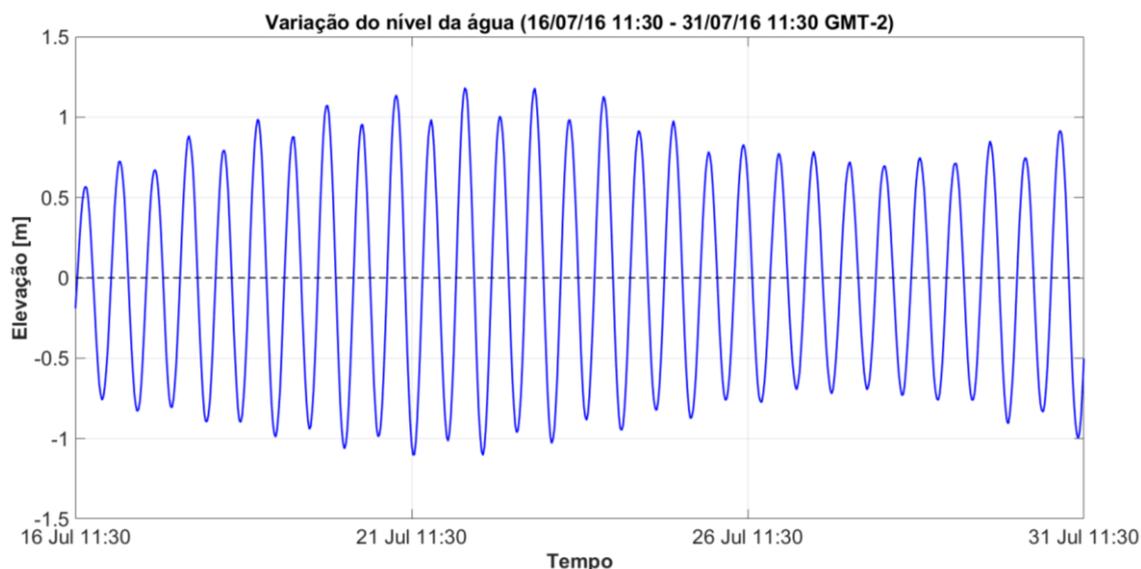
### 5.4.1. Observações in situ: variação do nível da água e velocidade das correntes

Aqui serão apresentados os dados de variação do nível da água e de velocidade das correntes medidos pelo ADP fundeado na região do Mar de Dentro, nas proximidades da Baía do Sancho, a fim caracterizar a hidrodinâmica da porção setentrional do arquipélago durante o período de amostragem.

Os dados foram coletados na isóbata de 20 m durante a segunda quinzena de julho de 2016, período de inverno austral, portanto, representam uma temporada de calmaria no Mar de Dentro e maior agitação marítima no Mar de Fora, com a incidência de ondas do tipo *swell* vindas do quadrante sul, formadas pela atuação de ciclones extratropicais no Oceano Atlântico Sul.

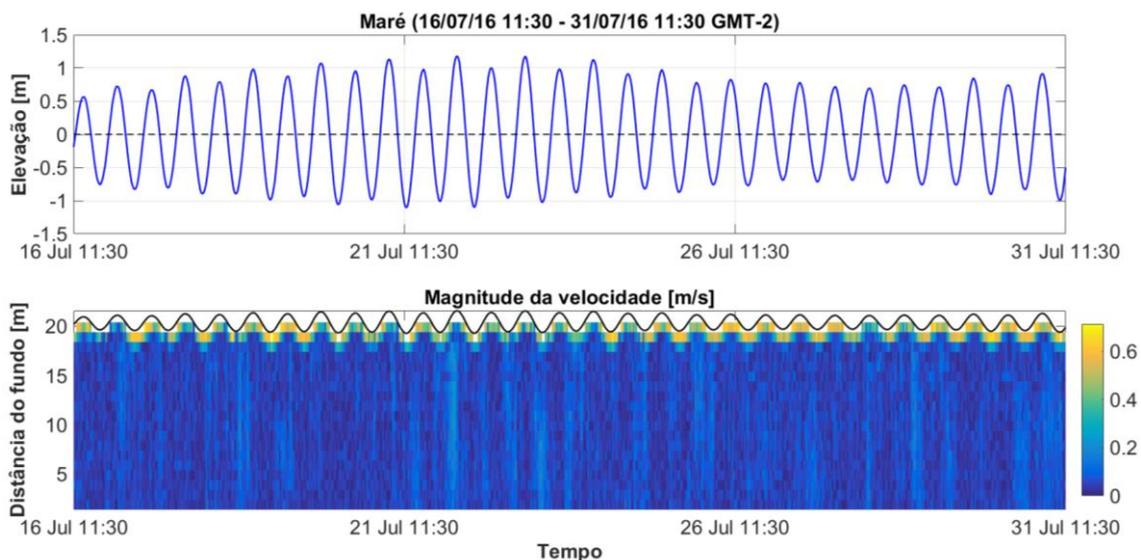
A Figura 5.6 apresenta a variação do nível da água obtida pelo ADP através das medições de pressão pelo equipamento. Essa variação abrange a combinação dos efeitos astronômicos e meteorológicos. A variação senoidal do nível da água de forma bastante regular evidencia a predominância da maré astronômica, sendo possível identificar as condições de sizígia e de quadratura, com maiores e menores amplitudes de variação do nível entre preamar e baixa-mar, respectivamente.

É observado um regime de mesomaré (amplitude entre 2 e 4 m – classificação de Davies, 1964) com caráter predominantemente semidiurno, sendo produzidas duas preamares e duas baixa-mares por dia lunar. Também foi notada a presença de desigualdades diurnas, com diferenças de altura entre duas preamares ou baixa-mares consecutivas. No período analisado, foram registradas amplitudes com valores em torno de 2,3 m na sizígia e 1,4 m na quadratura (Figura 5.6). Observações semelhantes foram feitas por Assunção (2017), que analisou uma série temporal longa de dados coletados na região do Mar de Dentro. A autora descreve também a presença expressiva de componentes de águas rasas, denominadas *overtides*, resultantes das interações não-lineares entre a maré e a topografia.

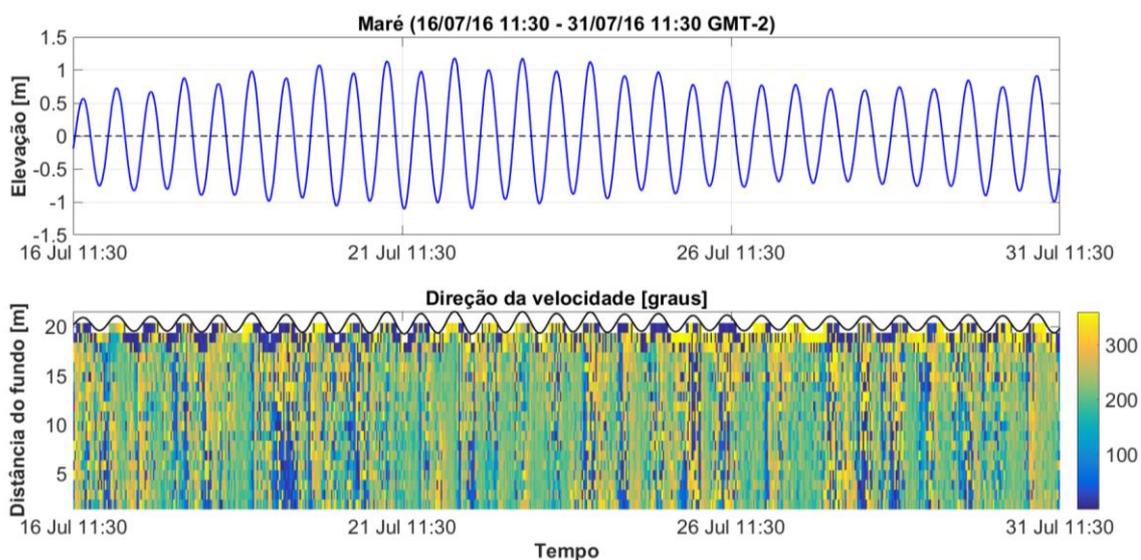


**Figura 5.6** Série temporal da variação do nível da água obtida através de medições de pressão *in situ*.

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram, respectivamente, a variação da magnitude e direção da velocidade das correntes medidas pelo ADP ao longo da coluna de água, juntamente com as variações do nível da água. É possível visualizar a influência do sinal da maré nos dados de velocidade das correntes, através da alternância de intensidade e direção. Além disso, nota-se que as medições de superfície se diferenciam do restante da coluna de água, devido à atuação do vento nas camadas superficiais, produzindo correntes mais intensas nos primeiros três metros de profundidade. Nessa camada superficial a velocidade das correntes apresentou valores médios de aproximadamente 0,4 m/s e máximos em torno de 0,7 m/s. Já no restante da coluna de água, a magnitude da velocidade das correntes diminui, com valores médios em torno de 0,06 m/s e máximos de aproximadamente 0,2 m/s.



**Figura 5.7** Série temporal da variação vertical da magnitude da velocidade das correntes medidas *in situ* e alterações do nível da água.

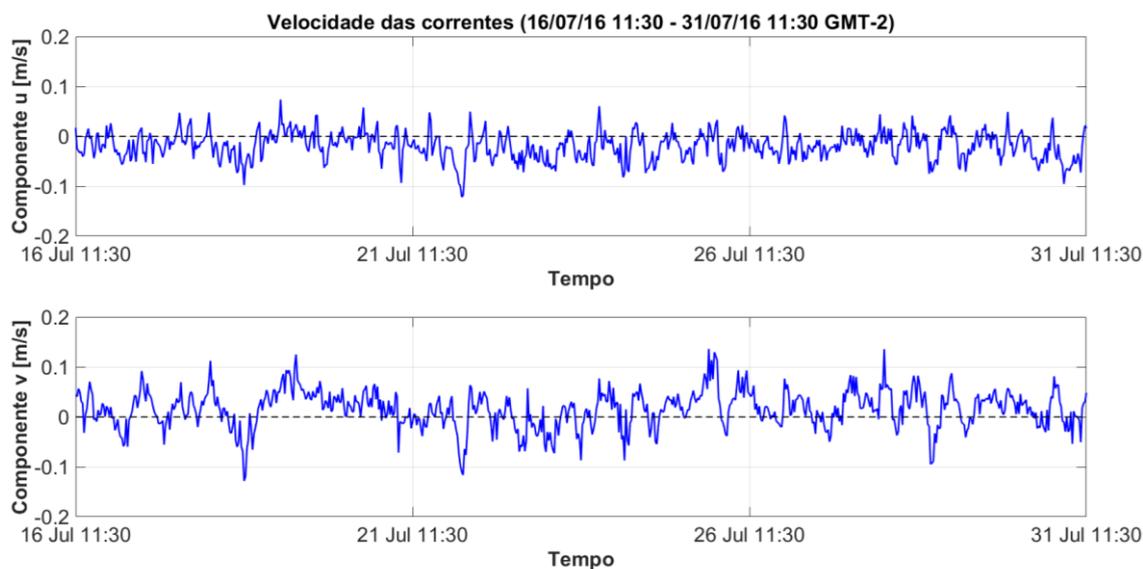


**Figura 5.8** Série temporal da variação vertical da direção da velocidade das correntes medidas *in situ* e alterações do nível da água.

Com exceção da camada superficial, impulsionada pelo vento, observa-se que não há variações verticais discrepantes de velocidade das correntes, o que corrobora com a escolha do domínio bidimensional para a modelagem numérica da hidrodinâmica.

A partir das séries temporais das médias verticais das componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) da velocidade das correntes (Figura 5.9) é possível perceber as diferenças de intensidade e direção ao longo do período analisado. De maneira geral, a componente  $u$  apresentou predominância de valores negativos (para oeste), atingindo maiores velocidades

nessa direção, em torno de  $-0,14$  m/s. Já a componente  $v$  mostrou predominância de valores positivos (para norte) e intensidades variando entre  $\pm 0,13$  m/s. Outra diferença analisada é que a componente  $u$  muda de direção com maior frequência em relação a componente  $v$ . Os valores de velocidade das correntes mostram condições hidrodinâmicas de baixa energia no Mar de Dentro durante o período analisado.



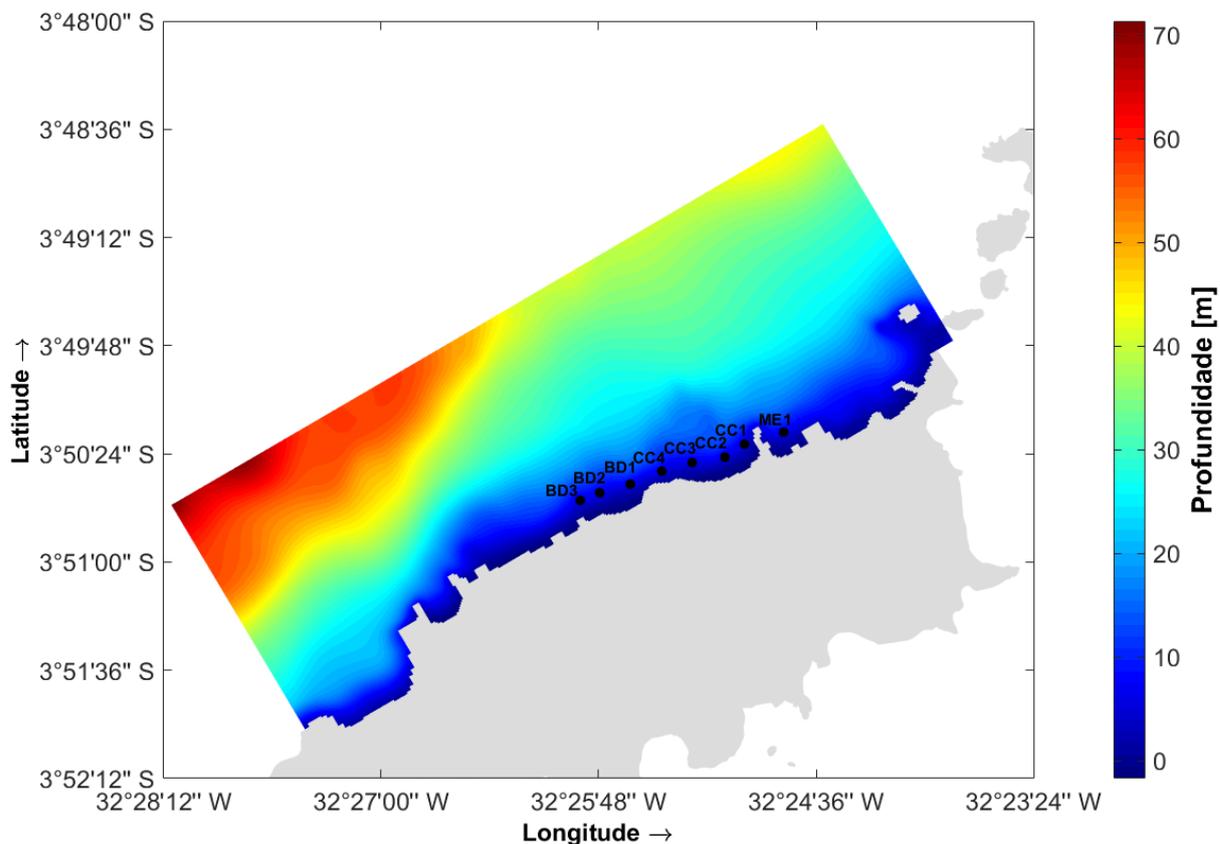
**Figura 5.9** Série temporal da média vertical das componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) da velocidade das correntes medidas *in situ*.

#### **5.4.2. Hidrodinâmica da porção setentrional do arquipélago sob diferentes condições de incidência de ondas**

Nesta seção serão apresentados os resultados da modelagem hidrodinâmica (2D), considerando os efeitos da propagação de ondas. Serão analisados apenas os padrões hidrodinâmicos observados nas simulações realizadas na grade computacional interna, que representa a área de interesse com maior resolução e permite avaliar a circulação costeira.

Os experimentos numéricos realizados tiveram como objetivo principal caracterizar a hidrodinâmica do sistema praiado da porção setentrional do arquipélago sob a influência de duas condições de ondas incidentes que caracterizam a sazonalidade do clima de ondas local. Aqui trataremos apenas dos cenários que abrangem maior período de simulação (cenários *Swell\_mensal* e *Calmaria\_mensal*). As características de cada cenário podem ser verificadas na Tabela 5.3.

Foram definidos alguns pontos de observação para a extração de resultados das simulações hidrodinâmicas. Tais pontos foram distribuídos ao longo da isóbata de 5 m, na região costeira adjacente às praias do Cachorro e Meio (ME1), Conceição (CC1, CC2, CC3 e CC4) e Boldró (BD1, BD2 e BD3) (Figura 5.10).



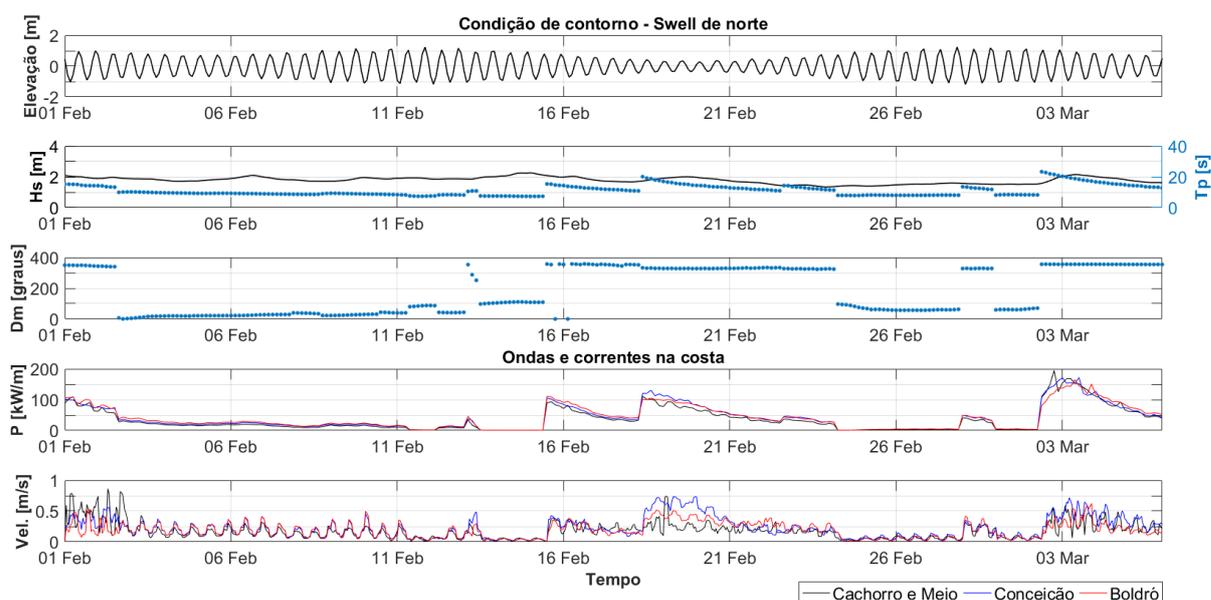
**Figura 5.10** Localização dos pontos de observação nas praias do Cachorro e Meio (ME1), Conceição (CC1 a CC4) e Boldró (BD1 a BD3), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem hidrodinâmica.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram a variação das principais forçantes ambientais atuantes nos contornos do domínio do modelo para impulsionar a propagação de ondas e a circulação, e a força de onda e a velocidade das correntes encontradas nos pontos de observação (Figura 5.10) como resultado das simulações hidrodinâmicas dos cenários *Swell\_mensal* e *Calmaria\_mensal*, que abrangem maior período de simulação.

O cenário *Swell\_mensal* é caracterizado pela ocorrência de ondas do tipo *swell* incidentes de quadrante norte, que são formadas nas médias latitudes do hemisfério norte pela atuação de ciclones extratropicais durante o inverno boreal, se propagam em direção ao hemisfério sul e atingem a costa do arquipélago voltada para o norte (Mar de Dentro). Observe-se que o período analisado compreende a alternância entre duas condições de onda incidente:

vagas de leste com período em torno de 8 s e *swells* de norte com períodos superiores a 15 s; ambas as situações com alturas significativas em torno de 1,5 e 2 m, atingindo máximos de aproximadamente 2,2 m (Figura 5.11).

Os resultados, obtidos para a força de onda e a magnitude da velocidade das correntes na simulação do cenário *Swell\_mensal* (Figura 5.11), refletem uma condição hidrodinâmica mais energética no Mar de Dentro em relação ao cenário *Calmaria\_mensal*, com notável aumento da força de onda e da intensidade das correntes próximo à costa. Neste cenário, as ondas atingem a costa com força de onda superior a 50 kW/m, durante os eventos de incidência de *swell* de norte que ocorrem ao longo do período simulado; alcançando valor máximo de aproximadamente 200 kW/m durante o último evento (entre os dias 2 e 6 de março). Também é possível observar a resposta das correntes a esses eventos, através da intensificação das velocidades que acompanham os aumentos da força de onda. As velocidades médias variam em torno de 0,2 m/s e as máximas ultrapassam 0,8 m/s, sendo superior ao dobro dos valores máximos obtidos no cenário *calmaria* e incidência de *swell* de sul.

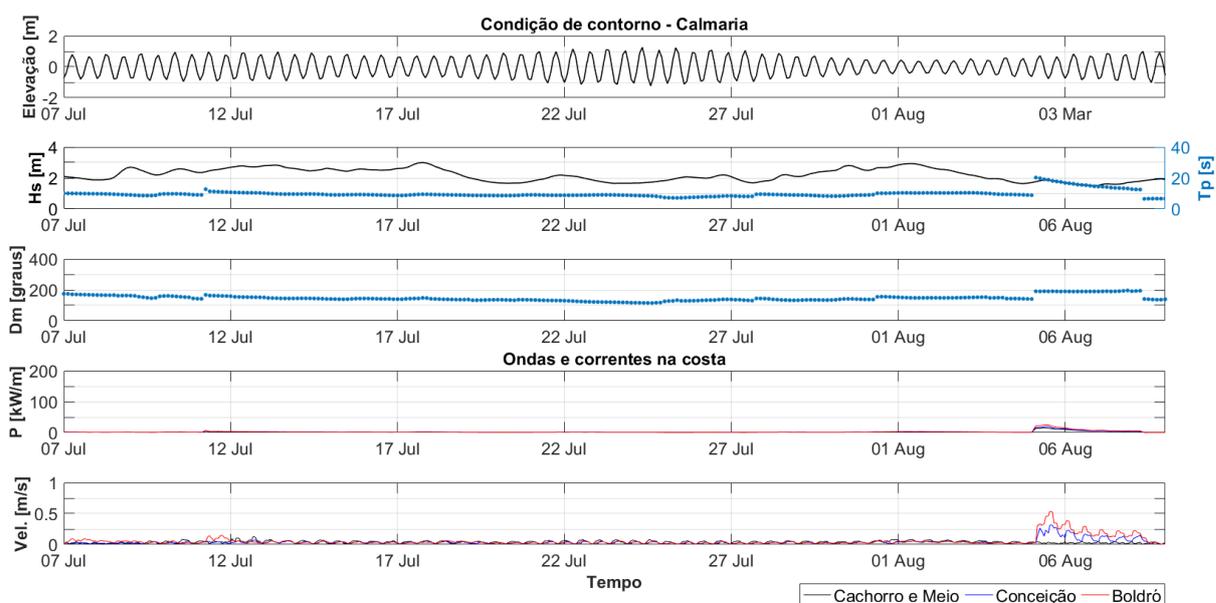


**Figura 5.11** Séries temporais do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e a força de onda e magnitude da velocidade das correntes resultantes da simulação do cenário *Swell\_mensal*.

Já o cenário *Calmaria\_mensal* representa um período de baixa energia no Mar de Dentro, isto é, com o predomínio de vagas sudeste e ocorrência eventos de incidência de ondas do tipo *swell* vindas de quadrante sul, que atingem a porção meridional do arquipélago (Mar de Fora) durante os meses de outono e inverno no hemisfério sul.

Na Figura 5.12 são apresentadas as séries temporais da variação do nível da água e dos parâmetros de ondas oceânicas, que foram utilizadas como condição de contorno na simulação do cenário Calmaria\_mensal, e a força de onda e a velocidade das correntes produzidas na costa. Na maior parte do período simulado, predominam as vagas de sudeste, com alturas significativas de aproximadamente 2 m e períodos em torno de 9 s; havendo aumento das alturas das ondas em alguns momentos, atingindo valores de até 3 m. Também é possível identificar um evento de incidência de *swell* de sul ao final do período da simulação, por volta dos dias 5 e 7 de agosto, com alturas significativas de aproximadamente 2 m e períodos atingindo valores superiores a 15 s.

A força de onda máxima alcançada na costa foi em torno de 25 kW/m e ocorreu durante a incidência das ondas de longo período vindas de quadrante sul. Ao analisar as velocidades de correntes produzidas nas proximidades das praias, identificamos o aumento da intensidade das correntes no mesmo período de força de onda máxima na costa, que ocorre entre os dias 5 e 7 de agosto, em um evento de incidência de *swell* de sul. Entretanto, as velocidades permanecem baixas em relação às correntes observadas nos resultados do cenário de incidência de *swell* de norte. As correntes apresentam velocidades médias em torno de 0,04 m/s e máximas de aproximadamente 0,3 m/s. Logo, os resultados evidenciam a baixa hidrodinâmica e agitação marítima que caracterizam o Mar de Dentro durante esse período.



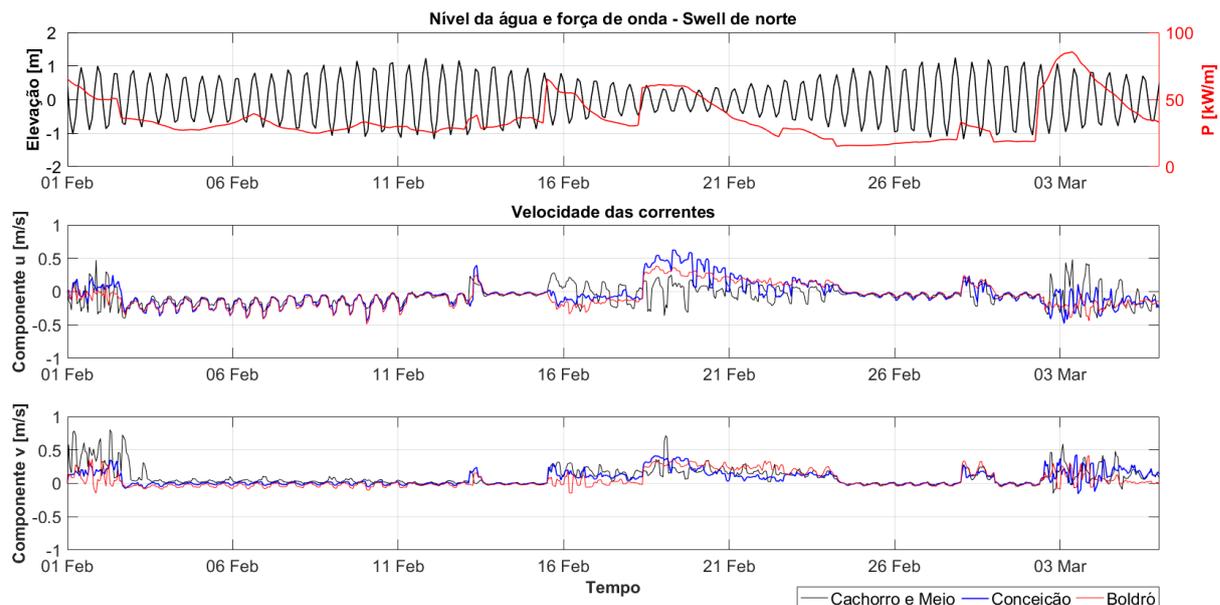
**Figura 5.12** Séries temporais do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e a força de onda e magnitude da velocidade das correntes resultantes da simulação do cenário Calmaria\_mensal.

Nos resultados de ambos os cenários, é possível observar que a intensidade e direção das correntes acompanham as variações do nível da água, apresentando variações cíclicas com período de aproximadamente 6 h, ocorrendo intensificação das correntes durante as condições de maré vazante. Além disso, as quatro praias analisadas demonstraram seguir o mesmo padrão hidrodinâmico em resposta à influência da maré e da ação das ondas.

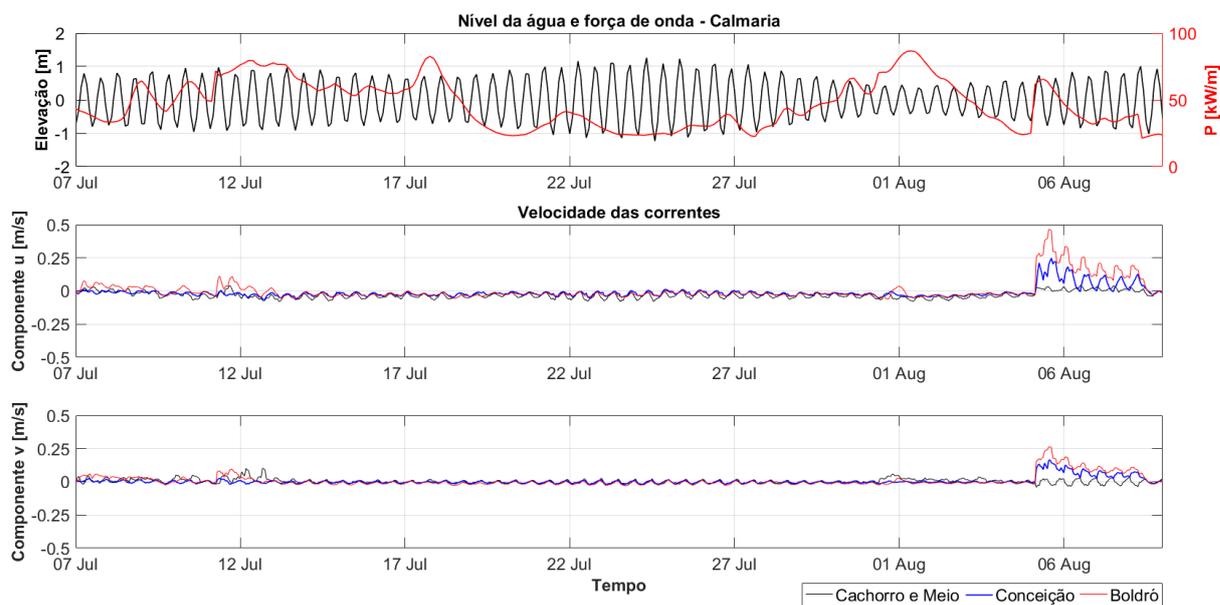
A partir das Figuras 5.13 e 5.14, podemos comparar as variações do nível da água e da força de onda na costa com as variações das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes resultantes dos cenários *Swell\_mensal* e *Calmaria\_mensal*, respectivamente. Assim, é possível avaliar a atuação dos fatores ambientais (maré e altura e período de onda) na hidrodinâmica costeira das proximidades das praias estudadas. As séries temporais utilizadas nas comparações foram extraídas dos resultados das simulações dos cenários *Swell\_mensal* e *Calmaria\_mensal*, nos pontos de observação distribuídos na isóbata de 5 m (Figura 5.10). Portanto, representam os períodos de maré de sizígia e quadratura sob as diferentes condições de incidência de ondas.

Analisando as Figuras 5.13 e 5.14, podemos fazer algumas observações a respeito da variação das componentes u e v da velocidade das correntes. A componente u é predominantemente negativa (para oeste), enquanto a componente v é predominantemente positiva (para norte). No cenário *Swell\_mensal*, a componente u apresentou valores máximos em torno de 0,6 m/s e a componente v alcançou velocidades máximas de 0,8 m/s. Já no cenário *Calmaria\_mensal*, os máximos foram de 0,5 m/s para a componente u e 0,25 m/s para a componente v. A variação da intensidade e direção de ambas as componentes ocorre a cada 6 h (período correspondente à meio ciclo da maré semidiurna), com o aumento de intensidade durante a maré vazante e alcançando máximos de velocidade na baixa-mar. Deste modo, é possível perceber a influência das variações do nível da água na circulação local.

Além disso, a intensidade das componentes u e v da velocidade é alterada de acordo com os parâmetros de altura significativa e período das ondas, que encontram-se representados através da força de onda. São observadas maiores velocidades de correntes durante os períodos de passagem de ondas com alturas e períodos maiores, que transportam maiores quantidades de energia até a costa. Durante esses eventos, nota-se maior intensificação da componente v da velocidade na direção norte (em direção à plataforma). Esse efeito da energia das ondas na velocidade das correntes se sobrepõe à influência da maré.

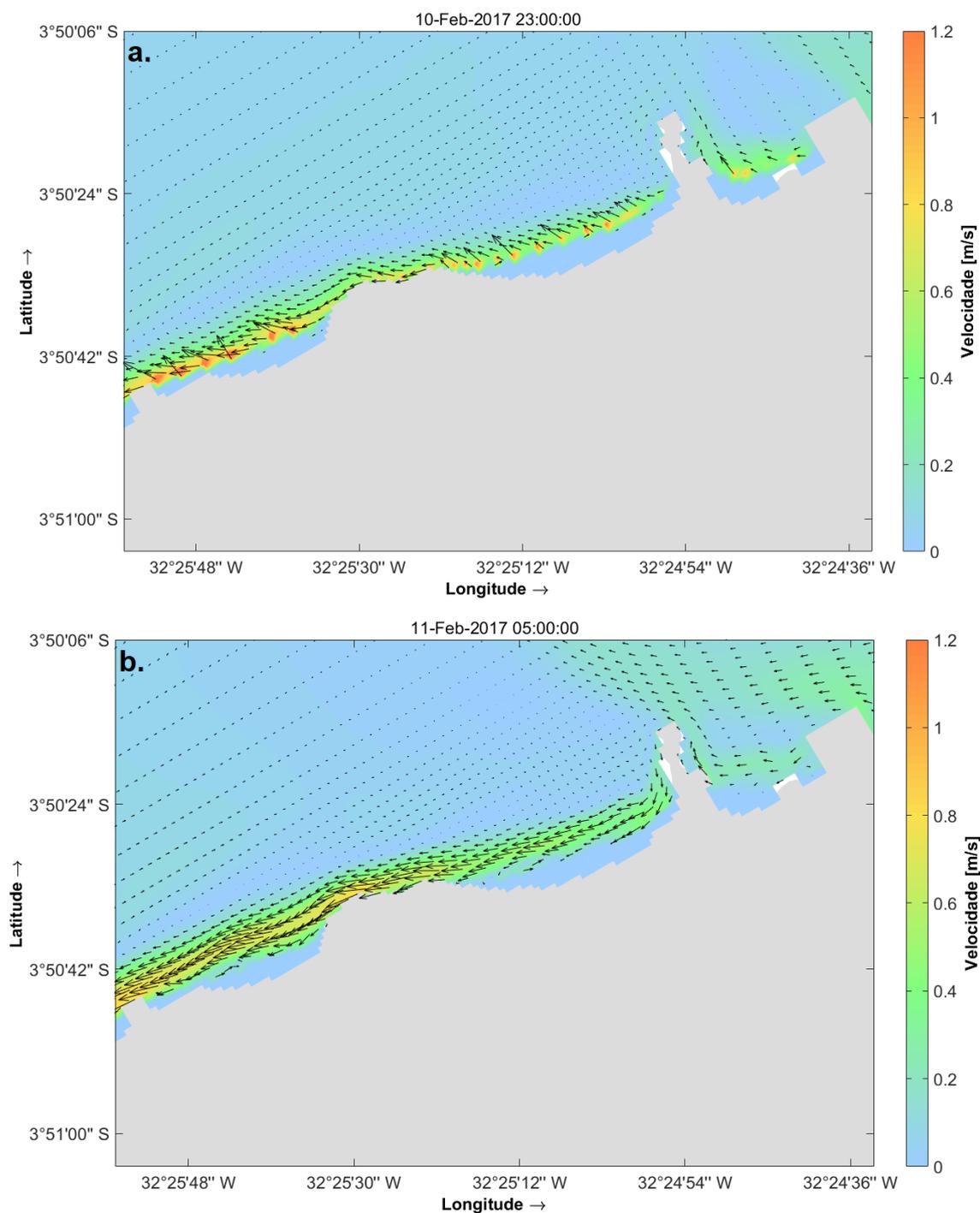


**Figura 5.13** Variação das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes, em resposta às variações do nível da água e da força de onda resultantes da simulação do cenário *Swell\_mensal*.



**Figura 5.14** Variação das componentes zonal (u) e meridional (v) da velocidade das correntes, em resposta às variações do nível da água e da força de onda resultantes da simulação do cenário *Calmaria\_mensal*.

Também foi verificado, a partir da análise dos resultados das simulações hidrodinâmicas, que as vazantes são dominantes e que nesses períodos ocorre a intensificação das correntes, principalmente da componente transversal à costa. Já nos períodos de enchente, as velocidades perpendiculares à costa perdem intensidade e a componente longitudinal à costa torna-se mais evidente. Na Figura 5.15 são apresentados campos de velocidade das correntes na região das praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, representativos de condições de vazante (Figura 5.15a) e enchente (Figura 5.15b), durante evento de incidência de *swell* de norte representado na simulação do cenário *Swell\_mensal*, a fim de exemplificar o padrão de circulação predominante nessas condições de maré. De acordo com Assunção (2017), o atrito com o fundo causa uma diferença de fase entre as constantes de maré semidiurna e quaterdiuna (*overtides*), refletindo na intensificação das correntes de fluxo vazante.

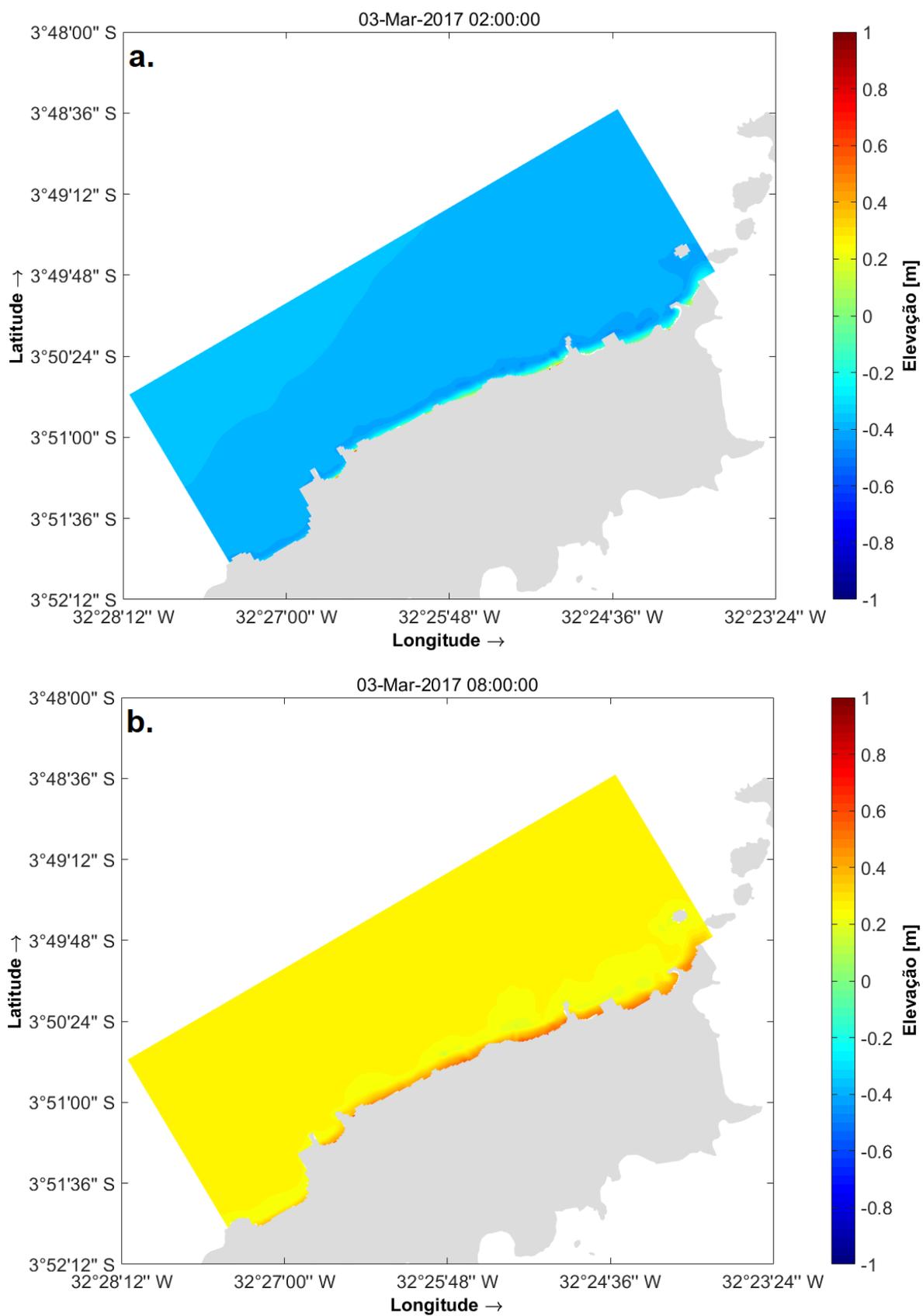


**Figura 5.15** Velocidade das correntes resultantes da simulação do cenário *Swell\_mensal*, representando as condições de a. vazante e b. enchente. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção das correntes.

Foi observado que a direção preferencial das correntes longitudinais à costa, em uma estreita faixa junto à costa (zona de surfe), é para sudoeste. Este resultado coincide com os resultados do modelo qualitativo de circulação costeira, baseado nas características sedimentares, proposto por Barcellos et al. (2018), e com os resultados obtidos por Ambrosio et al. (2022), através da aplicação de modelagem numérica de ondas e de cálculos empíricos de deriva potencial.

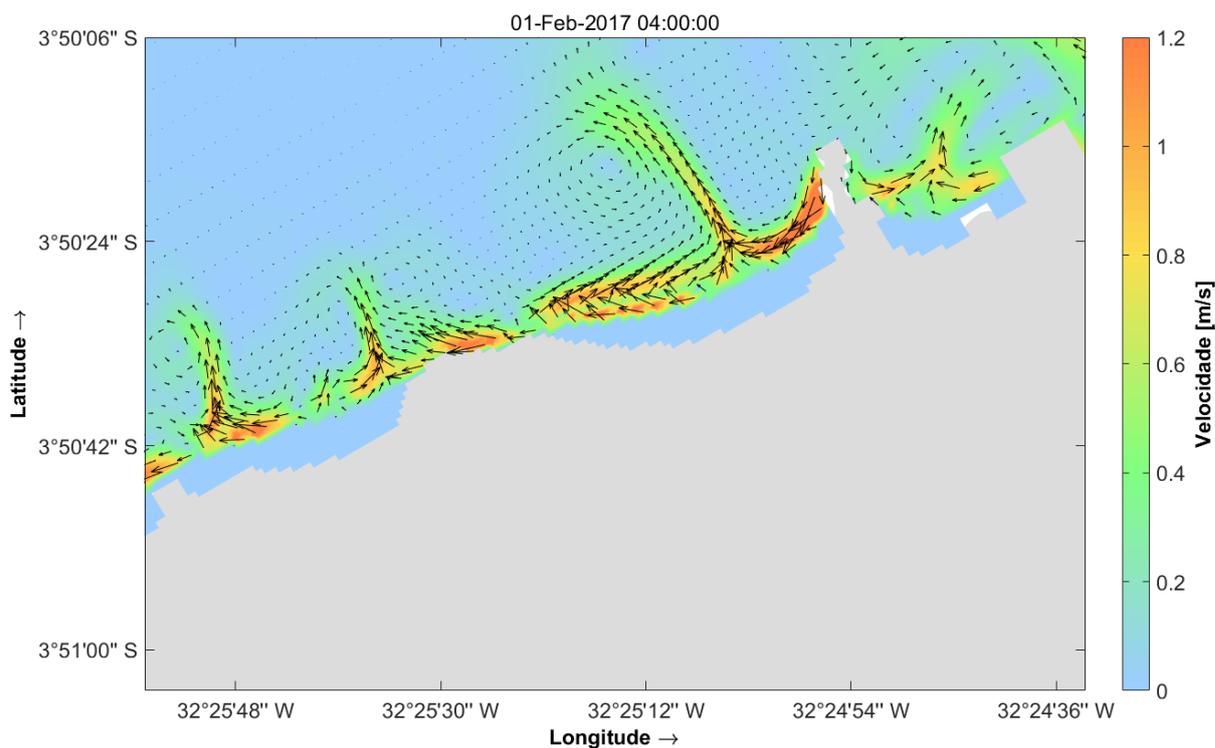
Outra característica identificada nos resultados da modelagem hidrodinâmica é que, durante os períodos de incidência de *swell* de norte, ocorre a constante sobrelevação do nível médio da água junto à costa (Figura 5.16), representando o efeito das ondas na variação do nível da água, denominado sobrelevação em função das ondas (*set-up*), que ocorre quando parte da energia das ondas mantém uma inclinação da superfície do mar. Segundo Tait (1972), esse efeito pode ser aumentado em função do aumento de altura e período das ondas que chegam na costa.

O empilhamento de água na costa devido à atuação das ondas de longo período vindas de quadrante norte (direção quase ortogonal à costa), gera um gradiente de pressão barotrópico que pode explicar parte da intensificação das correntes durante os períodos de vazante e a predominância de correntes em direção à plataforma observados nos resultados das simulações.



**Figura 5.16** Sobrelevação do nível médio da água junto à costa, durante períodos de incidência de *swell* de norte, em condições de a. vazante e b. enchente.

Nos períodos mais energéticos, marcados pela ocorrência de *swells* de norte, a região setentrional da Ilha de Fernando de Noronha apresenta alta hidrodinâmica. Durante essas condições, as correntes costeiras apresentam maiores velocidades e os fluxos transversais à costa, em direção à plataforma, são mais intensos. Observamos maior ocorrência de correntes de retorno nas praias, deflexão das correntes nas proximidades de obstáculos (como promontórios rochosos e ilhotas), correntes costeiras em sentidos opostos e as células de circulação costeira são mais evidentes (Figura 5.17).



**Figura 5.17** Circulação costeira durante evento de alta energia com incidência de *swell* de norte. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção das correntes.

#### ***5.4.3. Transporte sedimentar e alterações morfológicas nas praias arenosas da porção setentrional do arquipélago sob influência da sazonalidade do clima de ondas***

Neste item, serão apresentados os principais resultados obtidos a partir da aplicação do modelo morfológico, que inclui a modelagem do transporte de sedimentos arenosos não-coesivos e das alterações da morfologia de fundo em decorrência dos processos erosivos e deposicionais. Nas simulações foi considerado o efeito mútuo das ondas e das correntes na dinâmica sedimentar, bem como o efeito da contínua evolução do fundo na propagação das ondas e na hidrodinâmica.

A fim de representar as principais características sazonais da morfodinâmica das praias arenosas da porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, foram realizados quatro experimentos numéricos. Estes combinam duas condições de agitação marítima na região do Mar de Dentro (incidência de *swell* de norte e de calmaria), referentes à sazonalidade do clima de ondas local, e duas escalas temporais (escala de evento e mensal). A descrição dos cenários pode ser consultada na Tabela 5.3.

Aqui faremos uma abordagem geral dos resultados, destacando as características bem definidas dos padrões de transporte sedimentar e de alterações morfológicas para ambas as condições de agitação marítima nas escalas temporais de evento e mensal. As análises realizadas são de caráter qualitativo e semi-quantitativo, pois o objetivo aqui proposto é baseado em avaliar a dinâmica sedimentar em resposta às condições de ondas. Além disso, embora o modelo implementado tenha sido calibrado e validado para a propagação de ondas e hidrodinâmica, a qualidade dos resultados do modelo morfológico foi avaliada utilizando-se apenas o conhecimento prévio da área de estudo, baseado na literatura disponível e na análise do comportamento da linha de costa com base no Capítulo 4.

Assim como no item 5.4.2, a descrição e discussão dos resultados da modelagem morfossedimentar terá ênfase nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, onde foram definidos pontos de observação e perfis perpendiculares e paralelos à costa, para uma análise mais detalhada das informações obtidas a respeito do transporte sedimentar e das mudanças do fundo.

#### Transporte total médio

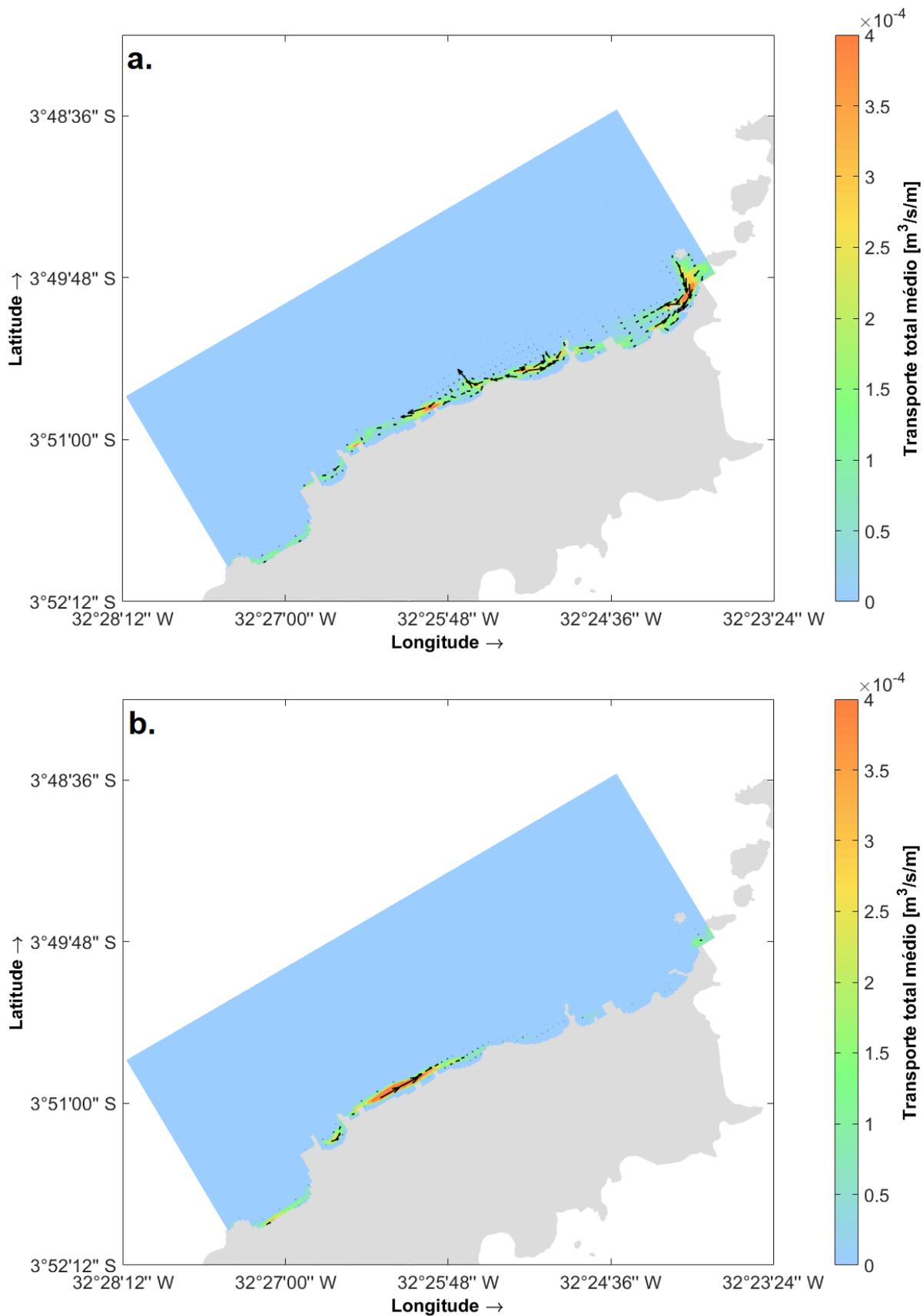
Nas Figuras 5.18a, b e 5.19a, b são apresentados os mapas representativos do transporte total médio de sedimentos arenosos para os cenários em escala temporal de evento (Figura 5.18) e mensal (Figura 5.19); sendo a. condição de incidência de *swell* de norte e b. condição de calmaria na região do Mar de Dentro. Portanto, referem-se à condição média da soma dos transportes de fundo e em suspensão resultante do período da simulação. A escala de cores indica a magnitude (em  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar. As Figuras 5.20 e 5.21 mostram um recorte espacial dos mapas anteriores, com aproximação para a região onde encontram-se as praias de interesse deste estudo.

Ao analisar os mapas do transporte total médio de sedimentos não-coesivos, com densidade de  $2,50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  e diâmetro mediano de  $0,025 \text{ cm}$  (areia fina a média), resultante das simulações dos cenários, notamos que os valores máximos são relativamente baixos (aproximadamente  $0,0004 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) e que ocorre de forma mais eficiente em uma estreita faixa

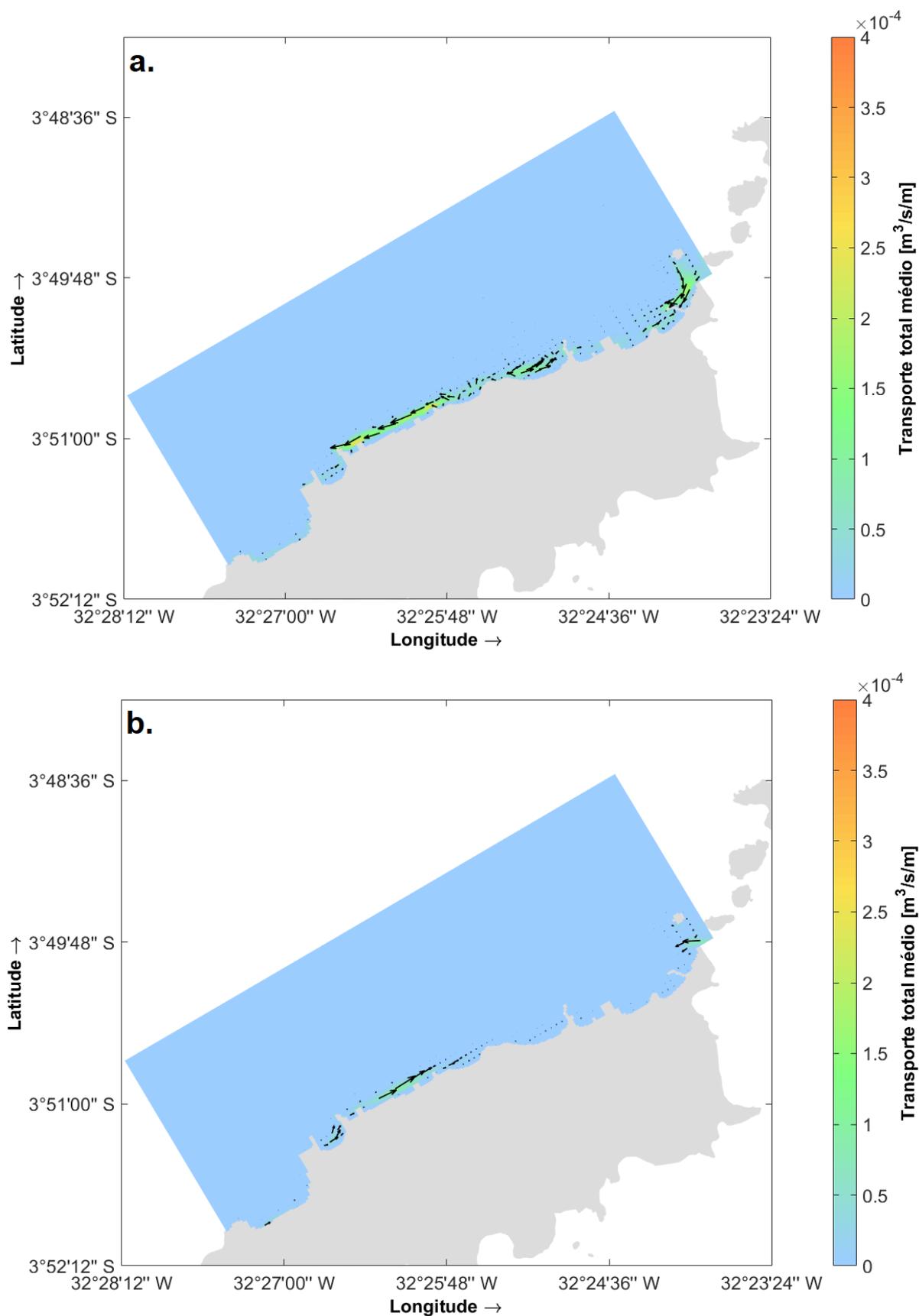
junto à costa, na qual há influência efetiva das ondas no transporte sedimentar e atuação das correntes litorâneas, na denominada zona de surfe.

Quando comparamos os cenários de incidência de *swell* de norte (Figuras 5.18a, 5.19a, 5.20a e 5.21a) e os cenários de calmaria (Figuras 5.18b, 5.19b, 5.20b e 5.21b), é possível observar um nítido aumento do transporte sedimentar nos cenários de incidência de *swell* de norte, que ocorre ao longo de praticamente toda a costa setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, com especial incremento da componente transversal (*cross-shore*) do transporte, que em termos médios aparece de forma mais pronunciada nas praias localizadas no setor central-nordeste do litoral da ilha, onde encontram-se as praias analisadas neste estudo. Esse aumento da importância relativa da componente transversal à costa devido à incidência de *swells* de quadrante norte, pode ser melhor observado na visualização aproximada (Figuras 5.20a e 5.21a), sobretudo nas praias Conceição e Boldró. Já nos cenários de calmaria, o transporte de sedimentos é predominantemente longitudinal à costa e apresenta menores intensidades, principalmente nas praias localizadas nos setores central-nordeste (Figuras 5.20b e 5.21b). Nas praias do setor sudoeste (praias Cacimba do Padre, Baía dos Porcos e Baía do Sancho), nota-se a intensificação do transporte longitudinal e a inversão no sentido desse transporte (Figuras 5.18b e 5.19b).

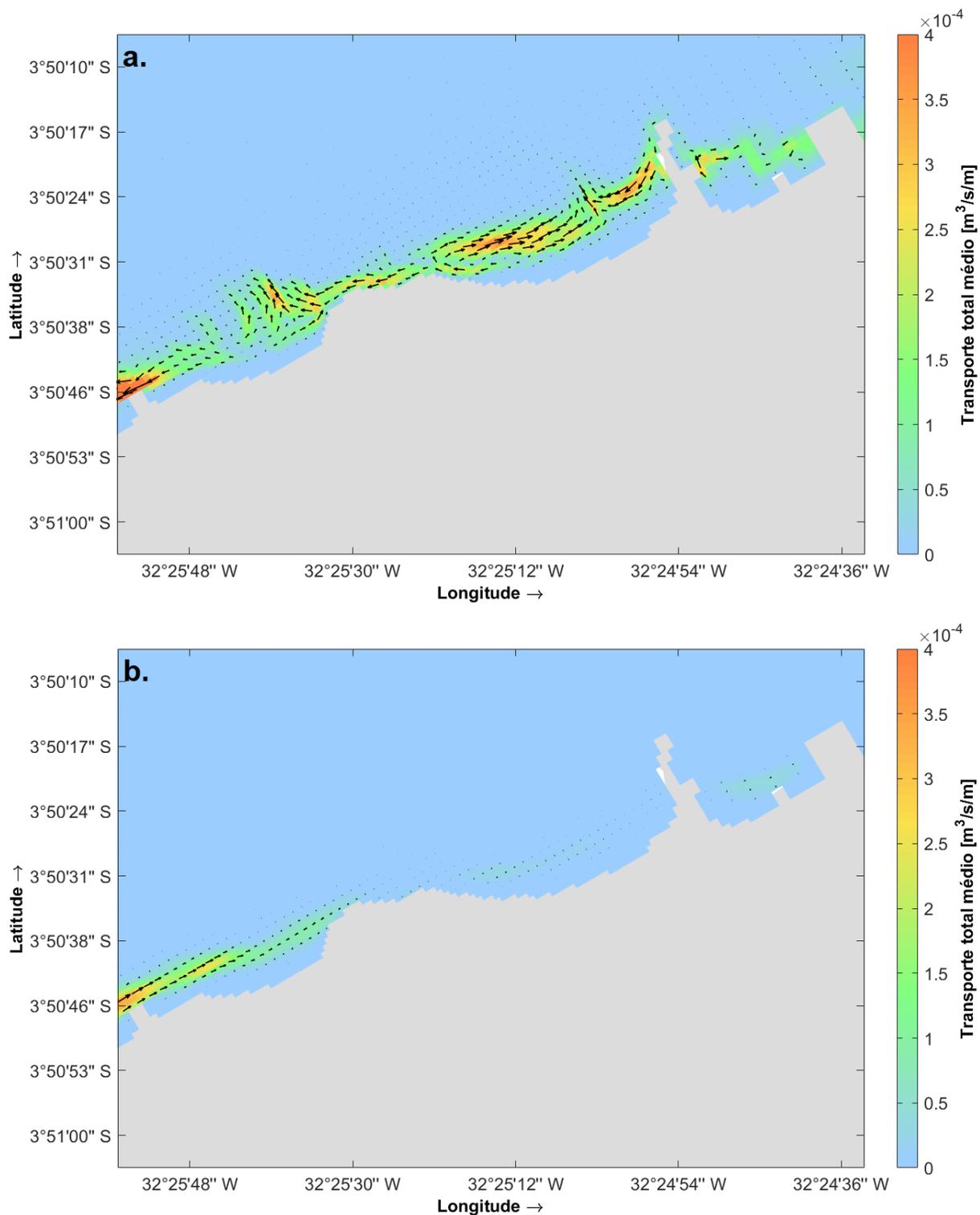
Em termos de escala temporal, por se tratar de um parâmetro médio (transporte total médio), os efeitos dos eventos mais energéticos, caracterizados principalmente pela incidência de ondas de longo período, são suavizados nos resultados dos cenários que compreendem a simulação de períodos mensais, pois os efeitos das vagas de leste e sudeste também são considerados no transporte médio resultante do cenário.



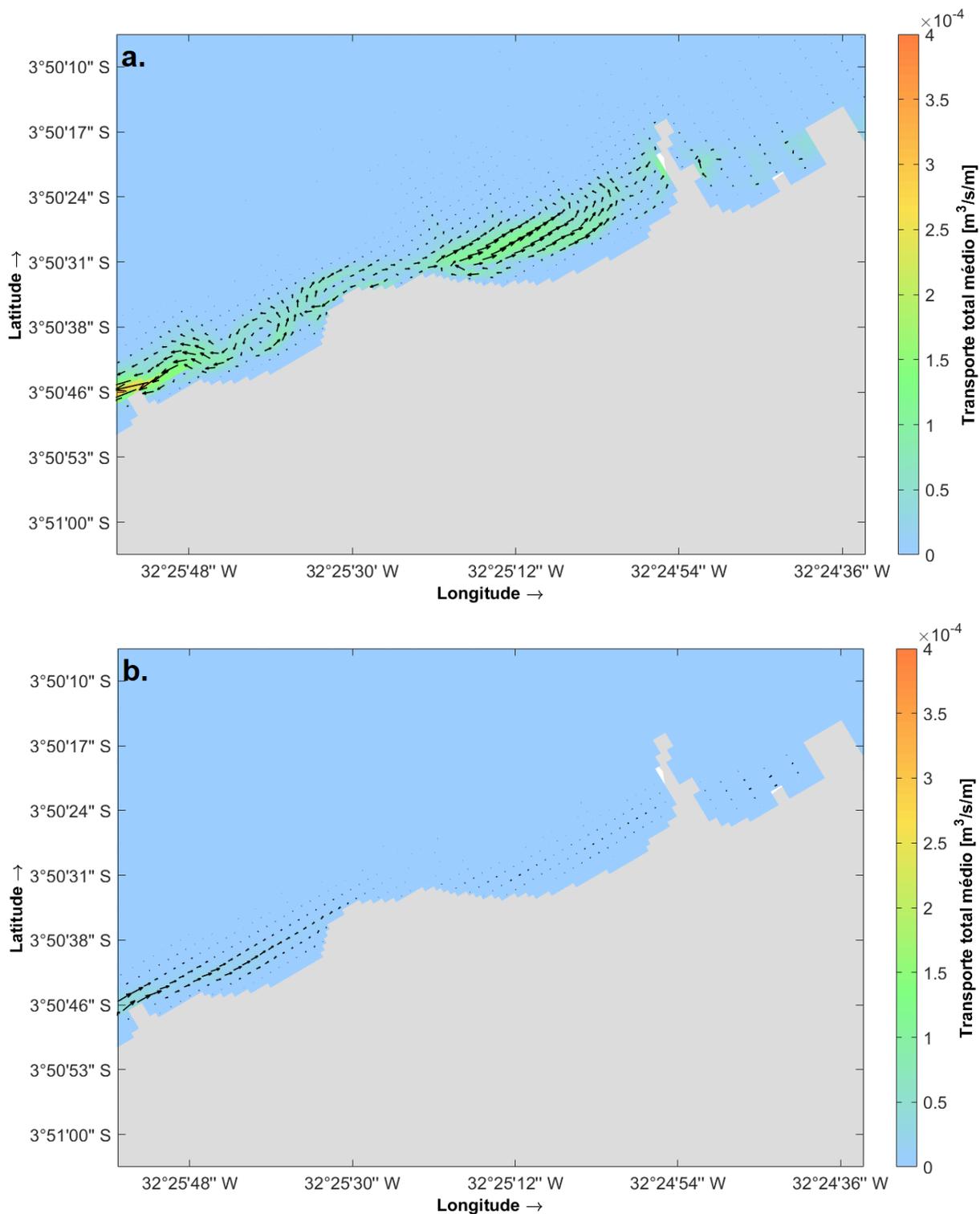
**Figura 5.18** Transporte total médio de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_evento*; b. *Calmia\_evento*. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar.



**Figura 5.19** Transporte total médio de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_mensal*; b. *Calmaria\_mensal*. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar.



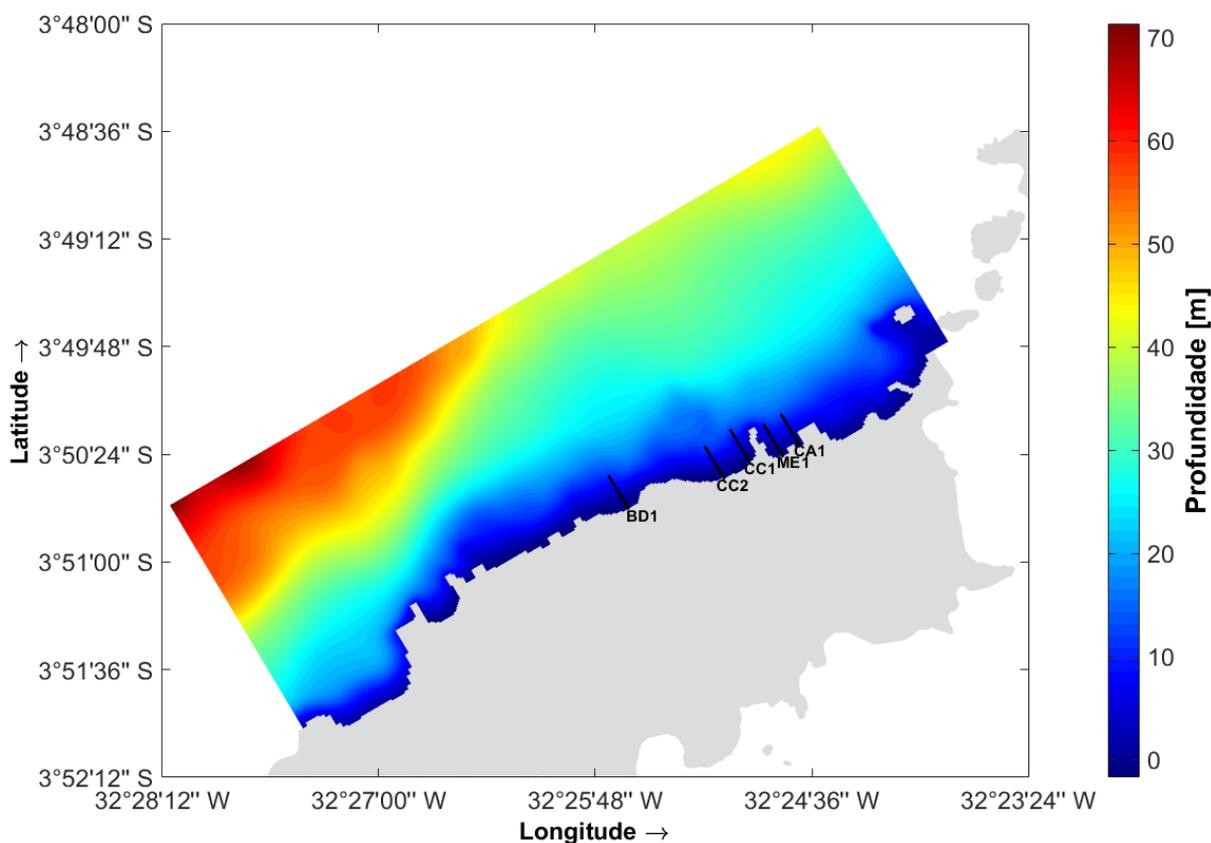
**Figura 5.20** Transporte total médio de sedimentos arenosos nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, resultante dos cenários: a. *Swell\_evento*; b. *Calmaria\_evento*. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar.



**Figura 5.21** Transporte total médio de sedimentos arenosos nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, resultante dos cenários: a. *Swell\_mensal*; b. *Calmaria\_mensal*. A escala de cores indica a magnitude e os vetores indicam a direção do transporte sedimentar.

### Transporte longitudinal à costa

Foram definidos perfis perpendiculares à costa, localizados nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), a partir dos quais foram extraídos os resultados da modelagem morfológica. Os perfis apresentam ponto inicial na costa e comprimento de aproximadamente 400 m em direção à plataforma. A localização dos perfis pode ser visualizada na Figura 5.22.



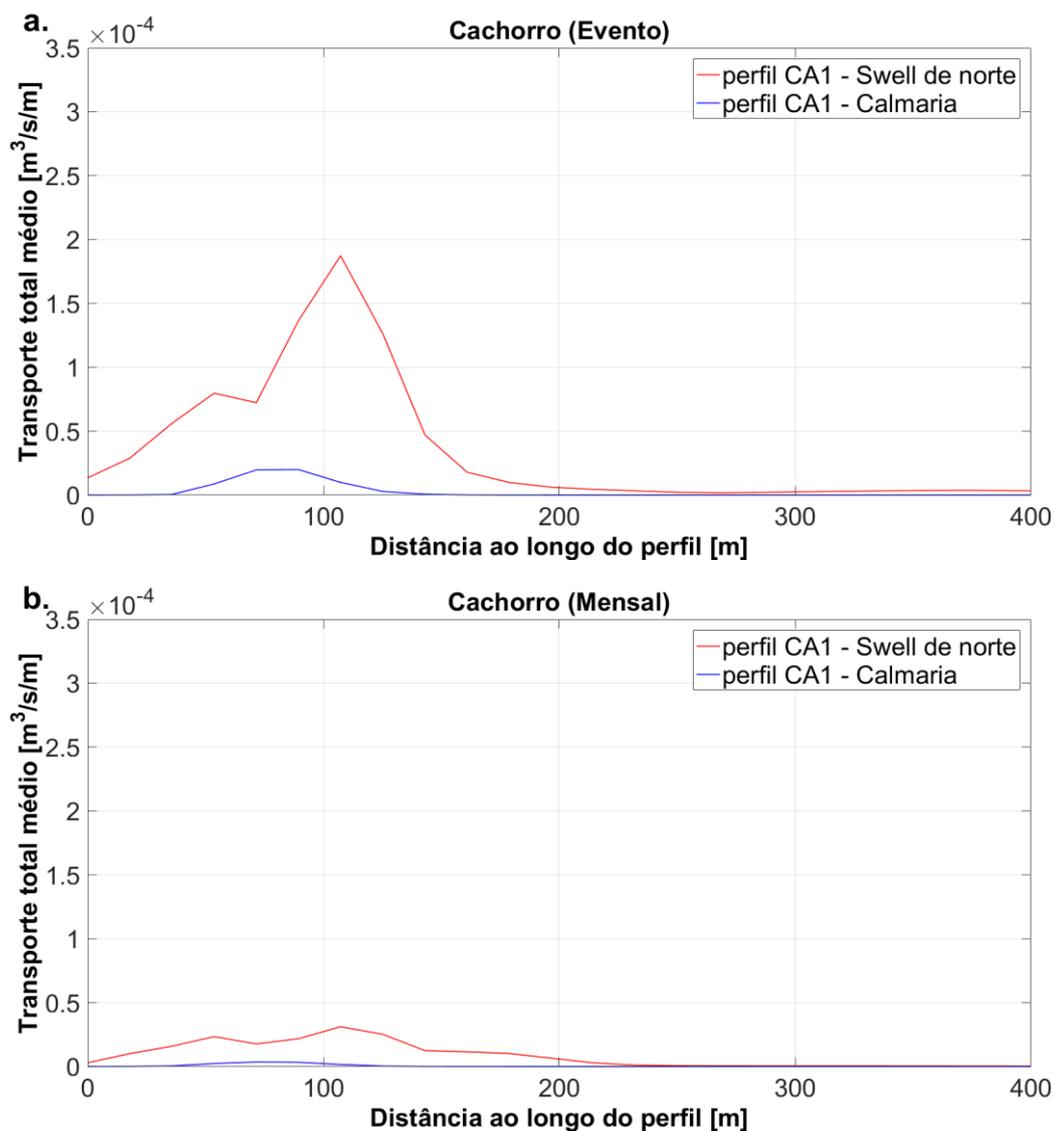
**Figura 5.22** Localização dos perfis perpendiculares à costa, nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica.

As Figuras 5.23a, b a 5.27a, b mostram as variações do transporte total médio (em  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) de sedimentos arenosos ao longo dos perfis CA1, ME1, CC1, CC2 e BD1, respectivamente. O transporte referente aos cenários de incidência de *swell* de norte são representados pela linha vermelha e os de calmaria pela linha azul; sendo a. cenários em escala temporal de evento e b. mensal. Neste caso, como estamos observando o transporte que cruza o perfil perpendicular à costa, estamos analisando a componente longitudinal (*longshore*) do transporte.

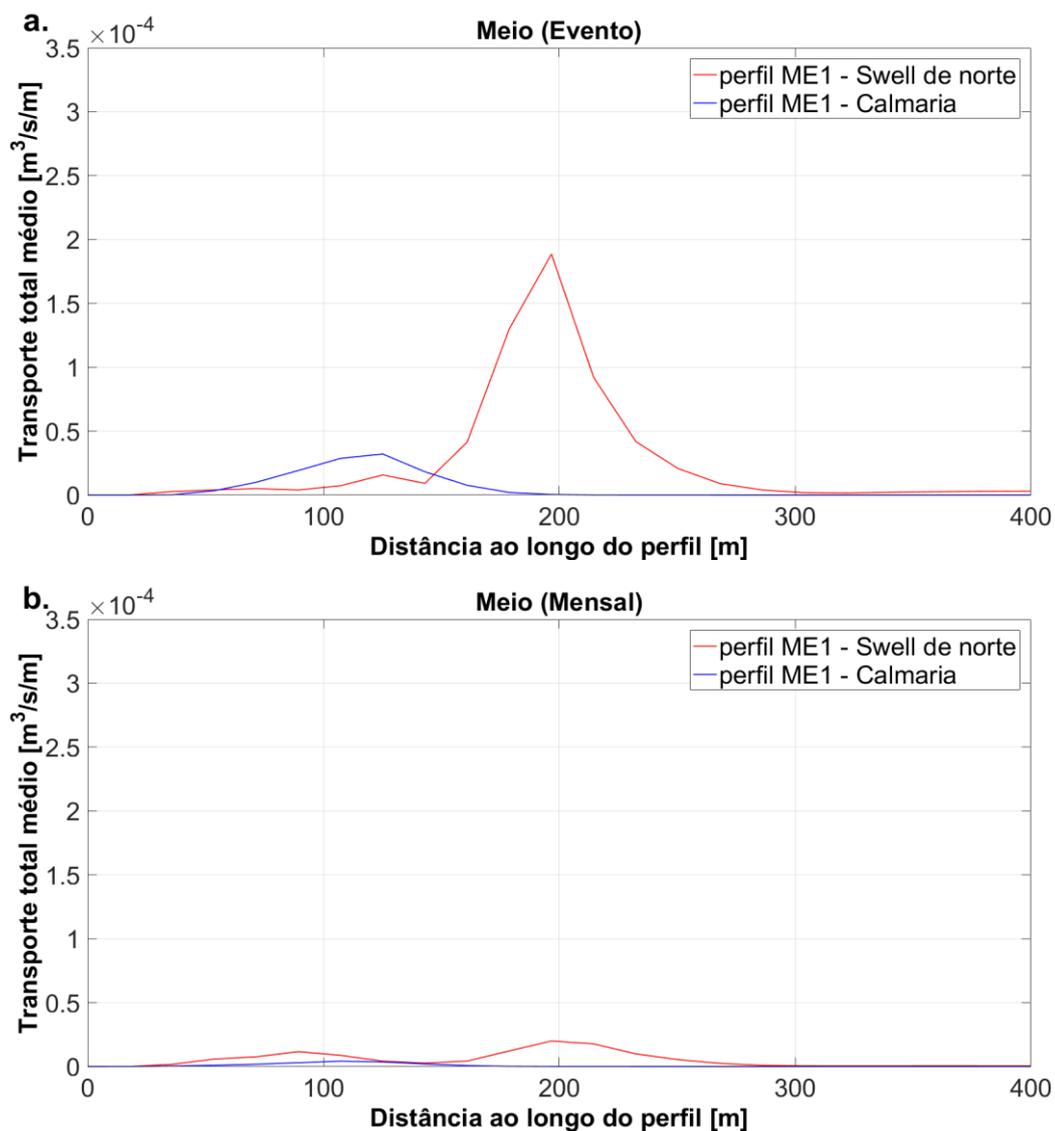
De maneira geral, são observadas maiores intensidades de transporte longitudinal nos perfis CC1 e CC2, localizados na praia da Conceição, com valores máximos superiores a 0,0003 e 0,0002 m<sup>3</sup>/s/m (no cenário *Swell\_evento*), respectivamente (Figuras 5.25a e 5.26a). Na maioria dos perfis a máxima intensidade do transporte ocorre entre 100 e 200 m de distância nos cenários de *swell* de norte e em torno da distância de 100 m durante a calmaria. Esse pode ser um indicativo da dinâmica da zona de surfe, em relação a sua largura e distância da costa.

Assim como nos resultados de distribuição espacial do transporte total médio, apresentados anteriormente, os cenários de calmaria apresentaram taxas de transporte bastante inferiores às observadas durante os eventos de alta energia. Portanto, verificamos que os períodos de calmaria são caracterizados por menor transporte sedimentar e o transporte longitudinal ocorre mais perto da costa. Já nos períodos de atuação dos *swells* de norte, o transporte longitudinal apresenta maiores intensidades e ocupa uma área maior dos perfis.

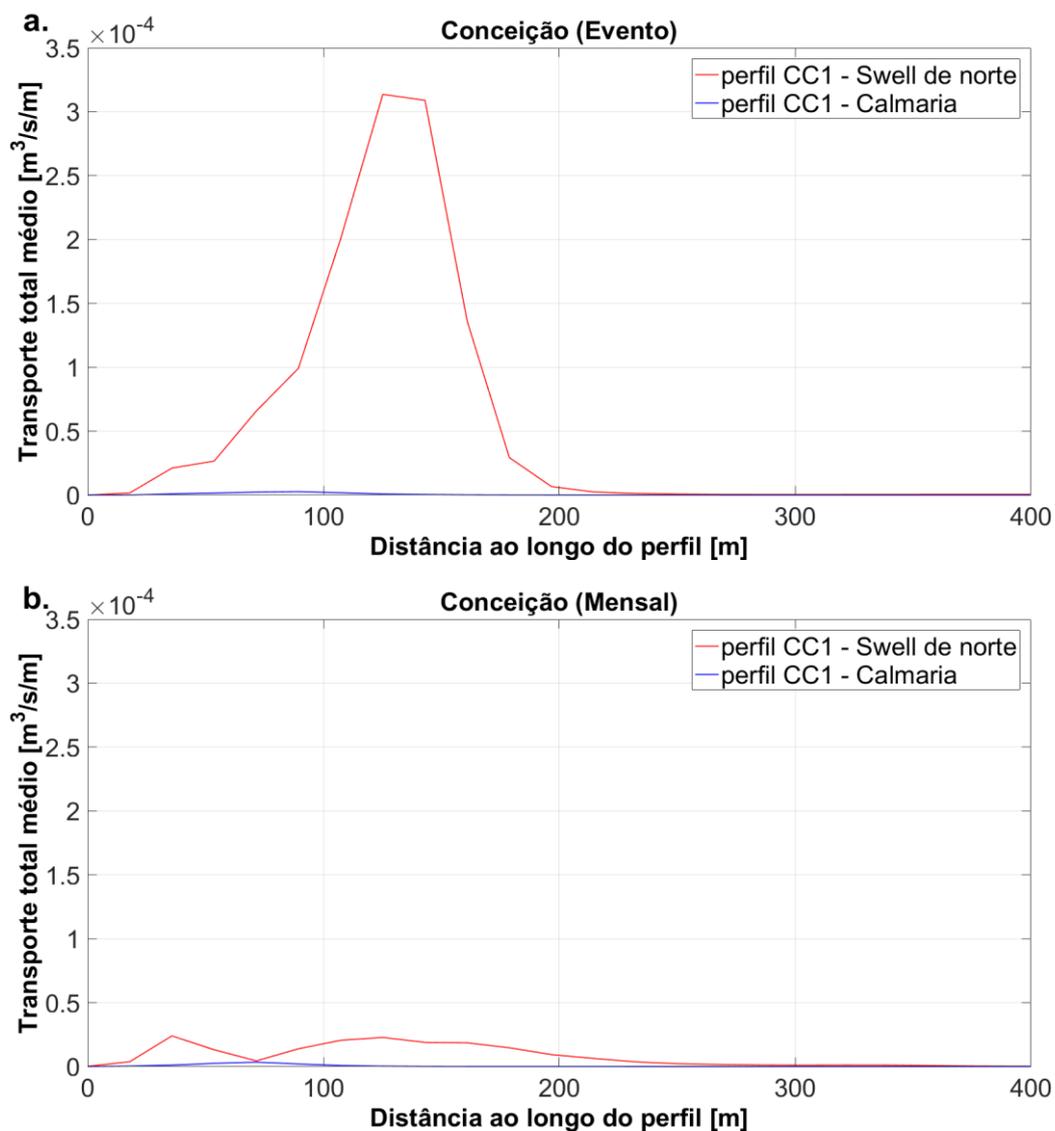
Além disso, devido a ocorrência das vagas de leste e sudeste durante as simulações dos períodos mensais, os efeitos da ação dos *swells* de norte no transporte de sedimentos são suavizados nos resultados dos cenários representativos da escala mensal. Isso resulta em taxas de transporte aproximadamente uma ordem de grandeza menores em comparação aos resultados das simulações em escala de evento, nas quais o efeito dos *swells* é tratado de forma praticamente isolada. Entretanto, ainda assim, é observado um padrão de variabilidade do transporte muito parecido entre as duas escalas temporais.



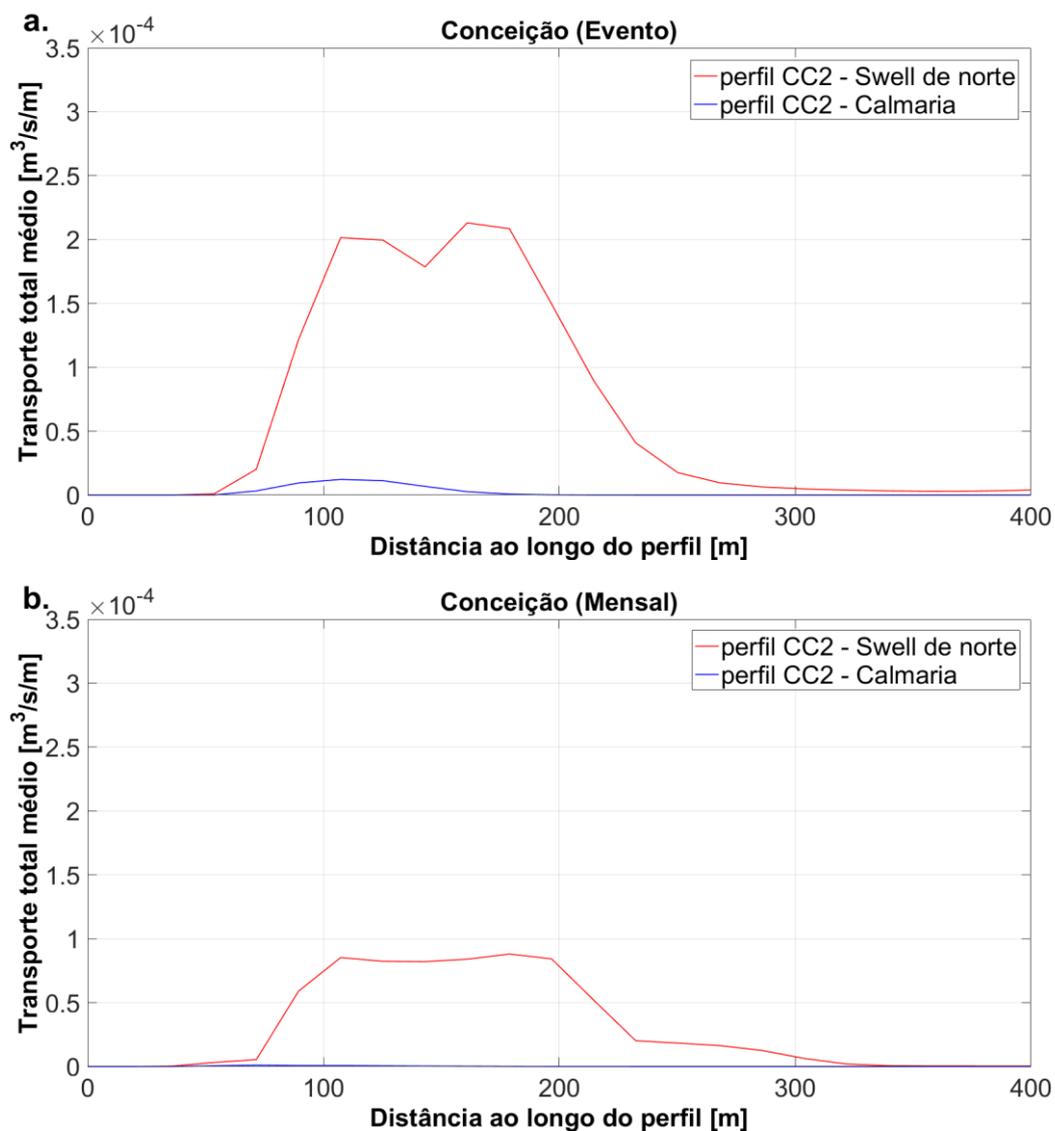
**Figura 5.23** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia do Cachorro (CA1), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



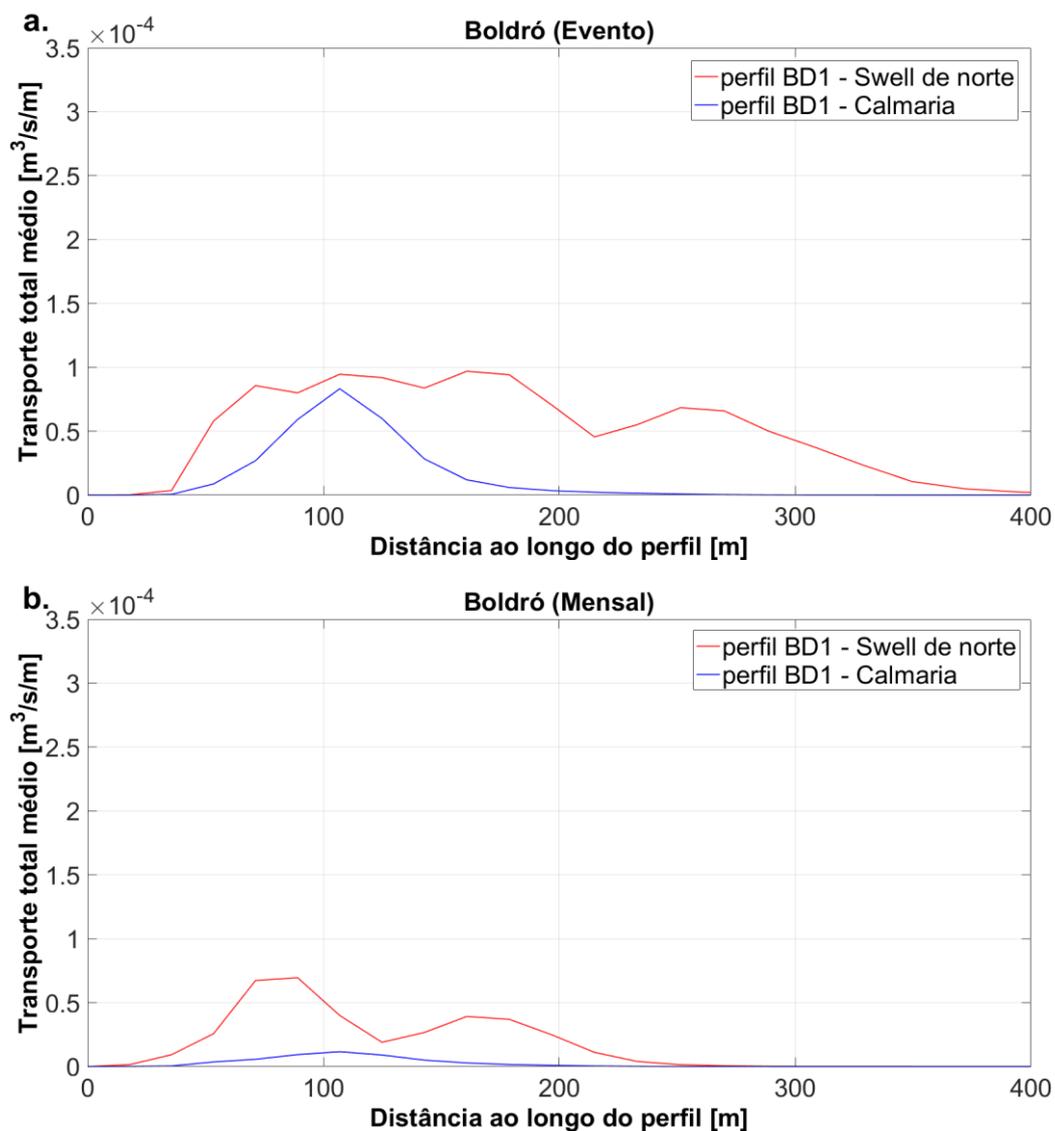
**Figura 5.24** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia do Meio (ME1), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



**Figura 5.25** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia da Conceição (CC1), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



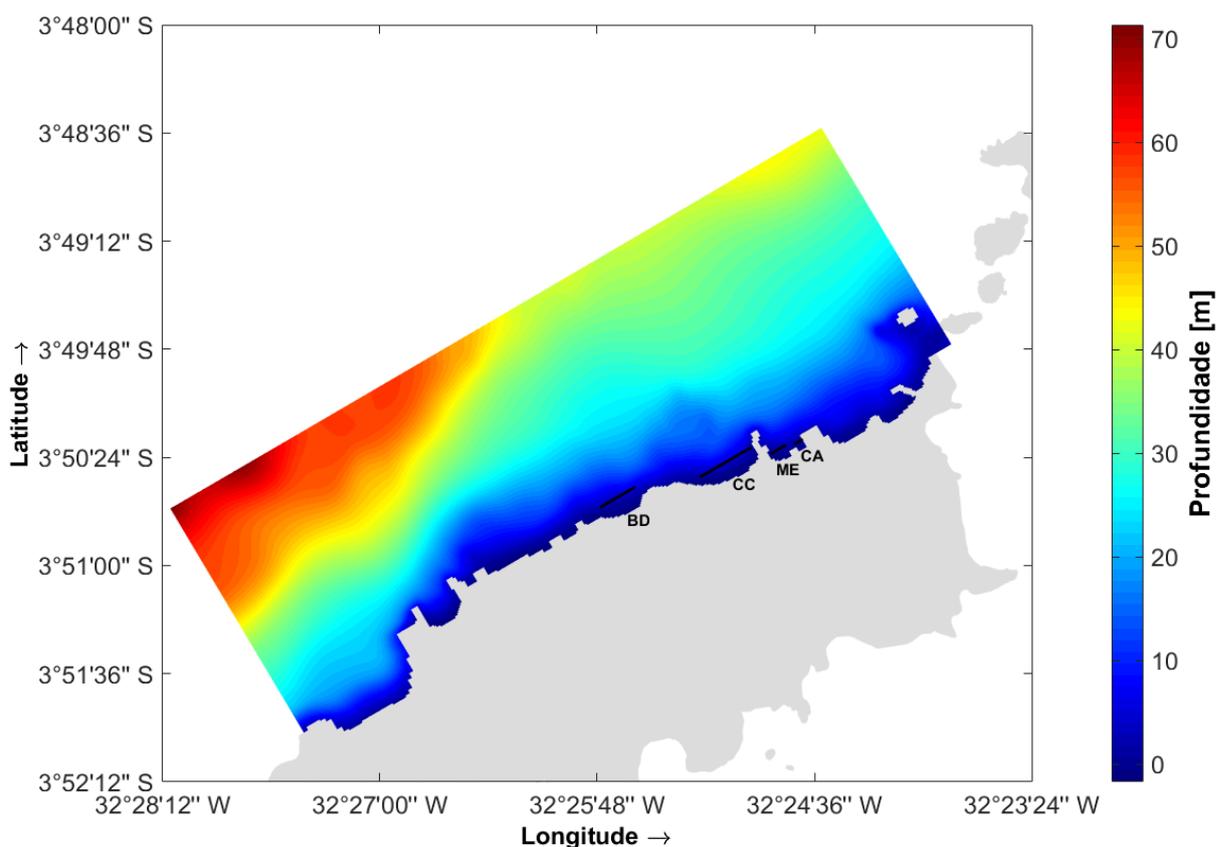
**Figura 5.26** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia da Conceição (CC2), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



**Figura 5.27** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil perpendicular à costa localizado na praia do Boldró (BD1), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.

### Transporte transversal à costa

Adicionalmente, foram definidos perfis paralelos à costa, localizados nas praias do Cachorro (CA), Meio (ME), Conceição (CC) e Boldró (BD), que também foram utilizados para a extração de resultados da modelagem morfológica. Estes perfis apresentam ponto inicial na extremidade oeste (esquerda) e comprimento variável de acordo com a extensão da praia. A localização dos perfis pode ser visualizada na Figura 5.28.



**Figura 5.28** Localização dos perfis paralelos à costa, nas praias do Cachorro (CA), Meio (ME), Conceição (CC) e Boldró (BD), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica.

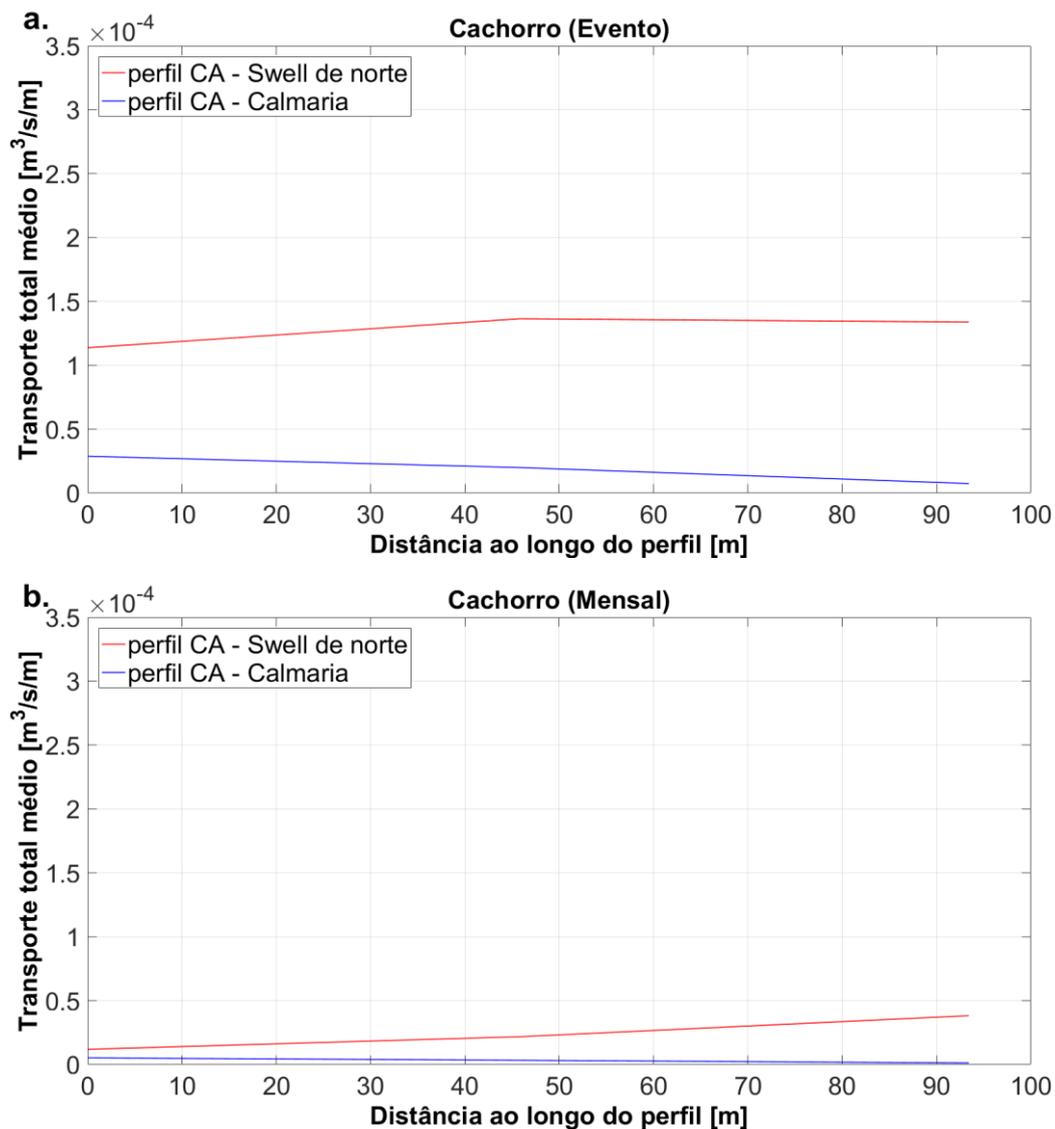
As Figuras 5.29a, b a 5.32a, b mostram as variações do transporte total médio (em  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ) de sedimentos arenosos ao longo dos perfis CA, ME, CC e BD, respectivamente. O transporte referente aos cenários de incidência de *swell* de norte são representados pela linha vermelha e os de calmaria pela linha azul; sendo a. cenários em escala temporal de evento e b. mensal. Neste caso, como estamos observando o transporte que atravessa o perfil paralelo à costa, estamos analisando a componente transversal (*cross-shore*) do transporte.

São observadas maiores intensidades de transporte transversal nos perfis CC e BD, localizados nas praias Conceição e Boldró, respectivamente. Em ambos os perfis, os valores

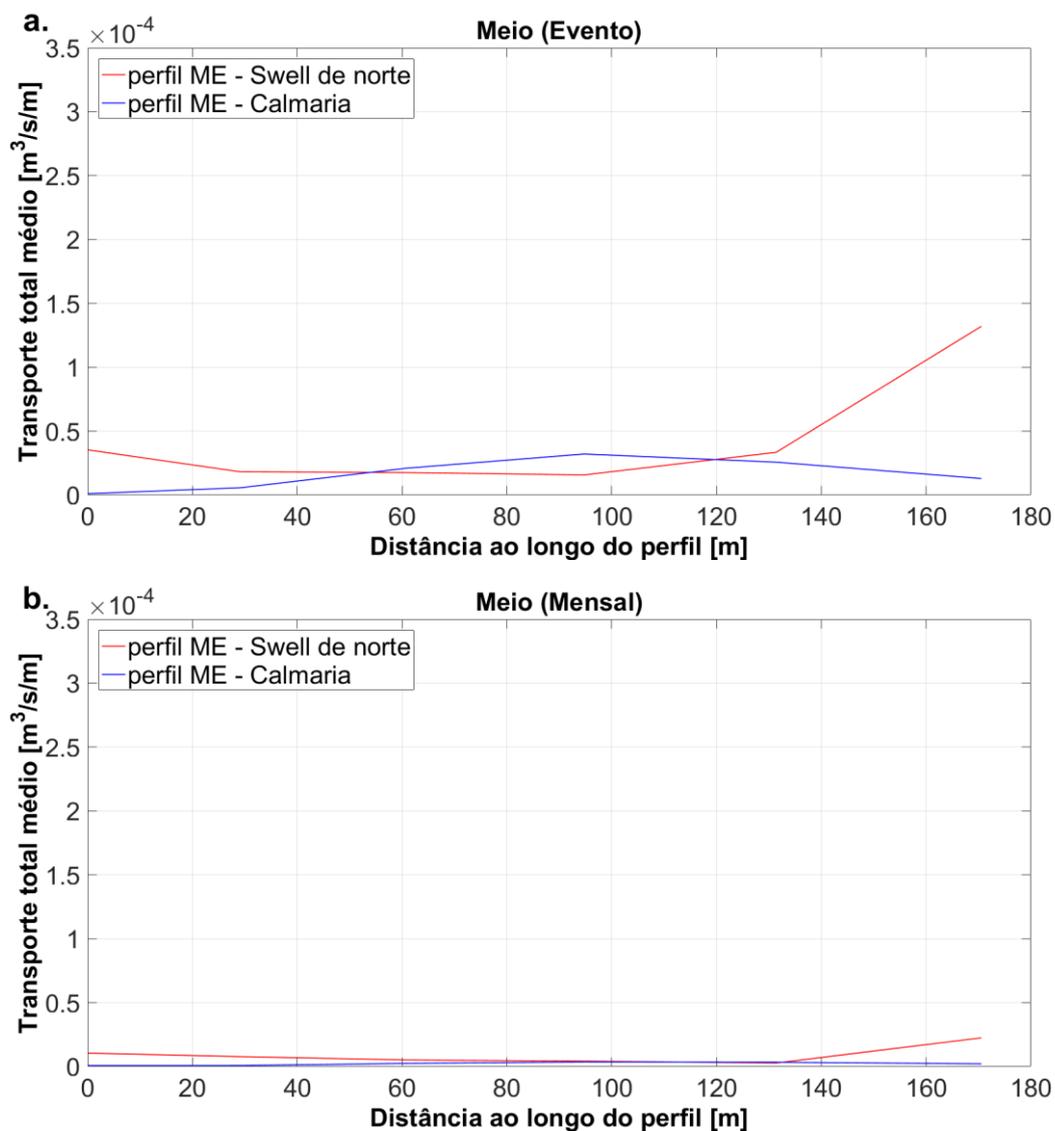
máximos de transporte são superiores a  $0,0003 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (no cenário *Swell\_evento*) (Figuras 5.31a e 5.32a). A faixa de perfil na qual ocorre o aumento do transporte transversal é variável, dependendo da praia e da condição de onda observada.

Assim, como observado nos resultados de transporte longitudinal à costa, os cenários de calmaria apresentaram taxas de transporte menores que as observadas durante os eventos de *swell* de norte. Entretanto, nos perfis das praias Conceição e Boldró, notamos que no início do perfil (setor oeste da praia) o transporte transversal é intenso também nos cenários de calmaria. Essas regiões são caracterizadas por apresentar fundo irregular e maior força de onda na costa, como discutido no Capítulo 3. Tal característica da morfologia de fundo pode contribuir para que a componente transversal do transporte seja favorecida independentemente da condição de incidência de ondas.

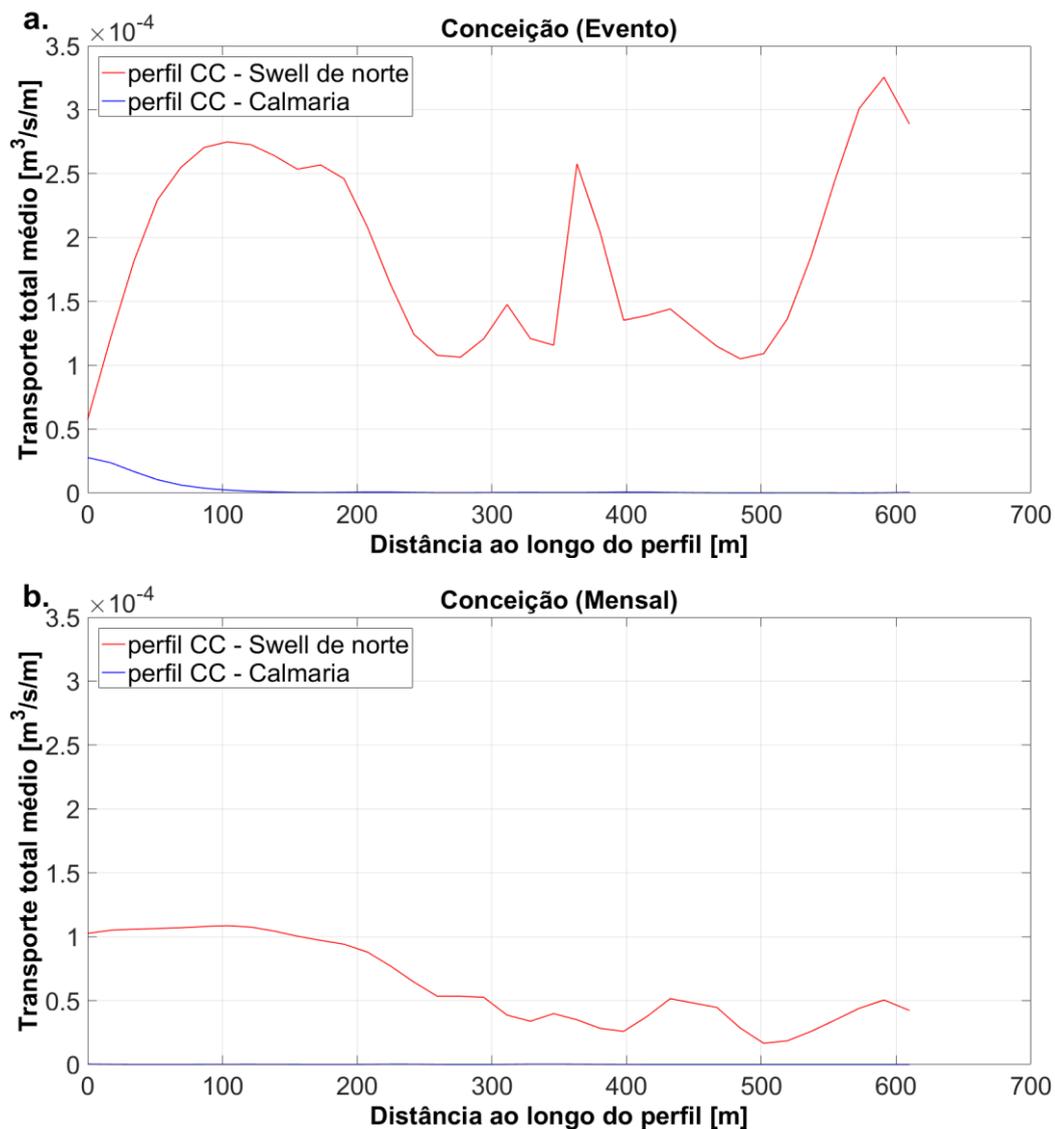
Do mesmo modo, os resultados das simulações dos cenários em escala de evento e mensal são semelhantes entre si, diferindo na magnitude do transporte, que é maior na escala de evento, pois não há interferência da ação das vagas no resultado médio do cenário.



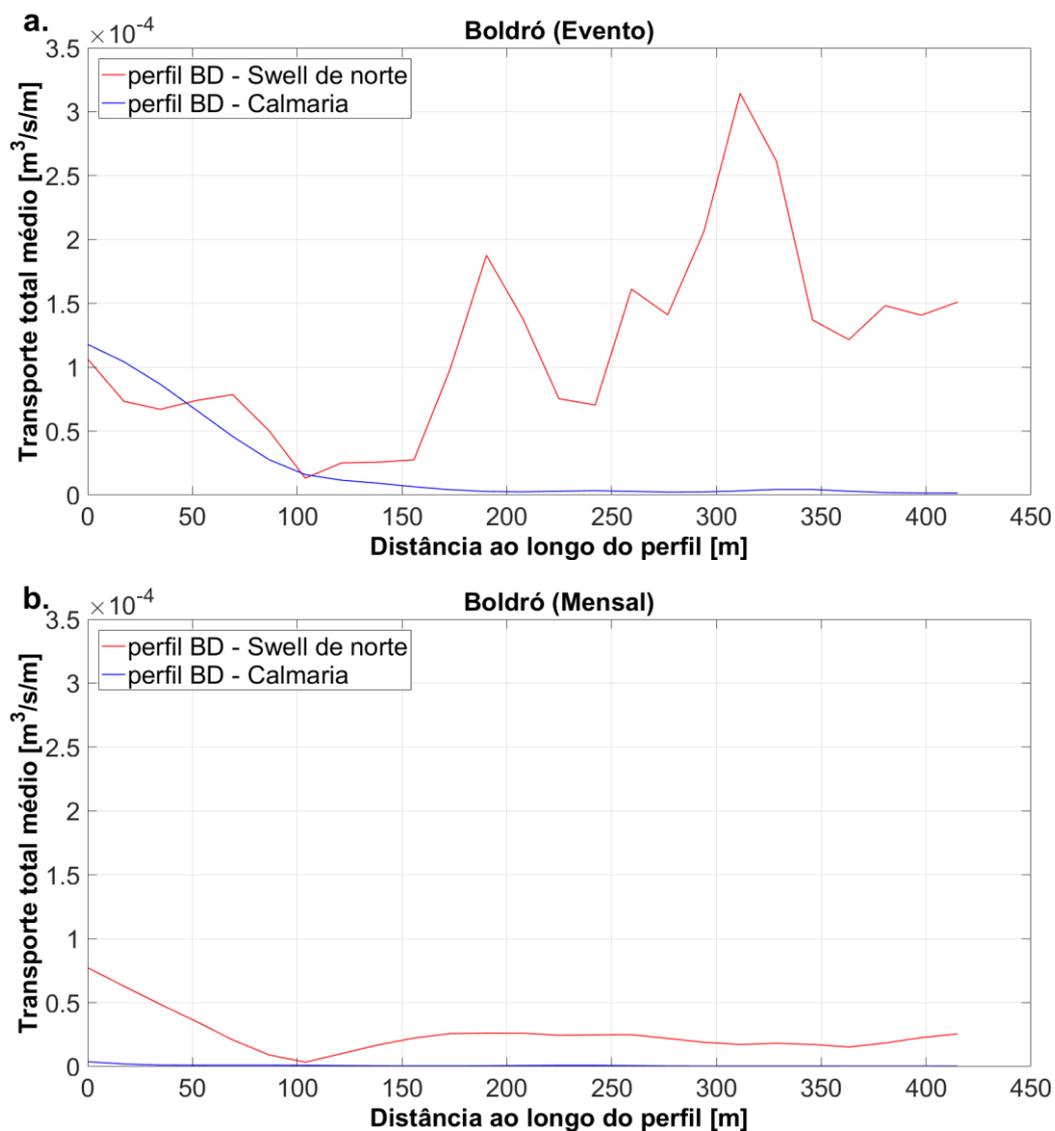
**Figura 5.29** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia do Cachorro (CA), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



**Figura 5.30** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia do Meio (ME), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



**Figura 5.31** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia da Conceição (CC), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.



**Figura 5.32** Variação do transporte total médio de sedimentos arenosos ao longo do perfil paralelo à costa localizado na praia do Boldró (BD), em condição de incidência de *swell* de norte (linha vermelha) e calmaria (linha azul): a. escala de evento e b. mensal.

### Erosão/deposição cumulativa

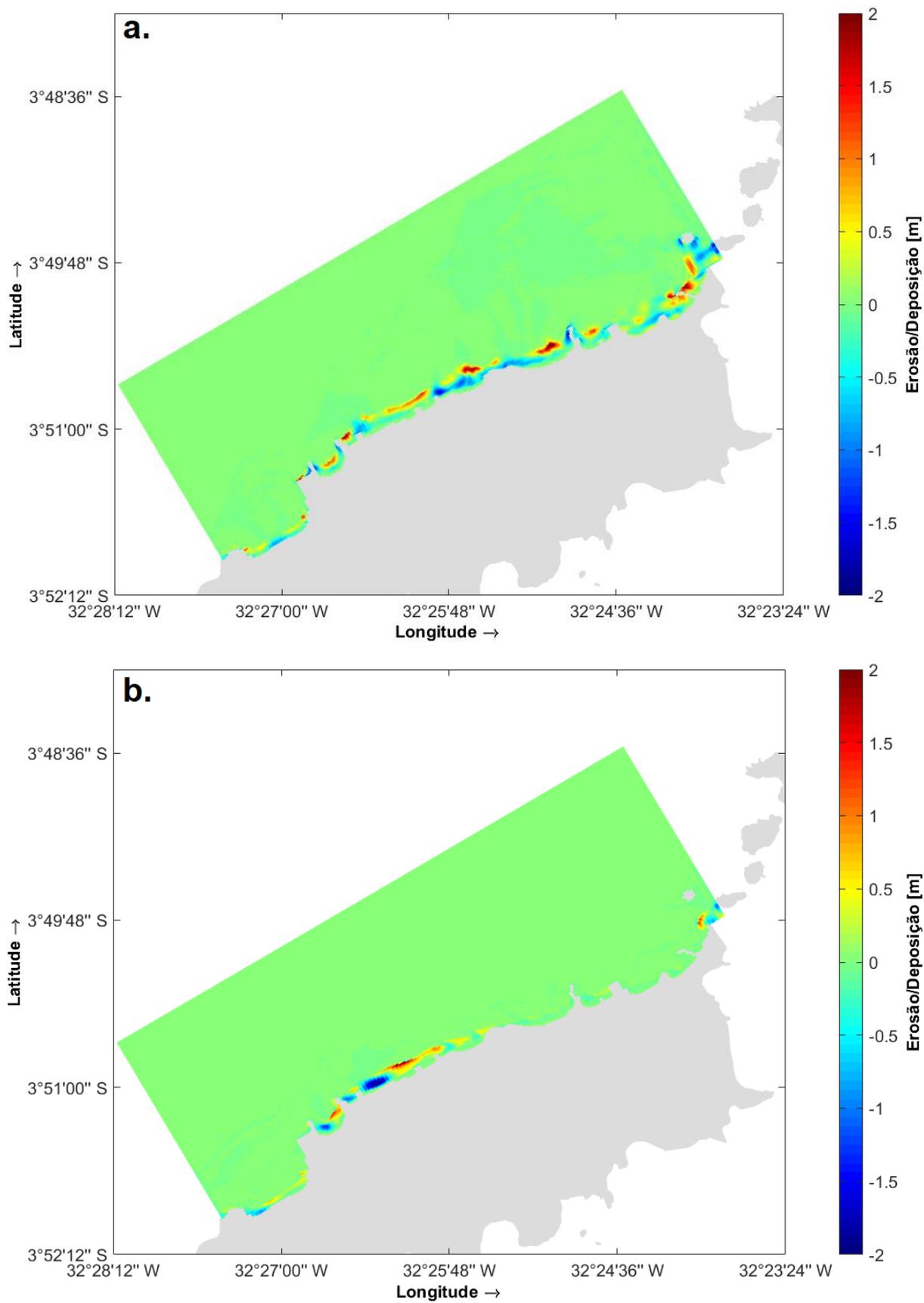
As Figuras 5.33a, b a 5.38a, b são mapas de distribuição da erosão e/ou deposição cumulativas para os cenários em escala temporal de evento (Figuras 5.33, 5.35 e 5.37) e mensal (Figuras 5.34, 5.36 e 5.38); sendo a. condição de incidência de *swell* de norte e b. condição de calmaria na região do Mar de Dentro. Logo, referem-se às variações do nível do fundo resultantes do período da simulação, indicando as áreas preferenciais de erosão ou deposição. A escala de cores representa as alterações do nível do fundo (em metros), sendo estas negativas (erosão), positivas (deposição) ou nulas (inalteração). A fim de promover melhor visualização dos resultados, as Figuras 5.33 e 5.34 mostram as áreas de erosão e deposição, as Figuras 5.35 e 5.36 apenas erosão e as Figuras 5.37 e 5.38 apenas deposição.

Através destas figuras, temos uma visão geral dos padrões de variabilidade da morfologia de fundo, nas escalas temporais de evento e mensal, em resposta às diferentes condições de ondas representativas da sazonalidade do clima de ondas. Posteriormente, as alterações morfológicas serão avaliadas em maior detalhe através do monitoramento de perfis topobatimétricos perpendiculares à costa, distribuídos nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró.

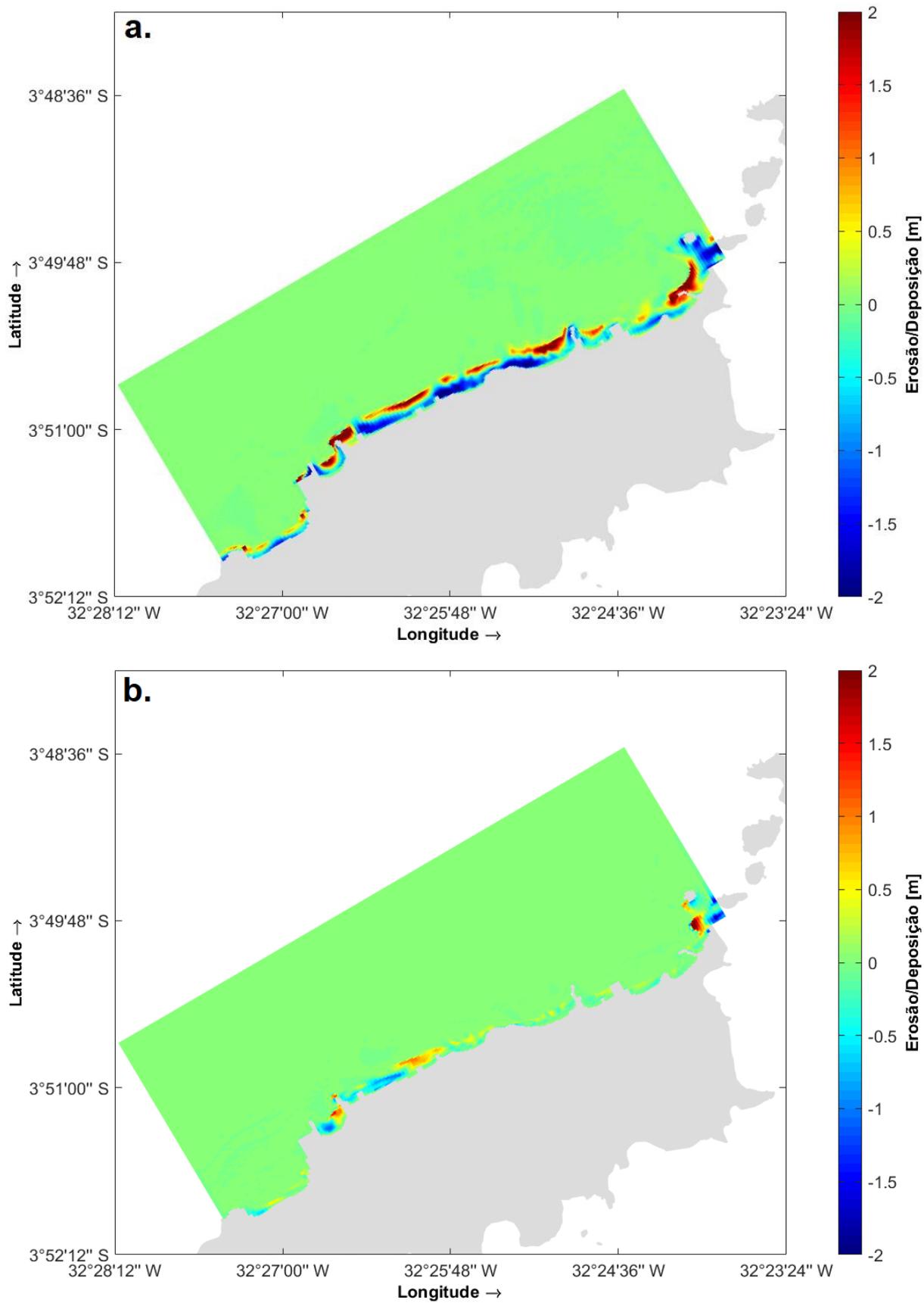
Nota-se que as simulações dos cenários representativos da condição mais energética, marcada pela incidência de *swells* de norte, acarretam em áreas de erosão junto à costa (incluindo a parte emersa das praias) ao longo de praticamente toda a extensão da costa setentrional da Ilha de Fernando de Noronha. Junto a essas áreas de erosão, estão associadas algumas áreas de deposição, que ocorrem a cerca de algumas dezenas de metros de distância da costa (em direção à plataforma) e apresentam distribuição longitudinal às praias. Além disso, estes cenários são os que produzem maior alteração do fundo (superiores a 2 m), sendo coerente com o maior potencial de mobilidade sedimentar associado a maior energia das ondas de longo período (discutido no Capítulo 3) e com os efeitos dessas ondas nos padrões hidrodinâmicos e de transporte de sedimentos (aumentando a magnitude dos fluxos e do transporte sedimentar, especialmente na direção transversal à costa e em direção à plataforma), já abordados neste capítulo.

Por sua vez, os cenários de calmaria resultam em menores alterações da morfologia de fundo ao longo da costa. Alterações mais expressivas são restritas às praias localizadas no setor sudoeste da ilha, incluindo as praias Cacimba do Padre, Baía dos Porcos e Baía do Sancho, que são as praias mais afetadas pela intensificação do transporte longitudinal à costa observada nos cenários de calmaria (ver Figuras 5.18b e 5.19b).

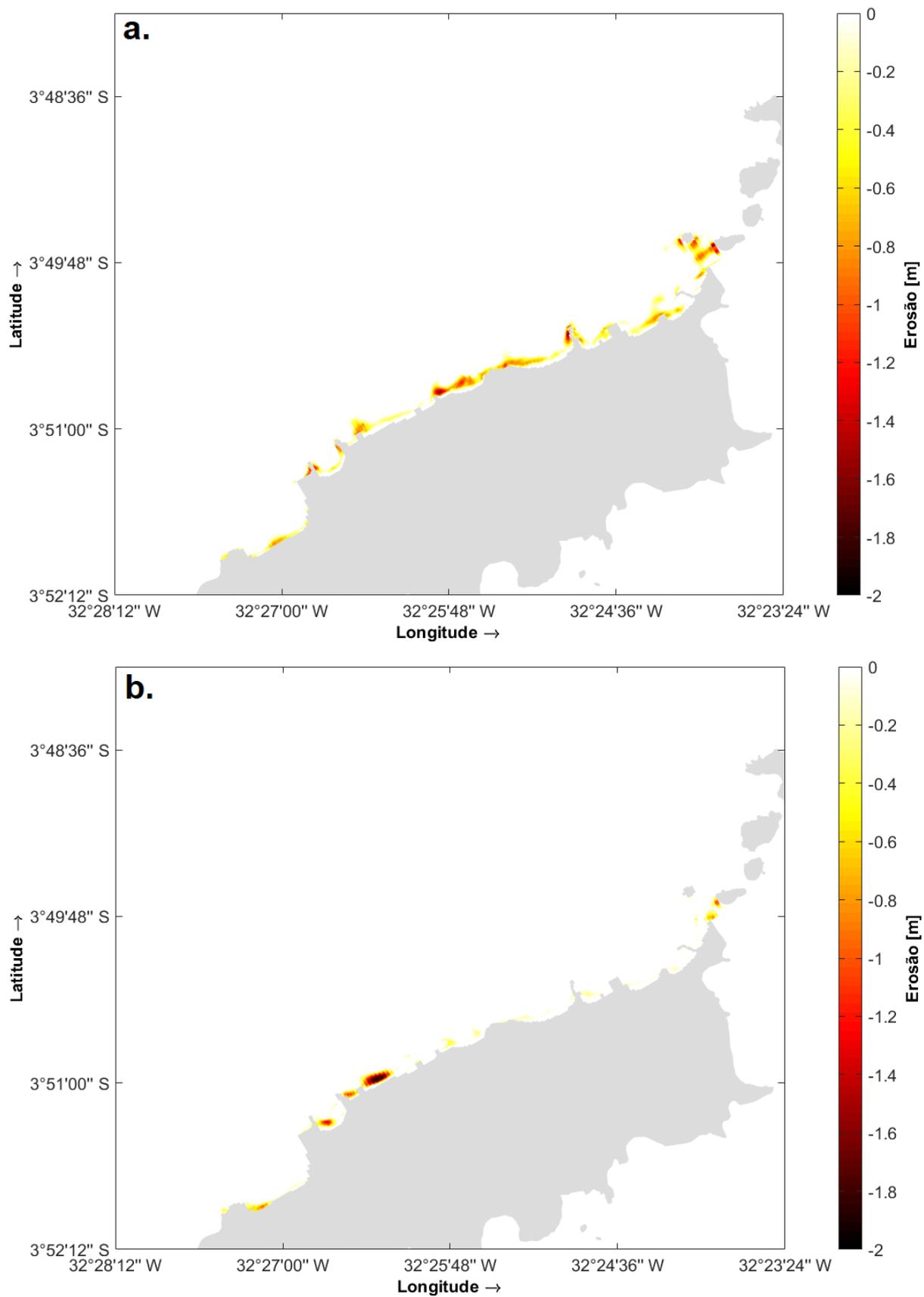
Diferentemente do que observamos nas análises do transporte total médio, as alterações do nível do fundo são maiores nos cenários que compreendem maior tempo de simulação (escala mensal) em relação às simulações em escala de evento, pois essas análises são baseadas nos efeitos cumulativos das alterações do fundo e não nos efeitos médios. Portanto, observamos que a incidência de *swells* de norte é capaz de alterar a morfologia do fundo, tanto em escala de evento quanto em escala mensal; e que essas alterações morfológicas são ampliadas com a ocorrência de eventos consecutivos.



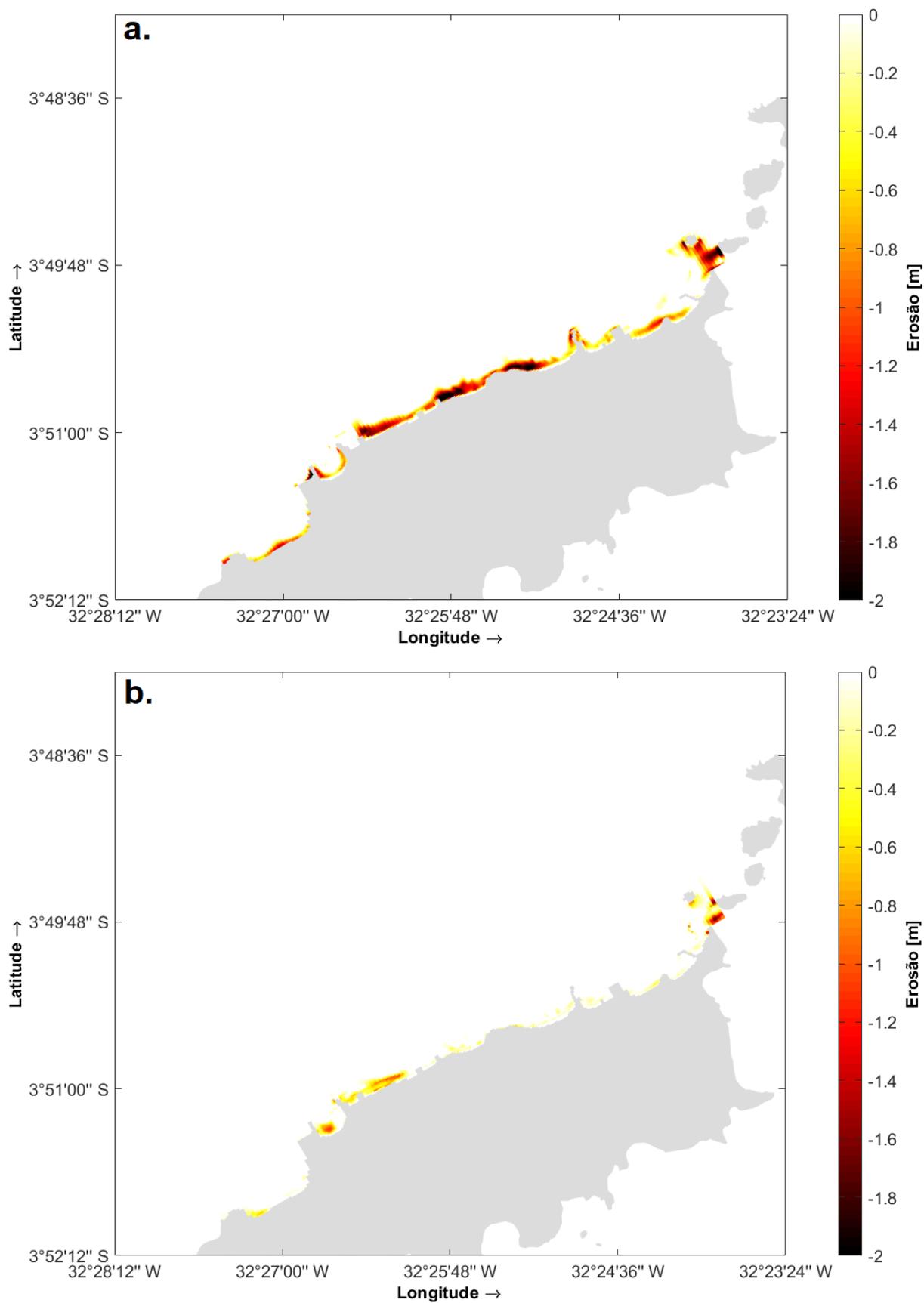
**Figura 5.33** Erosão/deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_evento*; b. *Calmaria\_evento*.



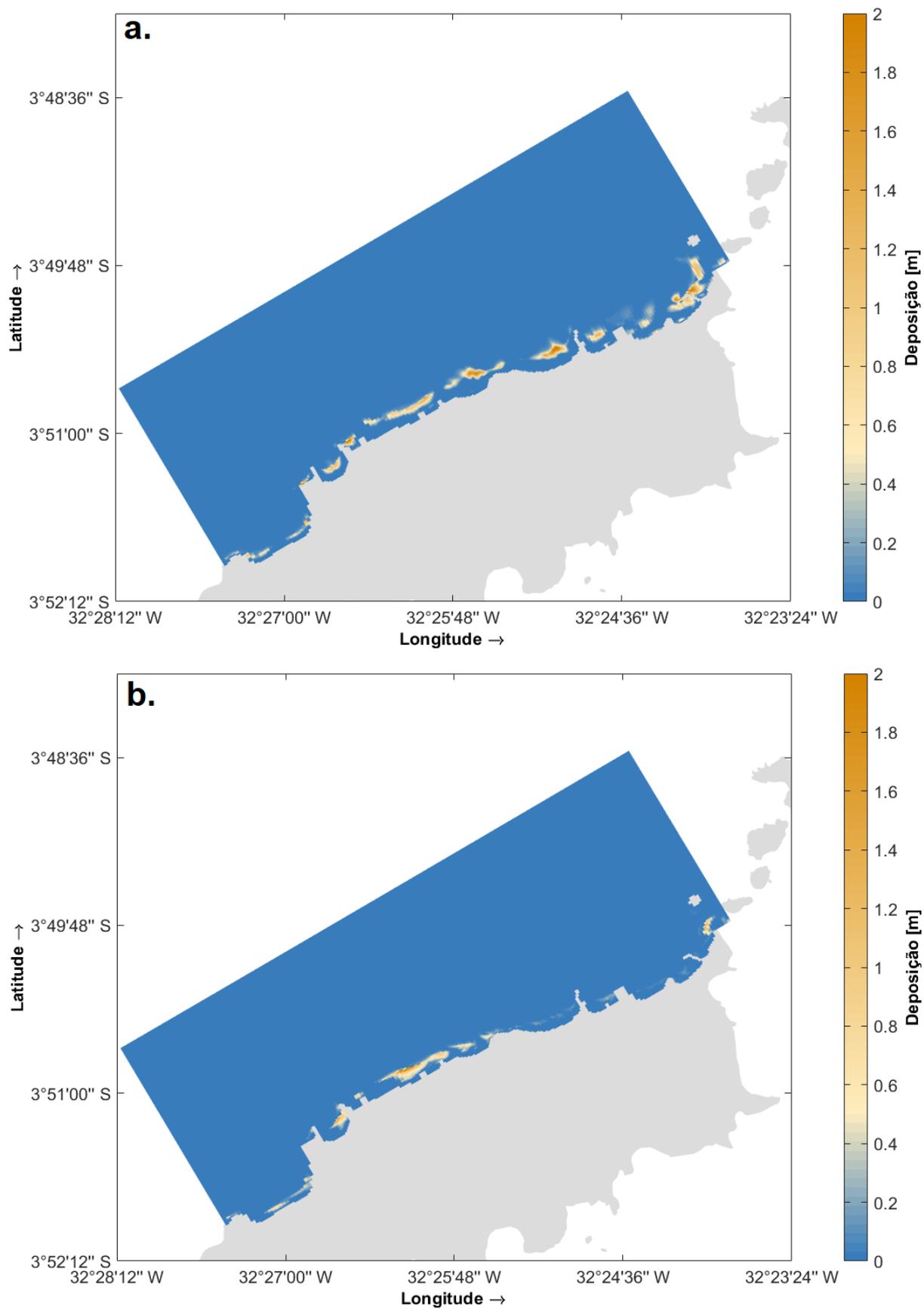
**Figura 5.34** Erosão/deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_mensal*; b. *Calmaria\_mensal*.



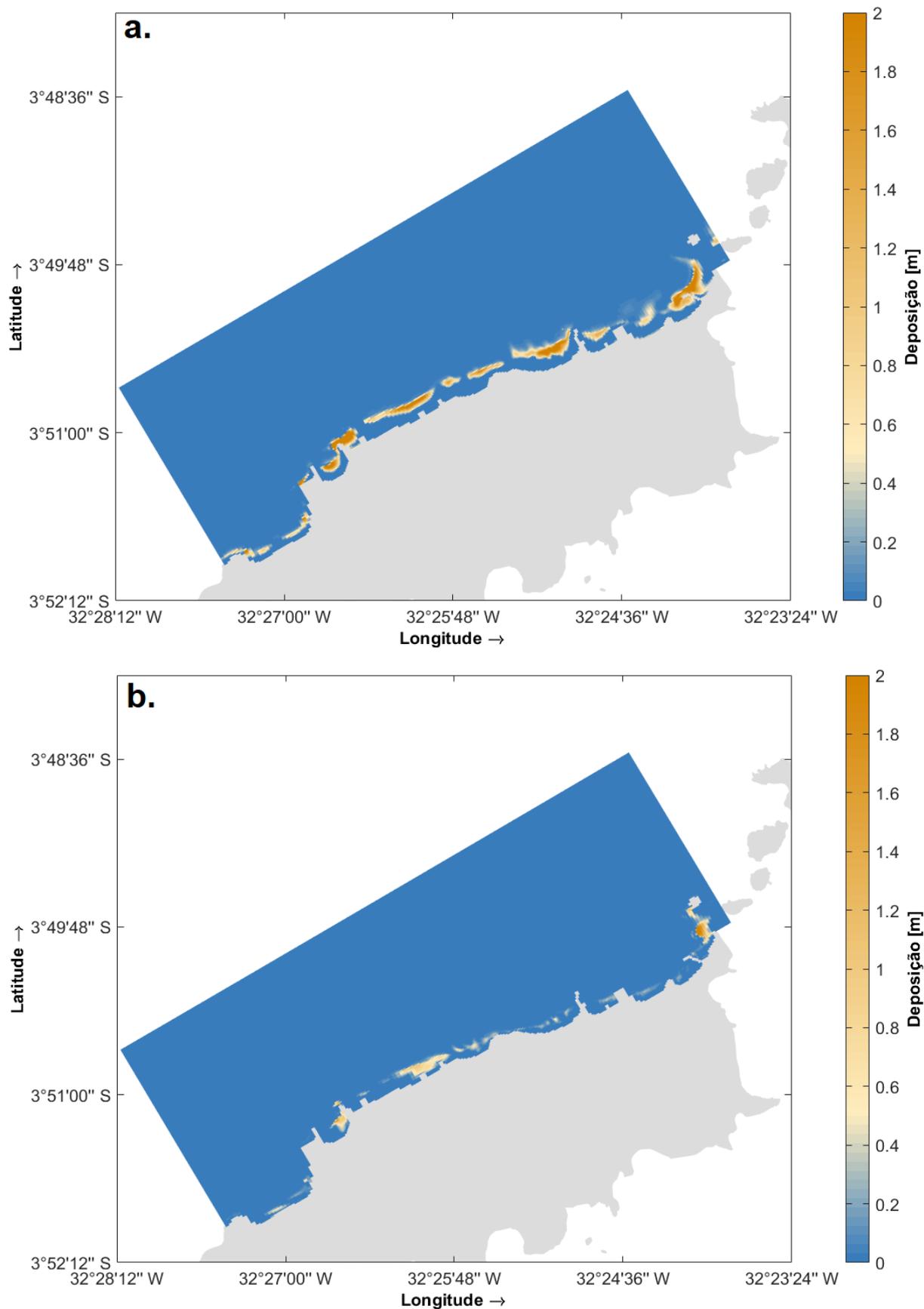
**Figura 5.35** Erosão cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_evento*; b. *Calmaria\_evento*.



**Figura 5.36** Erosão cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_mensal*; b. *Calmaria\_mensal*.



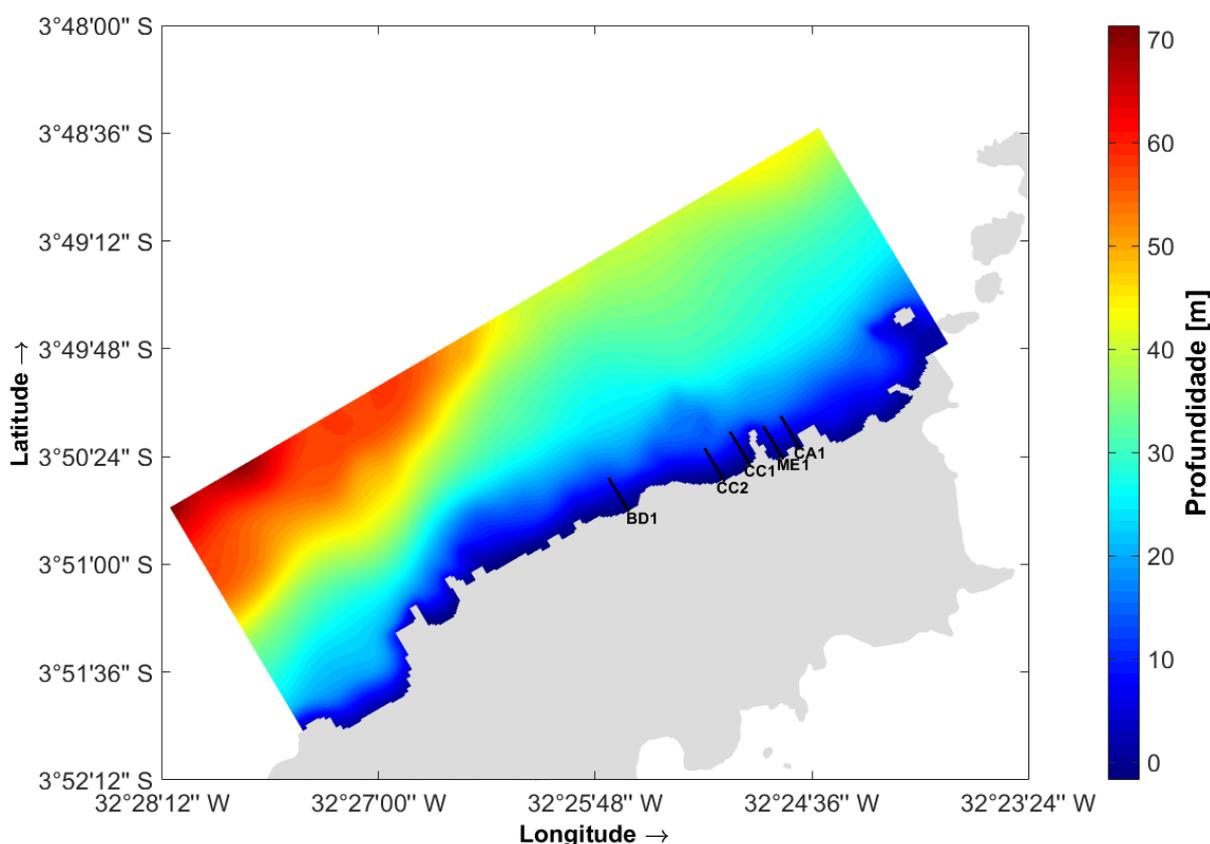
**Figura 5.37** Deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_evento*; b. *Calmaria\_evento*.



**Figura 5.38** Deposição cumulativa de sedimentos arenosos na porção setentrional da Ilha de Fernando de Noronha, resultante dos cenários: a. *Swell\_mensal*; b. *Calmaria\_mensal*.

### Monitoramento de perfis topobatimétricos

Foram definidos perfis perpendiculares à costa, localizados nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), a partir dos quais foram extraídos os resultados da modelagem morfológica. Os perfis apresentam ponto inicial na costa e comprimento de aproximadamente 400 m em direção à plataforma. A localização dos perfis pode ser visualizada na Figura 5.39. Estes são os mesmos perfis perpendiculares da Figura 5.22, utilizados na análise do transporte longitudinal à costa, realizada a partir dos resultados de transporte total médio.



**Figura 5.39** Localização dos perfis perpendiculares à costa, nas praias do Cachorro (CA1), Meio (ME1), Conceição (CC1 e CC2) e Boldró (BD1), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica.

As Figuras 5.40a, b a 5.49a, b mostram as variações das cotas topográficas (em metros) ao longo dos perfis CA1, ME1, CC1, CC2 e BD1, respectivamente. A linha contínua em preto representa o perfil topobatimétrico no instante inicial da simulação e as linhas tracejadas em vermelho e em azul representam o perfil no instante final da simulação dos cenários de *swell* de norte e calmaria, respectivamente. As Figuras 5.40, 5.42, 5.44, 5.46 e 5.48 correspondem às

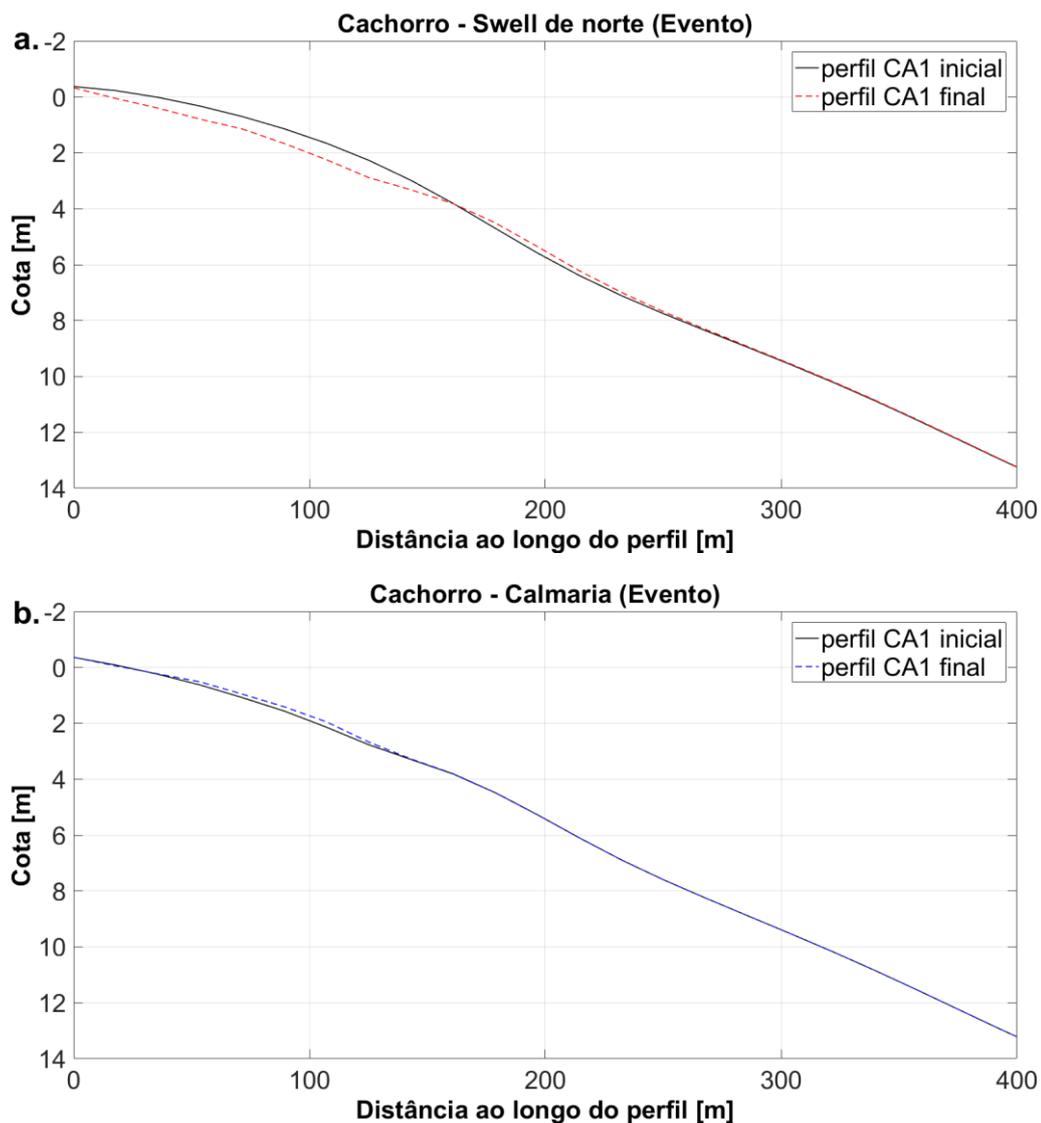
variações morfológicas ocorridas na escala temporal de evento e as Figuras 5.41, 5.43, 5.45, 5.47 e 5.49 são representativas das simulações em escala mensal. É importante lembrar que as cotas negativas correspondem a parte emersa do perfil.

Nas simulações representativas das condições de incidência de *swell* de norte, os perfis topobatimétricos localizados nas praias do Cachorro, Meio, Conceição e Boldró, sofreram processos erosivos nos primeiros 100 a 200 m do perfil praiial. Esse trecho erosivo do perfil é imediatamente seguido por um trecho deposicional, caracterizado pela formação de bancos arenosos. Considerando os resultados obtidos para a simulação em escala mensal (cenário *Swell\_mensal*), esses depósitos são formados em torno da isóbata de 5 m, apresentam de 50 a 200 m de extensão ao longo do perfil e altura máxima de 1 a 2 m. As alterações produzidas na escala de evento apresentam dimensões inferiores a estas.

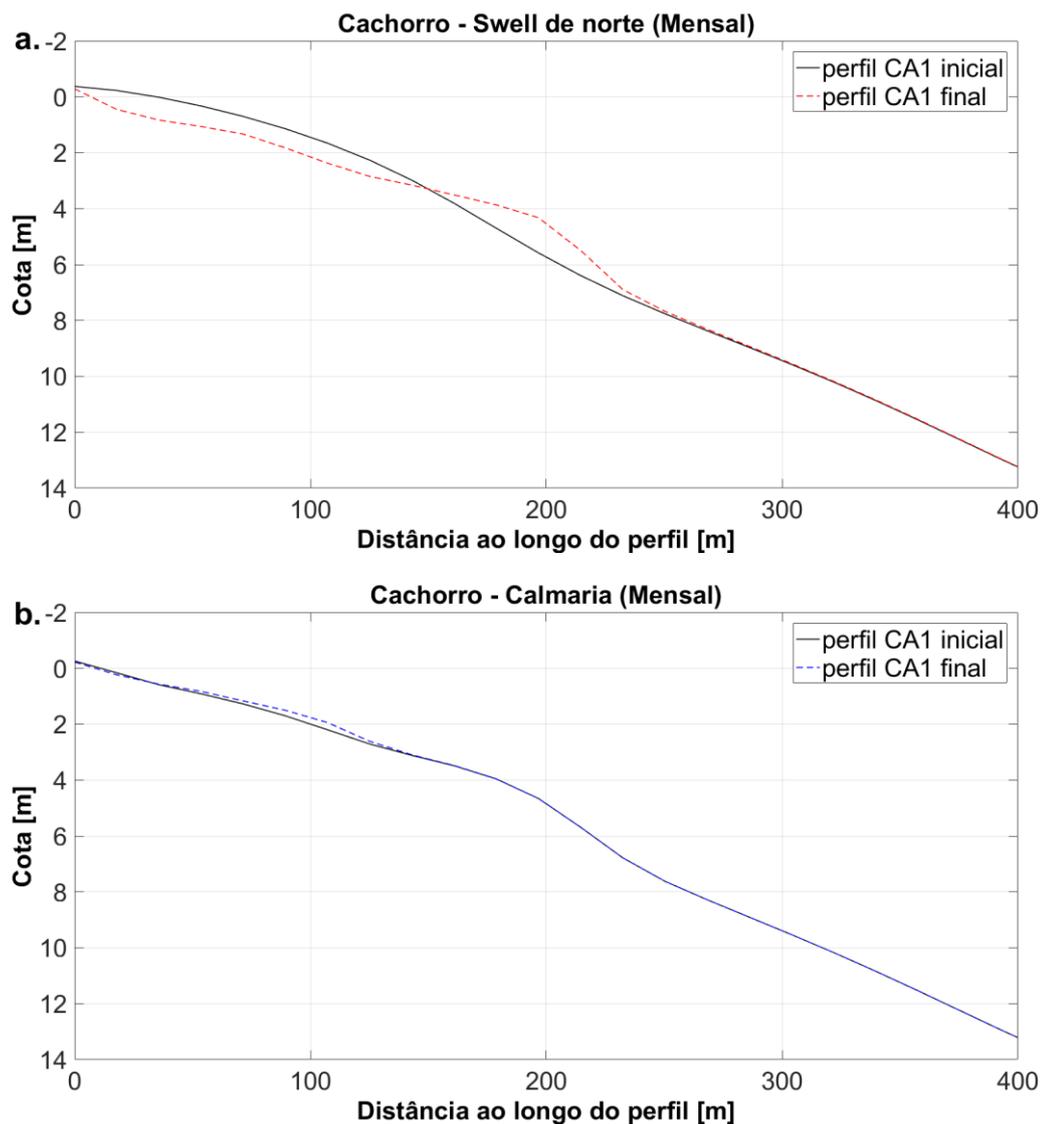
Como visto nos resultados apresentados nos mapas de erosão/deposição cumulativas, referentes aos períodos de simulação correspondentes aos cenários de calmaria, os perfis praiiais avaliados neste trabalho sofreram alterações morfológicas pouco expressivas e essas alterações são restritas aos primeiros 200 m do perfil. A baixa variabilidade morfológica dos perfis monitorados, durante a condição de calmaria, é coerente com as baixas magnitudes de velocidade das correntes e de transporte produzidos por esse cenário na região na qual localizam-se os perfis analisados. Além disso, diferentemente dos cenários de incidência de *swell* de norte, na condição de calmaria não existe um padrão de variabilidade que seja comum entre os perfis.

De modo geral, os cenários de calmaria não demonstraram a remobilização dos bancos arenosos formados nos cenários com ação de *swells* de norte para a recuperação dos perfis praiiais, como era esperado a partir dos conhecimentos prévios sobre os eventos episódicos de erosão das praias localizadas na porção setentrional do arquipélago (por exemplo, MANSO et al., 2011 e resultados do Capítulo 4). Em alguns perfis ocorre reposição parcial de sedimentos na parte superior do perfil (erodida no cenário de *swell* de norte), provavelmente por ação do transporte longitudinal à costa; entretanto, não há remobilização do banco arenoso (por exemplo, Figuras 5.41b e 5.49b, referentes aos perfis localizados nas praias do Cachorro e Boldró). Analisando os vetores de velocidade das correntes e de transporte de sedimentos nos cenários de calmaria, também não identificamos nenhum padrão transversal à costa em sentido a costa (*onshore*) que viabilize a restauração dos perfis praiiais através da migração dos depósitos temporários. Tal resultado pode ser justificado por uma limitação do modelo para representar fluxos e transporte no sentido *onshore* (HOEFEL e ELGAR, 2003) ou consequências de uma representação pouco realística da morfologia das praias (por ausência de dados

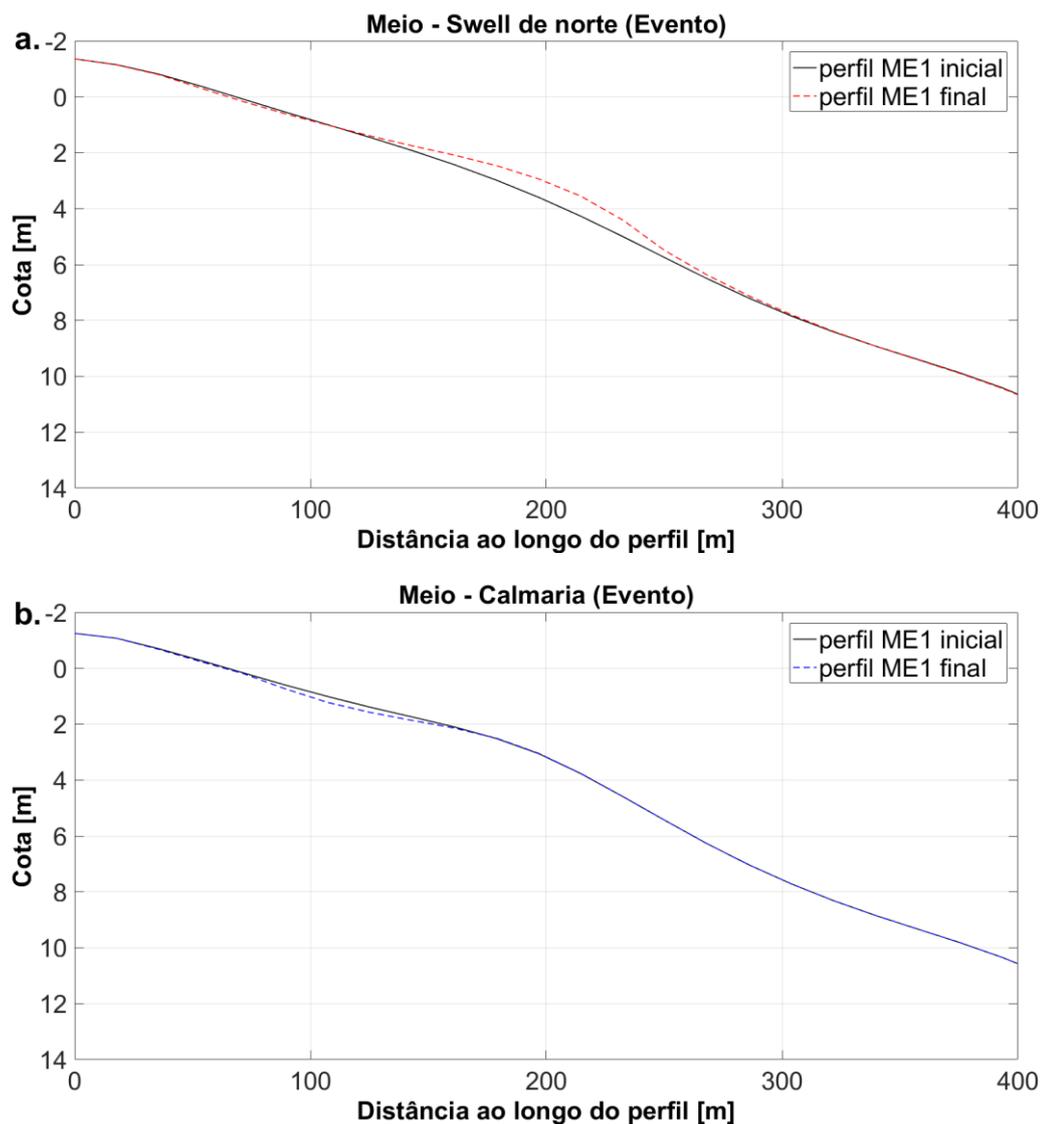
topobatimétricos medidos *in situ*) ou da escolha da resolução espacial adotada. Além disso, podem haver incertezas relacionadas à possibilidade de baixa precisão dos dados batimétricos utilizados nas áreas mais rasas do domínio (como a antepraia) e à falta de detalhamento das características sedimentológicas inseridas no modelo (por exemplo, a variabilidade de formato dos grãos não é considerada).



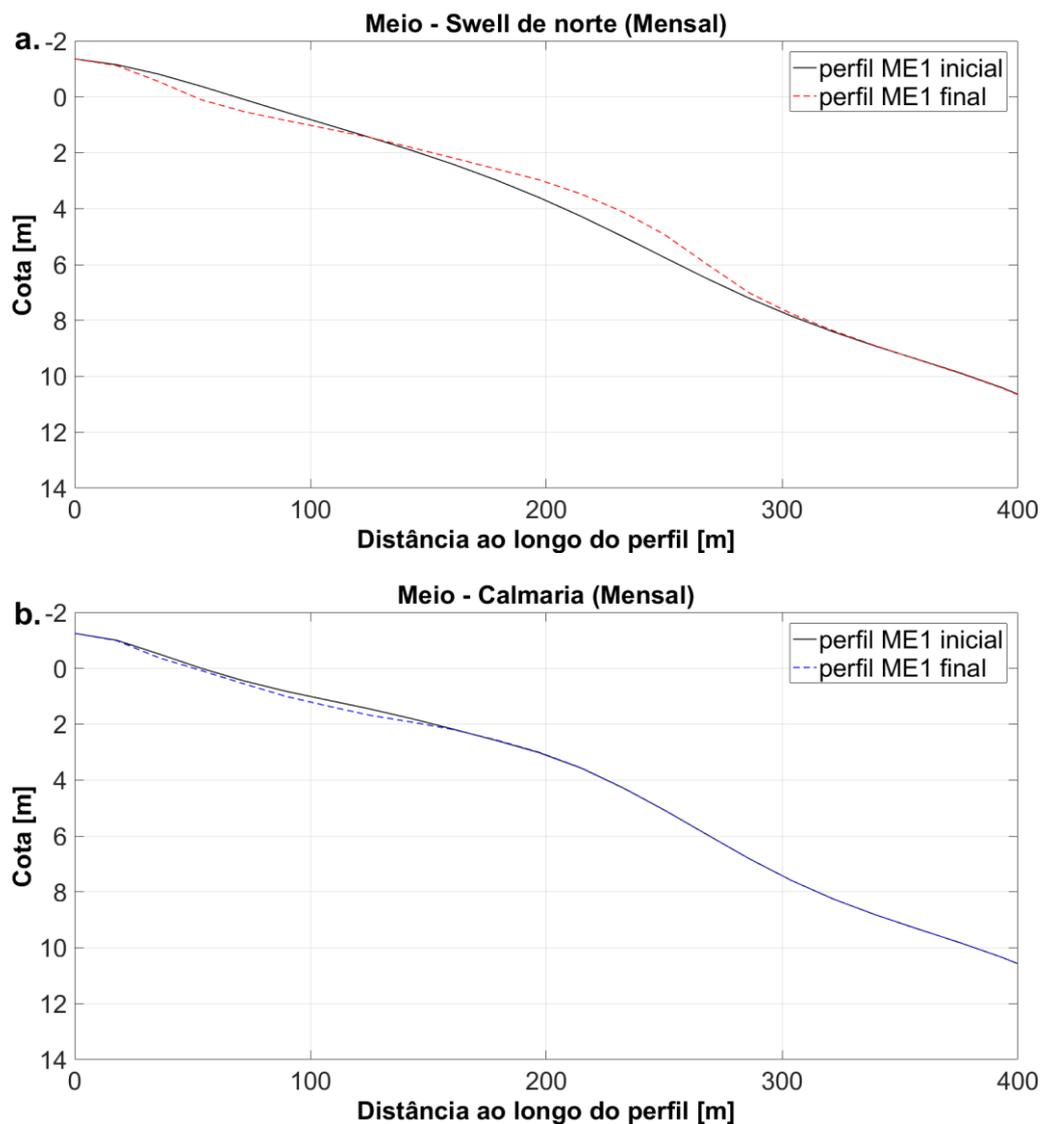
**Figura 5.40** Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia do Cachorro (CA1): a. *Swell\_evento* e b. *Calmaria\_evento*.



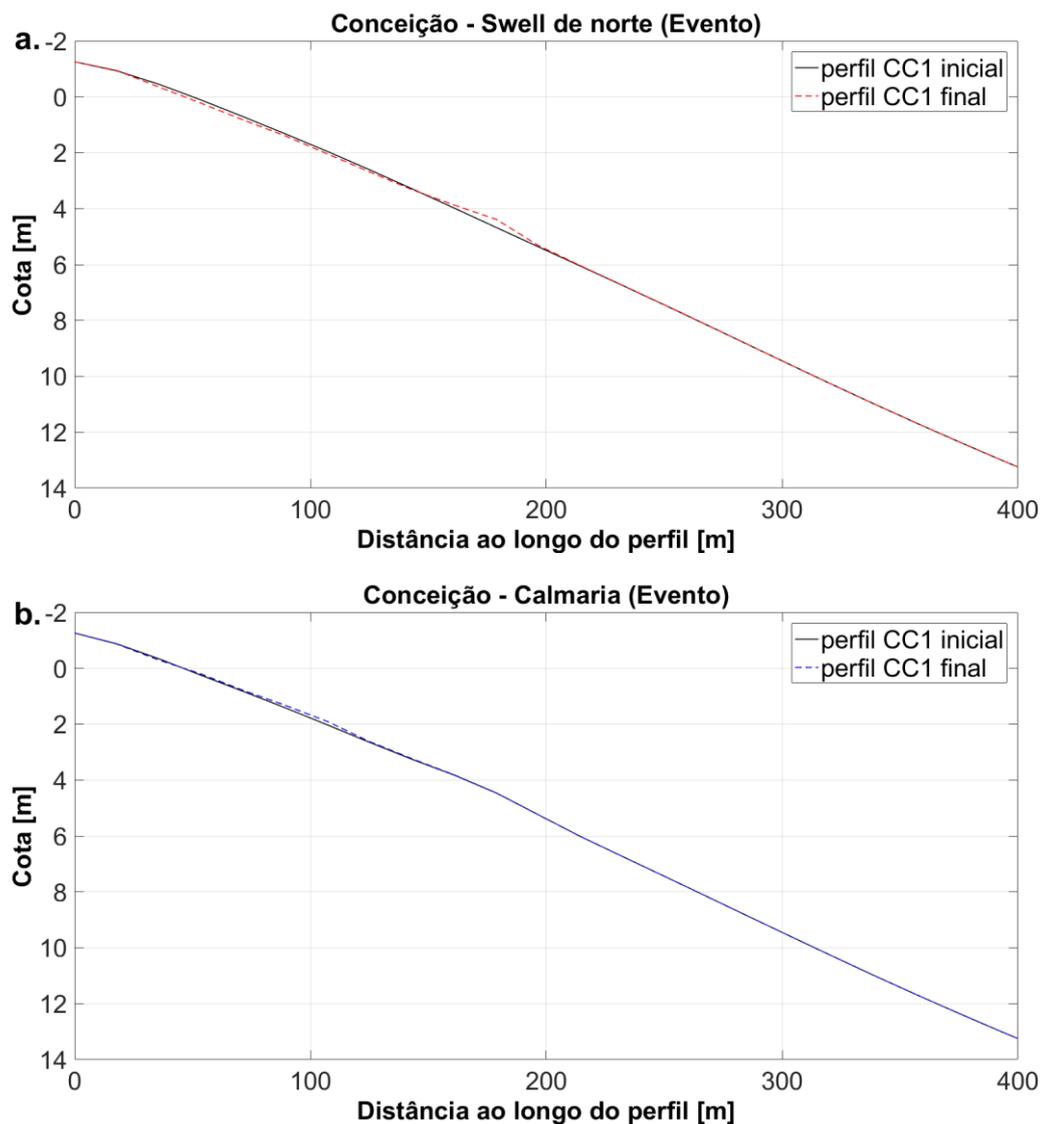
**Figura 5.41** Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia do Cachorro (CA1): a. *Swell*\_mensal e b. *Calmaria*\_mensal.



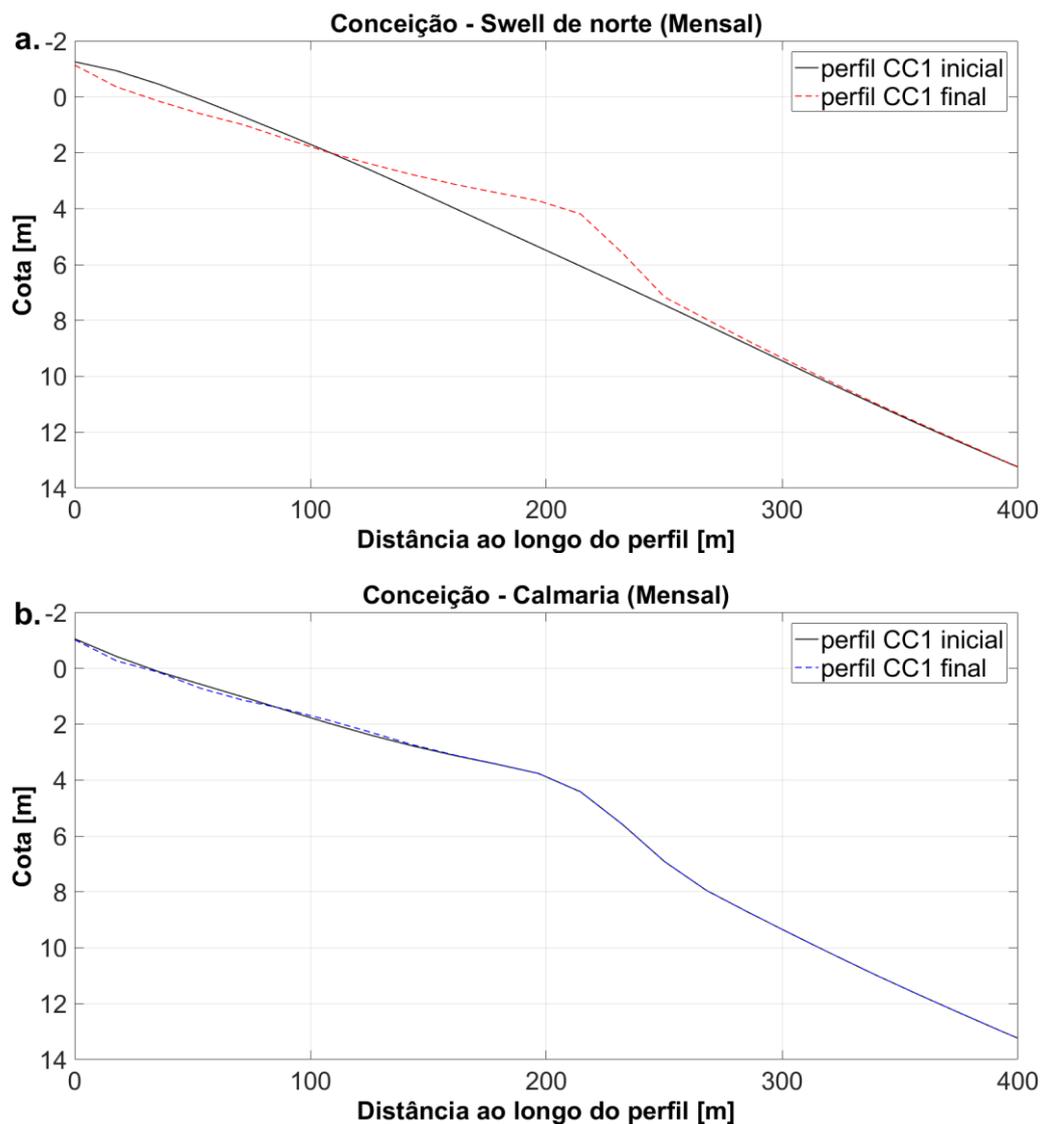
**Figura 5.42** Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia do Meio (ME1): a. *Swell\_evento* e b. *Calmaria\_evento*.



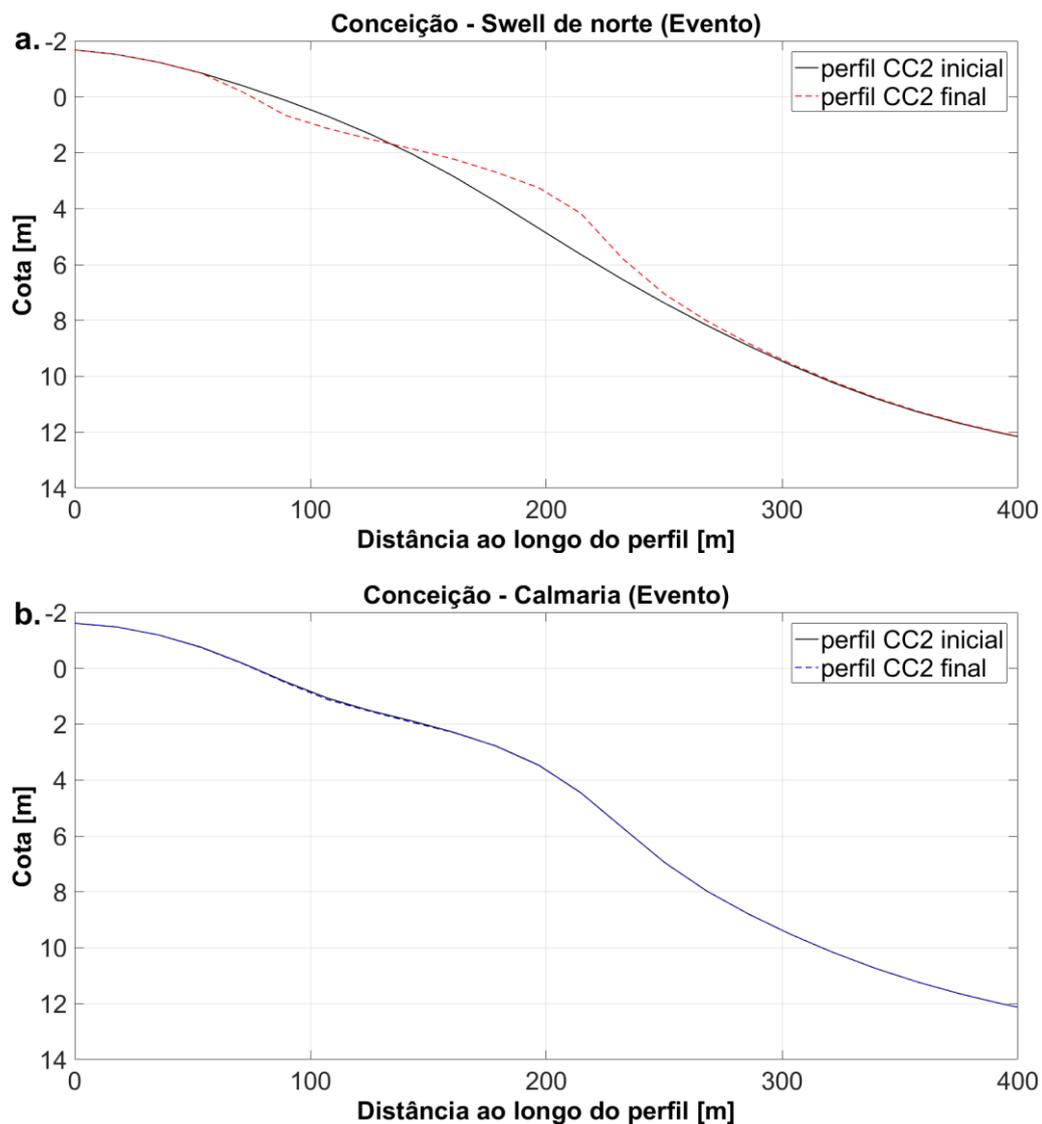
**Figura 5.43** Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia do Meio (ME1): a. *Swell\_mensal* e b. *Calmaria\_mensal*.



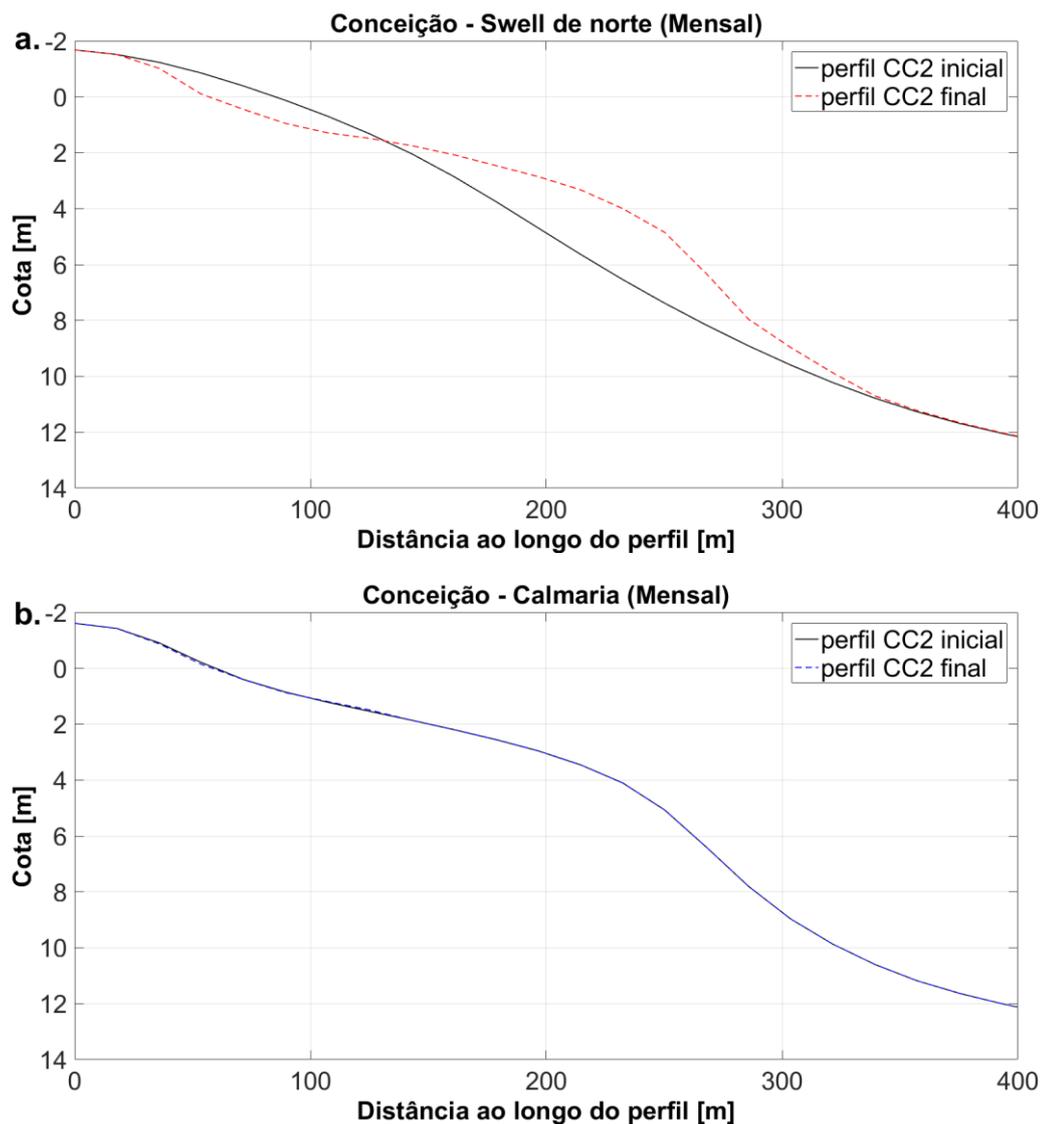
**Figura 5.44** Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC1): a. *Swell\_evento* e b. *Calmaria\_evento*.



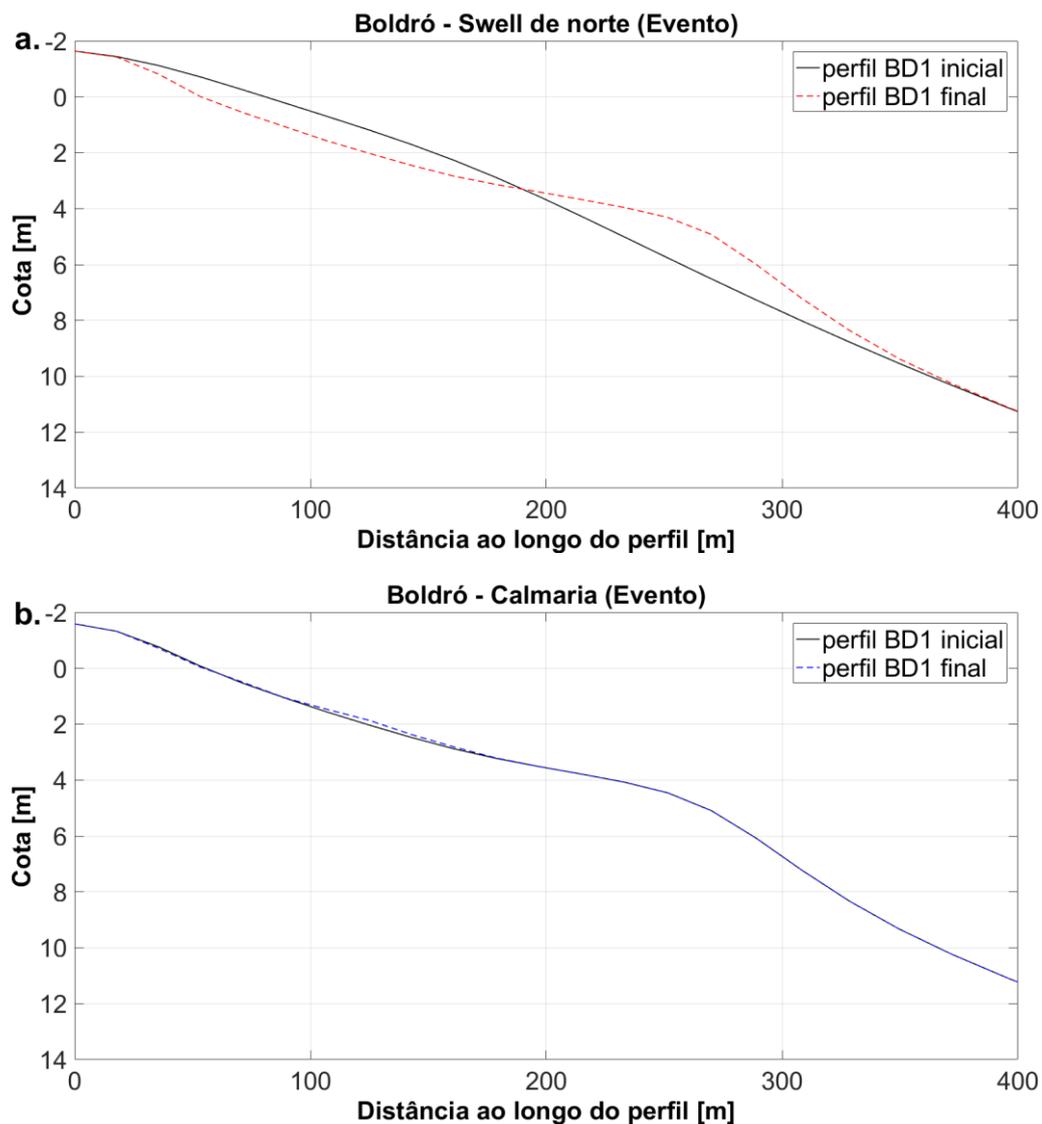
**Figura 5.45** Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC1): a. *Swell\_mensal* e b. *Calmaria\_mensal*.



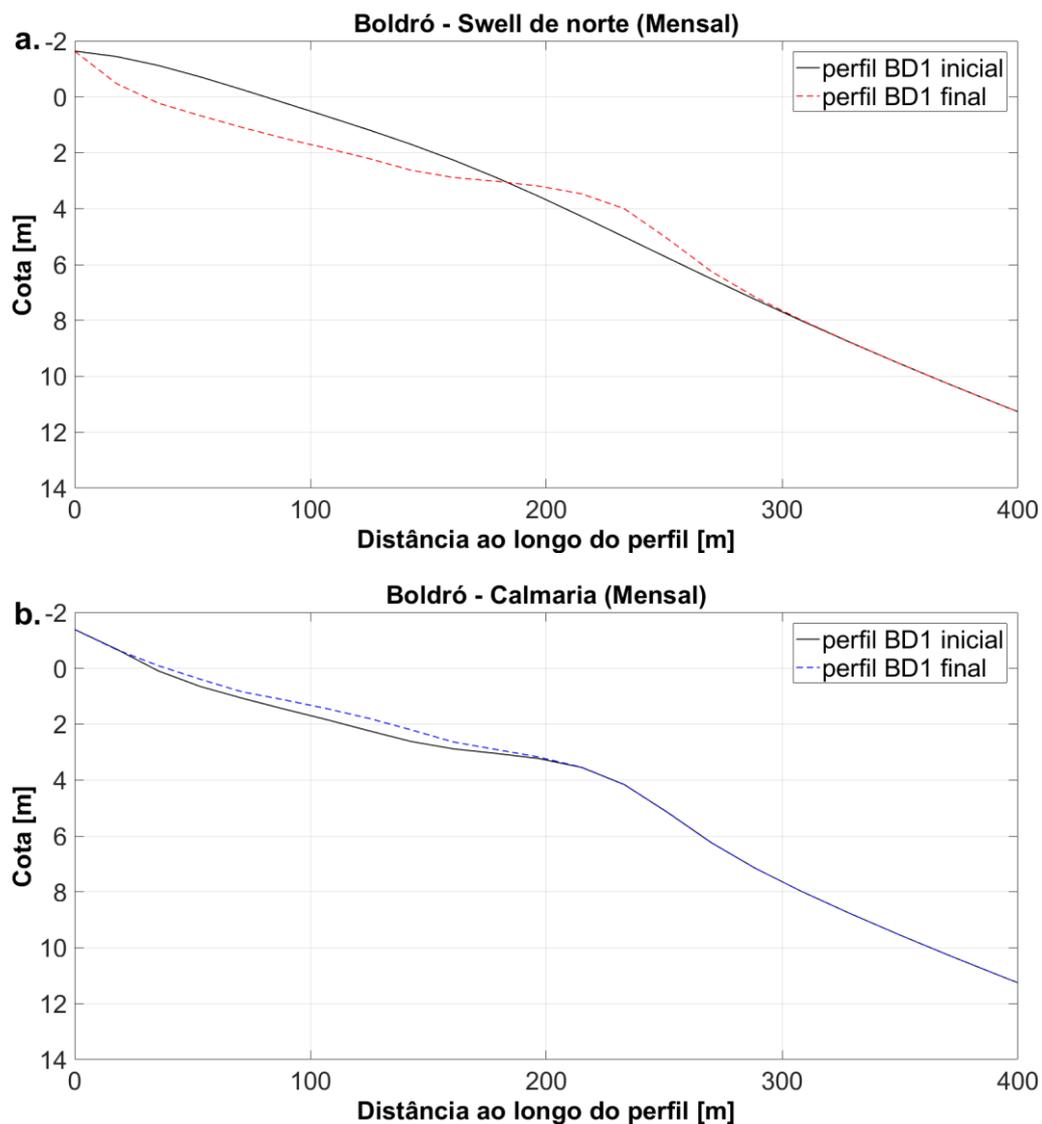
**Figura 5.46** Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC2): a. *Swell\_evento* e b. *Calmaria\_evento*.



**Figura 5.47** Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia da Conceição (CC2): a. *Swell*\_mensal e b. *Calmaria*\_mensal.



**Figura 5.48** Alteração em escala temporal de evento do perfil topobatimétrico localizado na praia do Boldró (BD1): a. *Swell*\_evento e b. *Calmaria*\_evento.

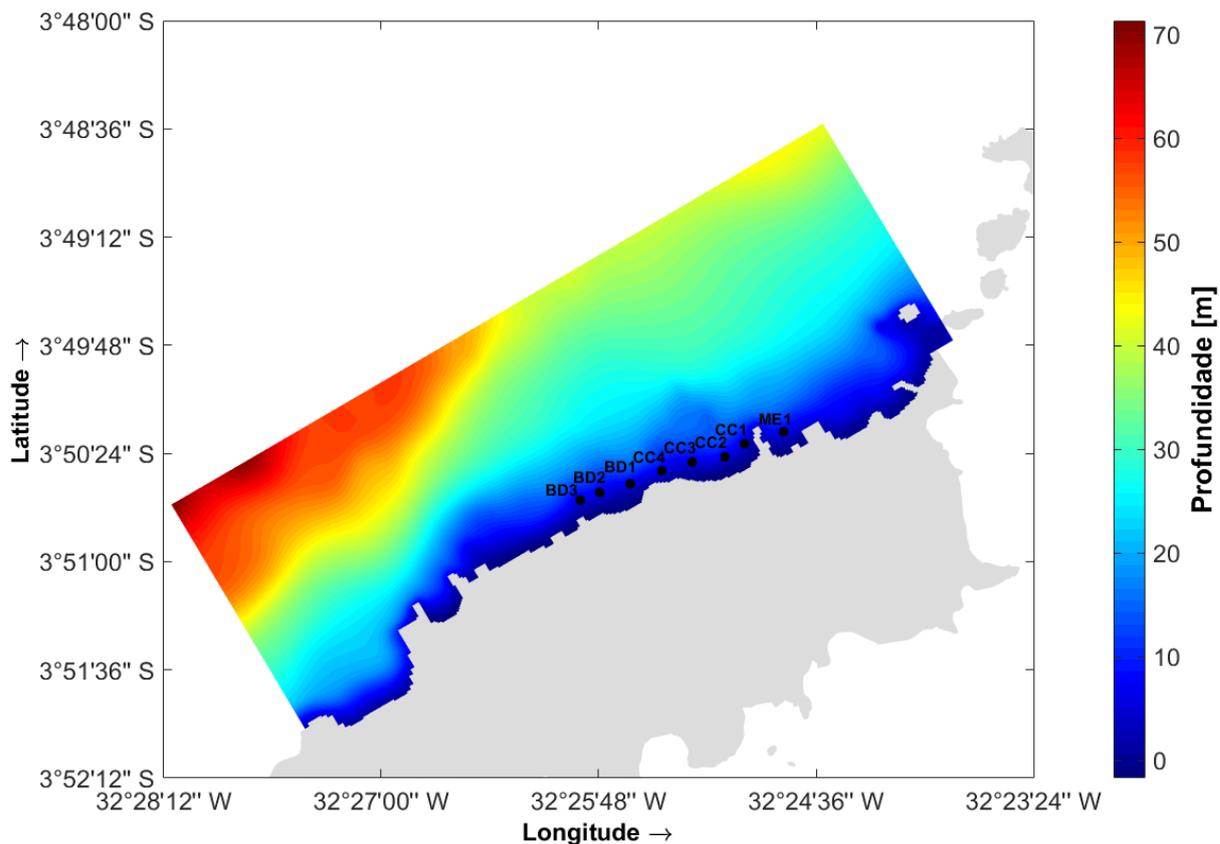


**Figura 5.49** Alteração em escala temporal mensal do perfil topobatimétrico localizado na praia do Boldró (BD1): a. *Swell\_mensal* e b. *Calmaria\_mensal*.

#### ***5.4.4. Avaliação da importância relativa de fatores ambientais na dinâmica sedimentar***

Neste item, será avaliada a importância relativa de fatores ambientais, tais como maré e ondas, na dinâmica sedimentar da região costeira da porção setentrional do arquipélago. Para tanto, foram utilizadas as séries temporais de variação do nível da água, parâmetros de ondas (altura significativa, período de pico e direção média) e força de onda, as quais foram utilizadas como forçante nas simulações da modelagem morfológica. Estas séries temporais foram comparadas com a variação do transporte total de sedimentos na direção x (Leste-Oeste) e y (Norte-Sul) ao longo do tempo, extraída dos resultados das simulações dos cenários. Para essa análise, serão considerados apenas os cenários *Swell\_mensal* e *Calmaria\_mensal*, pois compreendem um período de simulação maior, incluindo a variabilidade da maré (sizígia e quadratura) e a incidência de diferentes tipos de ondas (vagas e *swells*).

Assim, foram definidos alguns pontos de observação para a extração de resultados das simulações morfológicas. Tais pontos foram distribuídos ao longo da isóbata de 5 m, na região costeira adjacente às praias do Cachorro e Meio (ME1), Conceição (CC1, CC2, CC3 e CC4) e Boldró (BD1, BD2 e BD3) (Figura 5.50). Estes são os mesmos pontos apresentados na Figura 5.10 e utilizados para a extração de resultados do modelo hidrodinâmico.



**Figura 5.50** Localização dos pontos de observação nas praias do Cachorro e Meio (ME1), Conceição (CC1 a CC4) e Boldró (BD1 a BD3), utilizados para a extração de resultados dos experimentos numéricos da modelagem morfológica.

As Figuras 5.51a e 5.52a, mostram as séries temporais de elevação do nível da água e parâmetros de ondas (altura significativa, período de pico e direção média) utilizados como condição de contorno nas simulações dos cenários *Swell\_mensal* e *Calmaria\_mensal*, respectivamente. Por sua vez, as Figuras 5.51b e 5.52b, apresentam as séries temporais das componentes x e y do transporte total de sedimentos, representativas das praias do Cachorro e Meio, Conceição e Boldró, obtidas a partir da simulação desses cenários.

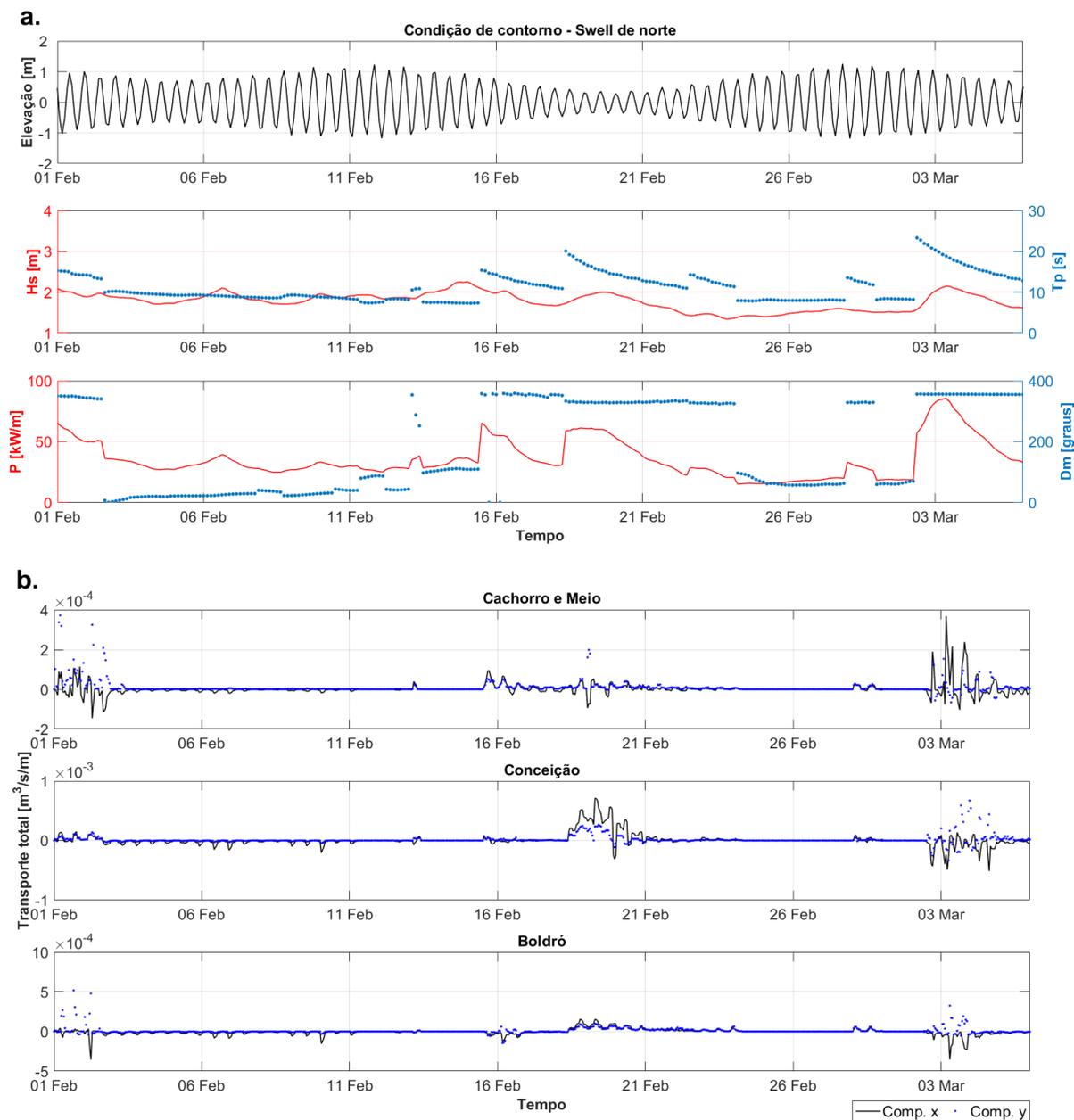
É possível verificar que o transporte de sedimentos na região é limitado, sendo que os valores médios apresentam ordem de grandeza em torno de  $10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s/m e os valores máximos atingem  $10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/m, considerando o cenário de incidência de *swell* de norte. Esses valores são ainda menores (em torno de uma a duas ordens de grandeza) no cenário representativo da condição de calmaria. Além disso, podemos verificar que os maiores valores de transporte são encontrados na praia da Conceição no cenário *Swell\_mensal* e na praia do Boldró no cenário *Calmaria\_mensal*.

Um aspecto bastante relevante é que em todas as quatro praias analisadas há alguns períodos de transporte sedimentar mais intenso. Estes períodos coincidem com os aumentos da força de onda, que é uma medida da energia das ondas, que considera os efeitos da altura e do período das ondas. Quando analisamos isoladamente as variações dos parâmetros altura e período das ondas, observamos que as variações do período parecem ter maior influência sobre os aumentos na taxa de transporte de sedimentos. Por exemplo, na simulação do cenário *Calmaria\_mensal*, há um aumento das alturas de onda próximo ao dia 1 de agosto (atingindo valores de até 3 m) que causa pouco impacto no transporte e apenas nas praias do Cachorro e Meio. Entretanto, logo em seguida há um aumento dos períodos de onda (atingindo valores superiores a 15 s) por volta dos dias 5 e 7 de agosto; esse aumento gera maiores mudanças no transporte em todas as praias analisadas.

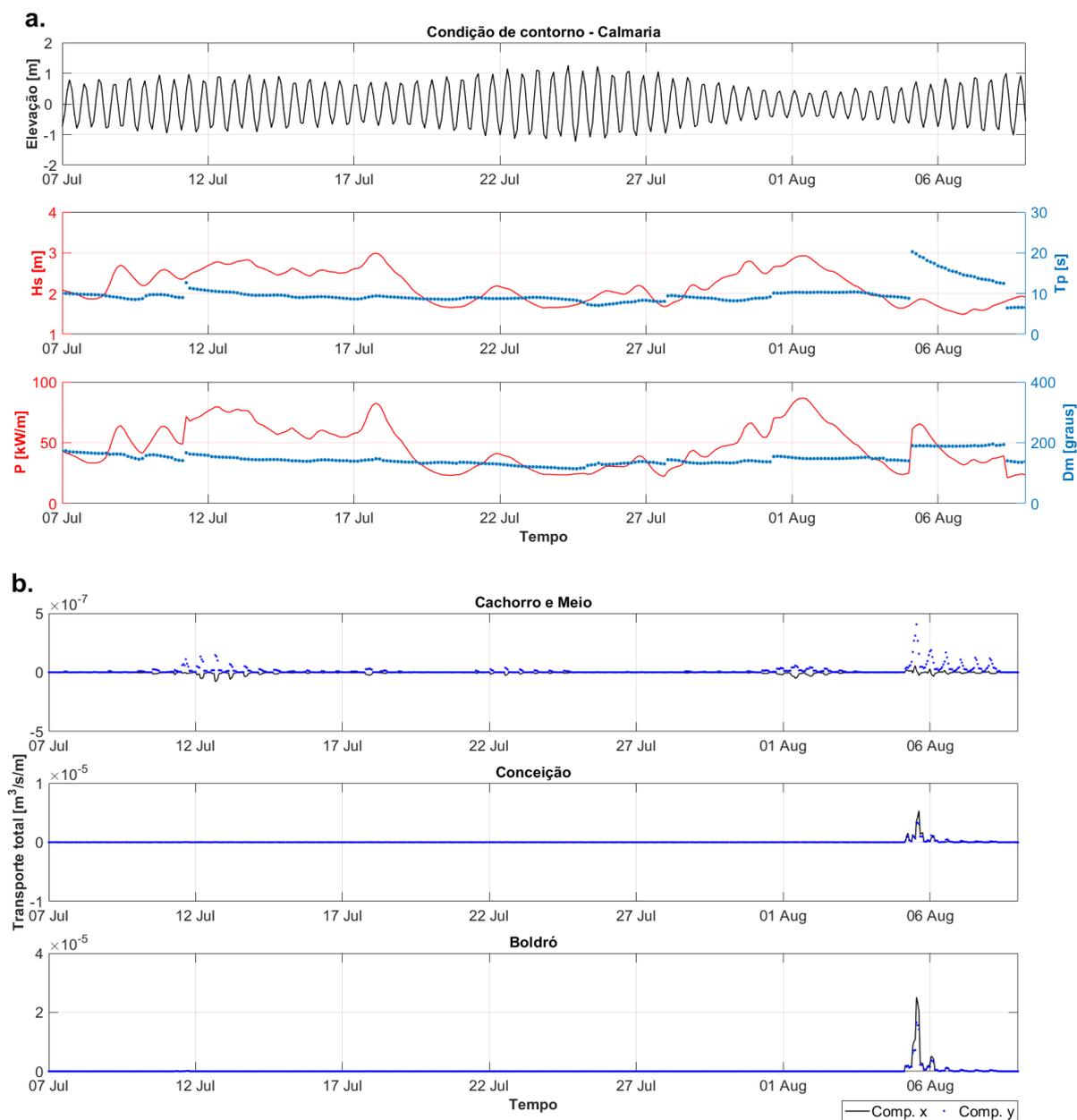
Quanto à direção das ondas, este é um parâmetro bastante relevante, especialmente devido à zona de sombra da ilha. Logo, é esperado que as ondas vindas de quadrante norte sejam responsáveis por maior interferência nos processos de transporte que atuam na parte setentrional do arquipélago. Através dos resultados do cenário *Swell\_mensal*, notamos que as ondas de NNW estão relacionadas a maior geração de transporte, devido à orientação da costa onde estão as praias analisadas e por essa direção estar associada a maiores períodos de onda.

Apesar de termos verificado nítida influência das variações do nível da água na hidrodinâmica, observamos que a relação entre a maré e o transporte de sedimentos é afetada pela interferência da ação das ondas no transporte, especialmente nos períodos com incidência de ondas mais energéticas.

Portanto, no caso das praias estudadas (na isóbata de 5 m), o transporte de sedimentos arenosos aparenta ser predominantemente afetado pelo efeito sinérgico dos parâmetros de onda (altura, período e direção), com especial influência do período de onda. As ondas de longo período possuem maior comprimento de onda e transportam maiores quantidades de energia, e demonstram ter grande impacto na mobilidade sedimentar de plataformas rasas e estreitas (AMBROSIO et al., 2022; LAVENÈRE-WANDERLEY e SIEGLE, 2019), uma vez que possuem efeito em regiões mais profundas da plataforma continental/insular e com maior intensidade à medida em que alcança águas mais rasas.



**Figura 5.51** Séries temporais a, do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e b. das componentes longitudinal (x) e transversal (y) do transporte total de sedimentos resultantes da simulação do cenário *Swell\_mensal*.



**Figura 5.52** Séries temporais a. do nível da água e parâmetros de ondas oceânicas utilizadas como condição de contorno e b. das componentes longitudinal (x) e transversal (y) do transporte total de sedimentos resultantes da simulação do cenário Calmaria\_mensal.

## 5.5 Conclusões

A partir da aplicação de modelagem numérica, o presente trabalho fornece informações relevantes a respeito da hidrodinâmica costeira e da dinâmica sedimentar das praias arenosas localizadas na porção setentrional do Arquipélago de Fernando de Noronha, considerando a influência da sazonalidade do clima de ondas local. As principais conclusões são:

- O modelo numérico implementado mostrou-se adequado para representar a circulação costeira e a propagação de ondas na área de interesse. A resolução espacial empregada possibilitou a identificação dos processos hidrodinâmicos costeiros, que demonstraram responder de maneira coerente às forçantes ambientais impostas como condição de contorno;
- A circulação costeira da porção setentrional do arquipélago é governada pela combinação e interação entre as variações do nível da água e as condições de ondas incidentes, sendo que a importância relativa dessas forçantes pode variar (de acordo com a profundidade, por exemplo; a profundidade controla a atuação das ondas);
- As variações do nível da água são determinadas pela atuação da maré astronômica, sobretudo pelos efeitos das componentes semidiurnas e de águas rasas, e pelo empilhamento de água junto à costa causado pelas ondas (*swell* de norte);
- A influência da maré nas correntes é evidenciada nas alterações de intensidade e direção das velocidades, que ocorrem em intervalos de aproximadamente 6 h;
- A magnitude e direção do transporte de sedimentos arenosos é influenciada pela condição de onda incidente. Os eventos de incidência de *swell* de norte geram maiores magnitudes de transporte, com intensificação do transporte *cross-shore* em direção à plataforma;
- A incidência de *swell* de norte gera alterações na morfologia de fundo nas escalas temporais de evento e mensal. Esses eventos de alta energia são responsáveis por ocasionar a erosão das cotas mais elevadas dos perfis de praia e a deposição desse material sedimentar na forma de bancos arenosos longitudinais à costa, localizados em torno da isóbata de 5 m, que podem funcionar como depósitos temporários para a posterior recuperação dos perfis praias;
- Os períodos de calmaria são caracterizados por menores magnitudes de transporte e pouca variabilidade morfológica nas praias analisadas. Entretanto, foi verificado que

durante esses períodos há maior transporte longitudinal e alteração do fundo na região das praias localizadas na parte sudoeste da ilha;

- O modelo morfológico implementado não foi capaz de representar a recuperação dos perfis praias durante as simulações referentes ao período de calmaria;
- O transporte de sedimentos é predominantemente afetado pelo efeito sinérgico dos parâmetros de onda (altura, período e direção), com especial influência do período de onda;
- Os eventos de ocorrência de *swell* de norte são capazes de alterar expressivamente a hidrodinâmica costeira do Mar de Dentro, causando o aumento da altura e período das ondas que atingem a costa, o aumento do nível médio da água junto à costa, gerando um gradiente de pressão barotrópico, e a intensificação das correntes e do transporte de sedimentos, especialmente a componente transversal à costa em direção à plataforma.

# Capítulo 6 Conclusão

## 6.1 Conclusões da tese

Analisando os resultados de forma integrada, temos que as principais conclusões desta tese são:

- A plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha está exposta à alta energia das ondas, pois a morfologia da plataforma, estreita e rasa (com quebra na isóbata de 60 m), não é eficiente na atenuação da energia das ondas oceânicas;
- A variabilidade sazonal do clima de ondas, marcada pela ocorrência de eventos energéticos relacionados à incidência de *swell* de norte (verão) e de sul (inverno), expõe as porções norte e sul da plataforma insular ao aumento da ação das ondas em diferentes períodos do ano;
- Durante os meses de verão, a incidência de *swells* de norte é responsável por aumentar a força de onda que atinge a costa e a intensidade da deriva potencial a 5 m de profundidade (preferencialmente para sudoeste);
- A variabilidade sazonal do clima de ondas e a profundidade local desempenham papel importante no potencial de mobilidade de sedimentos carbonáticos bioclásticos em torno da plataforma insular. A face norte apresenta 100% de mobilização apenas na zona costeira que compreende os primeiros 10 m de profundidade, ocorrendo especialmente nos meses de verão devido à incidência de *swells* de norte. Esta intensa remobilização de sedimentos arenosos induzida por ondas durante os meses de verão pode explicar a erosão sazonal dos perfis das praias arenosas na porção norte da ilha;
- A mobilidade dos rodolitos (com tamanhos de 3 cm e 6 cm) concentra-se em áreas muito próximas da costa (em profundidades <10 m). A ocorrência de eventos extremos de ondas aumenta as áreas sujeitas à movimentação em profundidades superiores a 30 m, e esses eventos ocorrem em diferentes porções da plataforma insular de acordo com a direção das ondas. Este movimento menos frequente (esporádico) dos rodolitos favorece o desenvolvimento de leitos de rodolitos;
- Existe relação com tendência linear inversamente proporcional entre a largura de praia e a força de onda na costa. Durante os períodos de maior força de onda na costa

(outubro a abril), devido a incidência de *swells* de norte, ocorrem menores larguras de praia e maior mobilidade do perfil praial;

- As praias Conceição e Boldró apresentam maiores forças de onda, especialmente em suas porções sudoeste, devido a morfologia de fundo irregular com presença de substrato rochoso. A praia do Cachorro, apesar de não ser a praia a sofrer maiores forças de onda, é a única que teve o perfil praial emerso totalmente erodido e a única que apresentou correlação moderada entre largura de praia e força de onda; os resultados indicam possível predomínio do transporte transversal à costa, conseqüentemente, menor aporte e estoque sedimentar;
- As variações do nível da água são determinadas pela atuação da maré astronômica e pelo empilhamento de água junto à costa causado pelas ondas (*swells* de norte);
- A influência da maré nas correntes é evidenciada nas alterações de intensidade e direção das velocidades, que ocorrem em intervalos de aproximadamente 6 h;
- O transporte de sedimentos arenosos (magnitude e direção) é predominantemente afetado pelo efeito sinérgico dos parâmetros de onda (altura, período e direção), com especial influência do período de onda. Os eventos de incidência de *swell* de norte geram a intensificação do transporte *cross-shore* em direção à plataforma;
- A incidência de *swell* de norte gera alterações na morfologia de fundo nas escalas temporais de evento e mensal. Nestes eventos ocorre a erosão das cotas mais elevadas dos perfis de praia e a deposição desse material sedimentar na forma de bancos arenosos longitudinais à costa, localizados em torno da isóbata de 5 m, que podem funcionar como depósitos temporários;
- Os períodos de calmaria são caracterizados por menores magnitudes de transporte e pouca variabilidade morfológica nas praias analisadas, e maior transporte longitudinal e alteração do fundo nas praias localizadas na parte sudoeste da ilha;
- O modelo morfológico implementado não foi capaz de representar a recuperação dos perfis praias durante as simulações referentes ao período de calmaria;
- Os resultados produzidos são inéditos, fornecem informações importantes para o entendimento da morfodinâmica costeira e da dinâmica sedimentar induzida pela variabilidade do clima de ondas e podem apoiar uma enorme quantidade de estudos futuros voltados ao conhecimento dos meios abiótico e biótico.

De maneira geral, os eventos de ocorrência de *swell* de norte são responsáveis por alterar substancialmente a hidrodinâmica/morfodinâmica costeira do Mar de Dentro, causando o aumento da força de onda que atinge a costa, da deriva longitudinal e do potencial de mobilidade sedimentar induzido por ondas em áreas maiores e mais profundas da plataforma. Nestes períodos, há um aumento do nível médio da água junto à costa devido às ondas, gerando um gradiente de pressão barotrópico e, conseqüentemente, a intensificação das correntes e do transporte de sedimentos, especialmente a componente transversal à costa em direção à plataforma; isso ocorre em uma estreita faixa junto à costa, onde as ondas são mais efetivas na geração de correntes litorâneas. Logo, observa-se maior variabilidade morfológica das praias, com erosão das porções mais altas do perfil praiial e formação de bancos arenosos longitudinais às praias, em torno da isóbata de 5 m, que podem servir como depósitos temporários de sedimentos para posterior recuperação dos perfis praiiais.

## 6.2 Considerações finais

### 6.2.1 Limitações

Dentre as limitações deste trabalho, podemos citar:

- A principal limitação deste trabalho, deve-se a carência de dados medidos *in situ*. Estavam planejadas quatro expedições de campo, duas em período de incidência de *swell* de norte e duas em período de calmaria; entretanto, estas foram inviabilizadas devido a ocorrência e duração da pandemia de COVID-19, que impediu o acesso à Ilha de Fernando de Noronha pela quase totalidade da vigência do projeto que financiava as campanhas de campo. Nestas expedições seriam realizados diversos levantamentos com a coleta uma série de dados ambientais. Este amplo conjunto de dados possibilitaria uma análise detalhada da variabilidade sazonal e interanual da morfodinâmica, acarretando em melhorias na modelagem numérica implementada. Com a impossibilidade da coleta de dados adicionais *in situ*, o projeto foi adaptado de forma a utilizar dados disponíveis e informações obtidas a partir de sensoriamento remoto;
- Devido a falta dos dados topobatimétricos, que seriam obtidos por aerofotogrametria e DGPS, foi necessária a utilização de imagens multiespectrais para obter as informações a respeito da variabilidade da morfologia das praias. O fato de a área

de estudo estar localizada na região equatorial, dificulta a aplicação do sensoriamento remoto, pois a área encontra-se constantemente coberta por nuvens, reduzindo a qualidade das imagens levantadas. Além disso, as características das praias (areia clara, água translúcida e tamanho em alguns casos) e a resolução espacial das imagens, dificultam determinar com precisão a posição da linha d'água para a medição da largura das praias. Adicionalmente, não foi possível corrigir o efeito da maré nas imagens, devido à falta de informações a respeito da inclinação do perfil das praias. Portanto, apesar das imagens da constelação de satélites *PlanetScope* apresentarem boa resolução espacial e temporal (3 m e 24 h, respectivamente), houve limitações atreladas a utilização do sensoriamento remoto;

- As limitações intrínsecas ao procedimento de modelagem numérica, pois apesar de calibrado e validado, resultados de modelos numéricos são uma aproximação da realidade encontrada no ambiente.

Apesar de certas limitações dos métodos utilizados, a metodologia adotada mostrou-se adequada para o cumprimento dos objetivos propostos, pois a partir desta foi possível caracterizar a região quanto à propagação de ondas em direção à costa e identificar os padrões de circulação costeira e transporte de sedimentos em resposta ao clima de ondas local. Também foi possível analisar as alterações morfológicas das praias localizadas na porção setentrional do arquipélago, em diferentes escalas temporais, e avaliar a importância relativa de diferentes forçantes ambientais que governam os processos hidrodinâmicos e sedimentares da região.

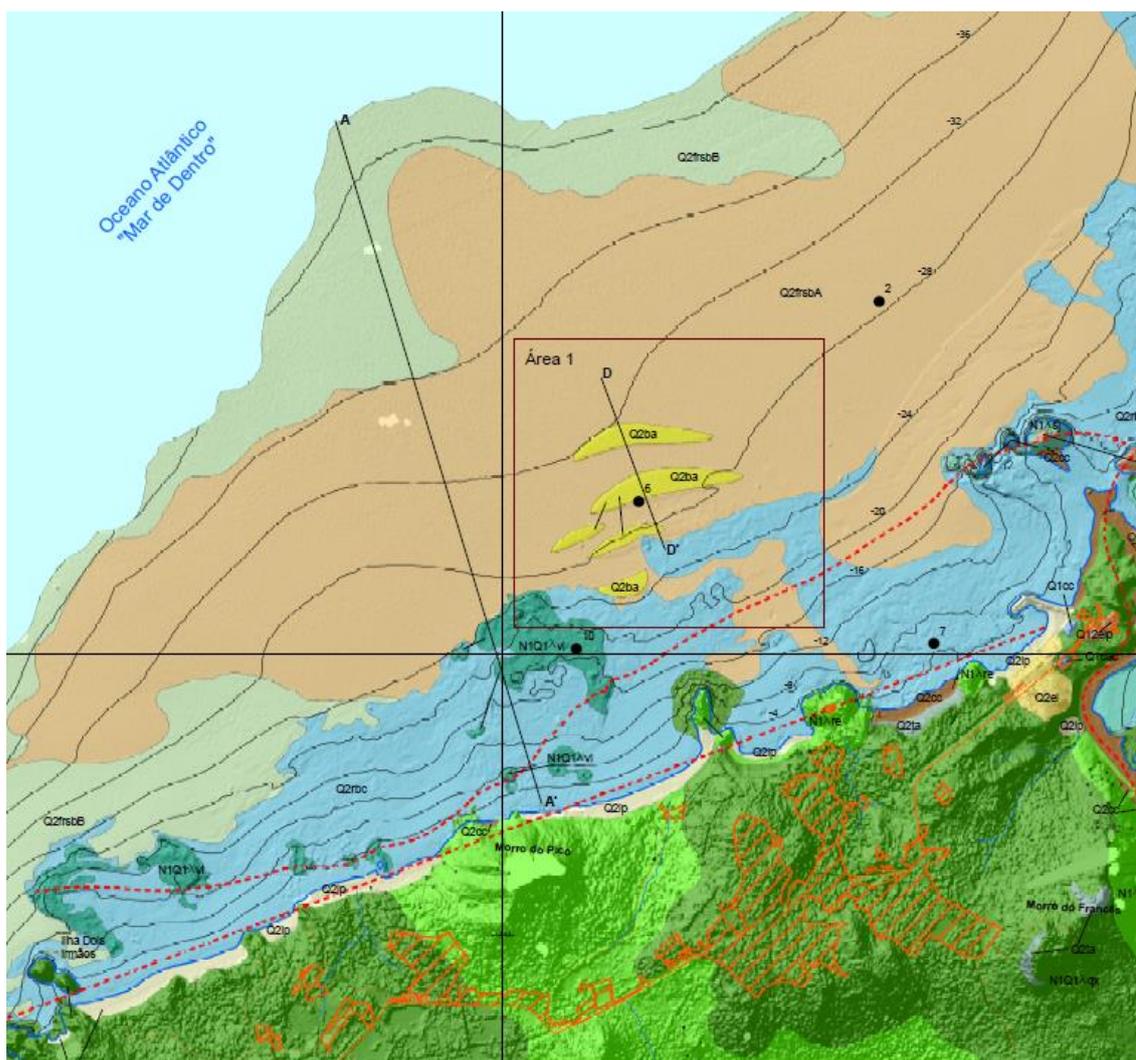
### ***6.2.2 Sugestões para trabalhos futuros***

A fim de melhorar os resultados obtidos neste trabalho e avaliar a influência de alguns processos que não foram considerados aqui, sugere-se:

- Realizar ao menos duas expedições de campo para o levantamento de dados, sendo uma em período de incidência de *swell* de norte e outra na calmaria consecutiva. Obter dados sazonais de topobatimetria das praias, batimetria rasa, sedimentologia e parâmetros de ondas e correntes. Preferencialmente, monitorar praias localizadas nos diferentes setores (nordeste, central e sudoeste) da porção setentrional do arquipélago, uma vez que o modelo aqui implementado apontou diferenças entre os setores no comportamento dos processos morfodinâmicos em resposta à ação das

ondas. Esse conjunto de dados certamente trará melhorias ao modelo morfodinâmico e contribuirá no entendimento da dinâmica sedimentar;

- Analisar a variação da morfologia de bancos arenosos permanentes (indicados na Figura 6.1 e identificados através de imagens de satélite) e temporários (indicados neste trabalho, através dos resultados da modelagem morfodinâmica), a fim de aumentar o entendimento sobre os processos envolvidos na dinâmica sedimentar;



**Figura 6.1** Mapa de integração da faciologia e litologia das ilhas e plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha, indicando a presença de bancos arenosos em formato de meia-lua, localizados em aproximadamente 23 m de profundidade (Fonte: Assis et al. (2018)).

- Utilizar dados de velocidade das correntes medidos *in situ* em períodos de incidência de *swell* de norte para calibrar e validar o modelo hidrodinâmico, pois nestes períodos as velocidades são maiores;

- Avaliar a necessidade de aumentar a resolução da grade computacional nas praias (especialmente nas praias menores, como praias do Cachorro e Meio);
- Analisar em maior detalhe os efeitos das ondas na sobrelevação do nível médio da água junto à costa e as consequências destes na morfologia das praias;
- Incluir cenários que considerem as mudanças climáticas, através do aumento do nível do médio do mar e dos eventos extremos de ondas, e avaliar os impactos na dinâmica sedimentar, mobilidade das praias e distribuição de habitats bentônicos;
- Verificar com maior detalhe os efeitos do regime de ventos na hidrodinâmica da plataforma insular.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. **Geologia e petrologia do arquipélago de Fernando de Noronha**. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1955. 181 p. (Monografia XIII)

ALMEIDA, F. F. M. Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica. **Terrae Didactica**, v. 2, n. 1, p. 3-18, 2006.

AMADO-FILHO, G. M.; PEREIRA-FILHO, G. H.; BAHIA, R. G.; ABRANTES, D. P.; VERAS, P. C.; MATHEUS, Z. Occurrence and distribution of rhodolith beds on the Fernando de Noronha Archipelago of Brazil. **Aquatic Botany**, v. 101, p. 41-45, 2012.

AMBROSIO, B.G.; TAKASE, L.S.; STEIN, L.P.; COSTA, M.B.; SIEGLE, E. Wave-induced sediment and rhodolith mobility on a narrow insular shelf dominated by wave variability (Fernando de Noronha Archipelago, Brazil). **Continental Shelf Research**, v. 235, n. 104662, 2022.

ASSIS, H. M. B.; VIRGENS NETO, J. das; VALLE, M. M. Mapa de Integração da Faciologia e Litologia das Ilhas e Plataforma Insular do Arquipélago de Fernando de Noronha. Recife: CPRM, 2018. 1 mapa color., 140 x 90cm, Escala: 1:18.000 (Programa Mar, Zona Costeira e Antártica).

ASSUNÇÃO, R. V. **Variabilidade sazonal da dinâmica oceânica na região do Mar de Dentro do Arquipélago de Fernando de Noronha, PE**. 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco.

ÁVILA, E.; RIOSMENA-RODRIGUEZ, R. A preliminary evaluation of shallow-water rhodolith beds in Bahia Magdalena, Mexico. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 59, n. 4, p. 365-375, 2011.

BARCELLOS, R. L.; LINS, S. R. R. M.; COELHO-JÚNIOR, C.; TRAVASSOS, P. E. P. F.; CAMARGO, P. B. Sistema sedimentar do Sueste: Caracterização morfossedimentar e geoquímica sazonal. Mar de fora, Fernando de Noronha (PE). In: Encontro de Pesquisa de Fernando de Noronha, São Pedro e São Paulo e Atol das Rocas, 1., 2015. Fernando de Noronha. **Anais...Fernando de Noronha: ICMBio**, 2016. 233 p.

BARCELLOS, R. L.; OLIVEIRA, L. E. E.; FLORES-MONTES, M. J. Spatial sedimentary distribution, seasonality and the characteristics of organic matter on Fernando de Noronha insular shelf. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 66, n. 1, p. 131-156, 2018.

BECKER, H. **Hidrologia dos bancos e ilhas oceânicas do nordeste brasileiro. Uma contribuição ao Programa REVIZEE.** 2001. 158 p. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de São Carlos.

BIRD, E. C. F. **Coastal geomorphology: an introduction.** Chichester: Wiley and Sons, 2008. 411 p.

BOCHICCHIO, C.; FLETCHER, C. H.; DYER, M.; SMITH, T. Reef-top sediment bodies: Windward Oahu, Hawaii. **Pacific Science**, v. 63, n. 1, p. 61-82, 2009.

BOOIJ, N.; RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H. A third-generation wave model for coastal regions. Part I: Model description and validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C4, p. 7649-7666, 1999.

BOSENCE, D. W. J. **The occurrence and ecology of recent rhodoliths** - a review. In: PERYT, T. M. (Ed.), *Coated Grains*. Berlin: Springer-Verlag, p. 225–242, 1983.

BUTMAN, B.; NOBLE, M.; FOLGER, D. W. Long-term observations of bottom current and bottom sediment movement on the Mid-Atlantic continental shelf. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, n. C3, p. 1187-1205, 1979.

CACCHIONE, D. A.; WIBERG, P. L.; LYNCH, J.; IRISH, J.; TRAYKOVSKI, P. Estimates of suspended-sediment flux and bedform activity on the inner portion of Eel continental shelf. **Marine Geology**, v. 154, n. 1–4, p. 83-97, 1999.

CALLIARI, L. J.; MUEHE, D.; HOEFEL, F. G.; TOLDO JR., E. Morfodinâmica praias: uma breve revisão. **Revista brasileira de oceanografia**, v. 51, p. 63-78, 2003.

CALLIARI, L. J.; PEREIRA, P. S.; SHORT, A. D.; SOBRAL, F. C.; MACHADO, A. A.; PINHEIRO, Y. G.; FITZPATRICK, C. **Sandy beaches of Brazilian oceanic islands.** In: *Brazilian beach systems*. v. 7, p. 543-571, 2016.

CASTRO, J. W. A. Ilhas oceânicas da Trindade e Fernando de Noronha, Brasil: Uma visão da Geologia Ambiental. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 3, p. 303-319, 2010.

CONGER, C. L.; FLETCHER, C. H.; HOCHBERG, E. H.; FRAZER, N.; ROONEY, J. J. B. Remote sensing of sand distribution patterns across an insular shelf: Oahu, Hawaii. **Marine Geology**, v. 267, n. 3-4, p. 175-190, 2009.

COSTA, M. B. Clima de Ondas e extremos em Fernando de Noronha e Atol das Rocas. In: *Encontro de Pesquisa de Fernando de Noronha, São Pedro e São Paulo e Atol das Rocas*, 1., 2015. Fernando de Noronha. **Anais...Fernando de Noronha: ICMBio**, 2016. 233 p.

COUGHLAN, M.; GUERRINI, M.; GREANE, S.; O'SHEA, M.; WARD, S. L.; VAN LANDEGHEM, K. J. J.; MURPHY, J.; DOHERTY, P. A new seabed mobility index for the Irish Sea: Modelling seabed shear stress and classifying sediment mobilisation to help predict erosion, deposition, and sediment distribution. **Continental Shelf Research**, v. 229, n. 104574, p. 1-17, 2021.

CRONK, Q. C. B. Islands: stability, diversity, conservation. **Biodiversity and Conservation**, n. 6, p. 477-493, 1997.

DAVIES, J. L. **Geographical variation in coastal development**. New York: Longman, 1980.

DELTARES **Delft3D-FLOW User Manual: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic and transport phenomena, including sediments**. The Netherlands: Deltares, 2019. 682 p.

DELTARES **Delft3D-WAVE User Manual: Simulation of short-crested waves with SWAN**. The Netherlands: Deltares, 2014. 210 p.

DRAKE, D. E., CACCHIONE, D. A. Seasonal variation in sediment transport on the Russian River shelf, California. **Continental Shelf Research**, v. 4, n. 5, pp. 495-514, 1985.

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. 12, p. 24821-24852, 1994.

ESTON, V. R.; MIGOTTO, A. E.; OLIVEIRA FILHO, E. C.; RODRIGUES, S. A.; FREITAS, J. C. Vertical distribution of benthic marine organisms on rocky coasts of the Fernando de Noronha Archipelago (Brazil). **Boletim Institute of Oceanography**, v. 34, p. 37-53, 1986.

FLETCHER, C. H.; BOCHICCHIO, C.; CONGER, C. L.; ENGELS, M. S.; FEIRSTEIN, E. J.; FRAZER, N.; GLENN, C. R.; GRIGG, R. W.; GROSSMAN, E. E.; HARNEY, J. N.; ISOUN, E.; MURRAY-WALLACE, C. V.; ROONEY, J. J.; RUBIN, K. H.; SHERMAN, C. E.; VITOUSEK, S. Geology of Hawaii Reefs, In: RIEGL, B. M.; DODGE, R. E. (Ed.), **Coral Reefs of the USA. Coral Reefs of the World**, vol. 1., Dordrecht: Springer, 2008.

FLETCHER, C.; ROONEY, J.; BARBEE, M.; LIM, S. C.; RICHMOND, B. Mapping Shoreline Change Using Digital Orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. **Journal of Coastal Research**, n. 38, Special Issue, p. 106-124, 2003.

FLOYD, P. **Oceanic islands and seamounts**. In: FLOYD, P. A. (Ed.), **Oceanic Basalts**. Boston: Springer, 1991.

FOSTER, M. S. Rhodoliths: between rocks and soft places. **Journal of Phycology**, v. 37, n. 5, p. 659-667, 2001.

GRIFFIN, J. D.; HEMER, M. A.; JONES, B. G. Mobility of sediment grain size distributions on a wave dominated continental shelf, southeastern Australia. **Marine Geology**, v. 252, n. 1-2, p. 13–23, 2008.

HALL-SPENCER, J. Conservation issues relating to maerl beds as habitats for molluscs. **Journal of Conchology**, special publication n. 2, p. 271–286, 1998.

HARNEY, J. N.; FLETCHER, C. H. A budget of carbonate framework and sediment production, Kailua Bay, Oahu, Hawaii. **Journal of Sedimentary Research**, v. 73, n. 6, p. 856-868, 2003.

HARNEY, J. N.; GROSSMAN, E. E.; RICHMOND, B. M.; FLETCHER, C. H. Age and composition of carbonate shoreface sediments, Kailua Bay, Oahu, Hawaii. **Coral Reefs**, v. 19, p.141-154, 2000.

HARRIS, C. K.; WIBERG, P. L. A two-dimensional, time-dependent model of suspended sediment transport and bed reworking for continental shelves. **Computers & Geosciences**, v. 27, n. 6, p. 675-690, 2001.

HARRIS, P. T.; TSUJI, Y.; MARSHALL, J. F.; DAVIES, P. J.; HONDA, N.; MATSUDA, H. Sand and rhodolith-gravel entrainment on the mid- to outer-shelf under a western boundary current: Fraser Island continental shelf, eastern Australia. **Marine Geology**, v. 129, n. 3-4, p. 313–330, 1996.

HEMER, M. A. The magnitude and frequency of combined flow bed shear stress as a measure of exposure on the Australian continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 26, n. 11, p. 1258–1280, 2006.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020.

HINOJOSA-ARANGO, G.; MAGGS, C. A.; JOHNSON, M. P. Like a rolling stone: the mobility of maerl (Corallinaceae) and the neutrality of the associated assemblages. **Ecology**, v. 90, n. 2, p. 517–528, 2009.

HOEFEL, F. G. **Morfodinâmica de praias arenosas oceânica: uma Revisão Bibliográfica**. Itajaí: Editora da Univali, 1998.

HOEFEL, F.; ELGAR, S. Wave-induced sediment transport and sandbar migration. **Science**, v.299, p. 1885-1887, 2003.

HOLTHUIJSEN, L. H. **Waves in oceanic and coastal waters**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

HOLTHUIJSEN, L. H.; BOOIJ, N.; RIS, R. C. A spectral wave model for the coastal zone. In Proceedings of 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, p. 630–641, 1993.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) **Contagem da População, 2016; Fernando de Noronha (PE)**. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=260545>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

INNOCENTINI V.; ARANTES, F. O.; FERREIRA, R. J.; MICHELETO, R. G. A agitação marítima no litoral nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 367-374, 2005.

IPCC Climate Change **The physical science basis**. Working Group I contribution to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: SOLOMON et al. (Ed.). Cambridge University Press, 2007.

KIER, G.; KREFT, H.; LEE, T. M.; JETZ, W.; IBISCH, P. L.; NOWICKI, C.; MUTKE, J.; BARTHLOTT, W. A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, n. 106, v. 23, p. 9322-9327, 2009.

KING, C. A. M. **Beaches and coasts**. 2nd ed. London: Edward Arnold, 1972. 570 p.

KOMAR, P. D. **Beach processes and sedimentation**. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 544 p.

KONAR, B.; RIOSMENA-RODRIGUEZ, R.; IKEN, K. Rhodolith bed: a newly discovered habitat in the North Pacific Ocean. **Botanica Marina**, v. 49, n. 4, p. 355-359, 2006.

LAVENÈRE-WANDERLEY, A. A.; ASP, N. E.; THOMPSON, F. L.; SIEGLE, E. Rhodolith mobility potential from seasonal and extreme waves. **Continental Shelf Research**, v. 228, n. 104527, 2021.

LAVENÈRE-WANDERLEY, A. A.; SIEGLE, E. Wave-induced sediment mobility on a morphologically complex continental shelf: eastern Brazilian shelf. **Geo-Marine Letters**, v. 39, p. 349–361, 2019.

LI, M. Z.; AMOS, C. L.; HEFFLER, D. E. Boundary layer dynamics and sediment transport under storm and non-storm conditions on the Scotian shelf. **Marine Geology**, v. 141, n. 1-4, p. 157-181, 1997.

LI, M. Z.; HANNAH, C. G.; PERRIE, W. A.; TANG, C. C. L.; PRESCOTT, R. H.; GREENBERG, D. A. Modelling seabed shear stress, sediment mobility, and sediment transport in the Bay of Fundy. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 52, n. 9, p. 757-775, 2015.

LI, M. Z.; WU, Y.; HANNAH, C. G.; PERRIE, W. A. Seabed disturbance and sediment mobility due to tidal current and waves on the continental shelves of Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 58, n. 11, p. 1-24, 2021.

LI, N.; CHEUNG, K. F.; STOPA, J. E.; HSIAO, F.; CHEN, Y. L.; VEGA, L.; CROSS, P. Thirty-four years of Hawaii wave hindcast from downscaling of climate forecast system reanalysis. **Ocean Modelling**, v. 100, p. 78-95, 2016.

LITTLER, M. M.; LITTLER, D. S.; HANISAK, M. D. Deep-water rhodolith distribution, productivity, and growth history at sites of formation and subsequent degradation. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 150, n. 2, p. 163-182, 1991.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves. **Journal of Geophysical Research**, v. 75, n. 33, p. 6778-6789, 1970.

MANSO, V. A. V.; MENOR, E. A.; VALENÇA, L. M. M.; NEUMANN, V. H. M. L.; PEREIRA, N. S.; JUNIOR, C. F. A. S.; SILVA, E. R. M. Morfodinâmica de praias setentrionais da ilha de Fernando de Noronha. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 11, n. 3, p. 327-339, 2011.

MARLIERE, E. R. Ilhas Oceânicas: Sentinelas Avançadas do Brasil. In: ALVES, R. J. V.; CASTRO, J. W. A. (Orgs.) **Ilhas Oceânicas Brasileiras: da Pesquisa ao Manejo**. Brasília: MMA/SBF, 2006. p. 19-25.

MATHEUS, Z.; FRANCINI-FILHO, R. B.; PEREIRA-FILHO, G. H.; MORAES, F. C.; MOURA, R. L.; BRASILEIRO, P. S.; AMADO-FILHO, G. M. Benthic reef assemblages of the Fernando de Noronha Archipelago, tropical South-west Atlantic: effects of depth, wave exposure and cross-shelf positioning. **PLoS ONE**, v. 14, n. 1, p. 1-15, 2019.

MEIRELES, R. P.; QUARTAU, R.; RAMALHO, R. S.; REBELO, A. C.; MADEIRA, J.; ZANON, V.; ÁVILA, S. P. Depositional processes on oceanic island shelves – Evidence from storm-generated Neogene deposits from the mid-North Atlantic. **Sedimentology**, v. 60, n. 7, pp. 1769–1785, 2013.

MELO, A. B. C.; NOBRE, P.; MENDES, D.; BOTTINO, M. J. A Zona de Convergência Intertropical sobre o Oceano Atlântico: Climatologia. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12., 2002. Foz do Iguaçu. **Anais...**Rio de Janeiro: SBMET, 2002. p. 682-686.

MMA (Ministério do Meio Ambiente). **Plano de Manejo**: APA – Fernando de Noronha - Rocas - São Pedro e São Paulo. Encartes 1, 2, 3 e 4. Versão Final, 2005.

MORIARTY, J. M.; HARRIS, C. K.; HADFIELD, M. G. A hydrodynamic and sediment transport model for the Waipaoa Shelf, New Zealand: sensitivity of fluxes to spatially-varying erodibility and model nesting. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 336–369, 2014.

NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. **Science**, v. 328, n. 5985, p. 1517-1520, 2010.

NICHOLS, G. **Sedimentology and stratigraphy**. 2nd ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009.

OBERLE, F. K. J.; STORLAZZI, C. D.; HANEETH, T. J. J. Wave-driven sediment mobilization on a storm-controlled continental shelf (Northwest Iberia). **Journal of Marine Systems**, v. 139, p. 362–372, 2014.

OGSTON, A. S.; STORLAZZI, C. D.; FIELD, M. E.; PRESTO, M. K. Sediment resuspension and transport patterns on a fringing reef flat, Molokai, Hawaii. **Coral Reefs**, v. 23, n. 4, p. 559-569, 2004.

PEREIRA-FILHO, G. H.; FRANCINI-FILHO, R. B.; PIEROZZI-JR, I.; PINHEIRO, H. T.; BASTOS, A. C.; MOURA, R. L.; MORAES, F. C.; MATHEUS, Z.; BAHIA, R. G.; AMADO-FILHO, G. M. Sponges and fish facilitate succession from rhodolith beds to reefs. **Bulletin of Marine Science**, v. 91, n. 1, p. 45–46, 2015.

PIMM, S. L. Lessons from a kill. **Biodiversity and Conservation**, v. 5, p. 1059–1067, 1996.

PORTER-SMITH, R.; HARRIS, P. T.; ANDERSEN, O. B.; COLEMAN, R.; GREENSLADE, D.; JENKINS, C. J. Classification of the Australian continental shelf based on predicted sediment threshold exceedance from tidal currents and swell waves. **Marine Geology**, v. 211, n. 1-2, p. 1–20, 2004.

PRESTO, M. K.; OGSTON, A. S.; STORLAZZI, C. D.; FIELD, M. E. Temporal and spatial variability in the flow and dispersal of suspended-sediment on a fringing reef flat, Molokai, Hawaii. Estuarine, **Coastal and Shelf Science**, v. 67, n. 1-2, p. 67-81, 2006.

RANASINGHE, R.; PATTIARATCHI, C. The seasonal closure of tidal inlets: Wilson Inlet - a case study. **Coastal Engineering**, v. 37, n. 1, p. 37-56, 1999.

RAO, V. B.; LIMA, M. C.; FRANCHITO, S. H. Seasonal and interannual variations of rainfall over eastern northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1754–1763, 1993.

RIS, R. C.; HOLTHUIJSEN, L. H.; BOOIJ, N. A third-generation wave model for coastal regions. Part II: Verification. **Journal of Geophysical Research**, v. 104, n. C4, p. 7667–7681, 1999.

SANTOS, C. S. G.; LINO, J. B.; VERAS, P. C.; AMADO-FILHO, G. M.; FRANCINI-FILHO, R. B.; MOTTA, F. S.; MOURA, R. L.; PEREIRA-FILHO, G. H. Environmental licensing on rhodolith beds: Insights from a worm. **Natureza & Conservação**, v. 14, n. 2, p. 137–141, 2016.

SERAFINI, T. Z.; FRANÇA, G. B.; ANDRIGUETTO-FILHO, J. M. Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 3, p. 281-301, 2010.

SIEGLE, E. **Sediment transport and morphodynamics at an estuary mouth: a study using coupled remote sensing and numerical modelling**. 2003. 257 f. Thesis (Ph.D.) – School of Earth, Ocean and Environmental Science. Faculty of Science. University of Plymouth.

SIEGLE, E.; ASP, N. E. Wave refraction and longshore transport patterns along the southern Santa Catarina coast. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 55, n. 2, p. 109-120, 2007.

SILVA, J. S.; SOUZA, P. L. Avaliação de impacto ambiental e capacidade de suporte do porto e embarcações em Fernando de Noronha. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 48., 2010, Campo Grande. **Proceedings...**Campo Grande: [S.n.], 2010. Disponível em <<http://www.sober.org.br/palestra/15/1224.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

SOUSA, P. H. G. O. **Dinâmica ambiental e transformações socioespaciais da orla marítima de Paracuru – Ceará**. 2007. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual do Ceará.

SOUSA, P. H. G. O.; SIEGLE, E.; TESSLER, M. G. Vulnerability assessment of Massaguaçu Beach (SE Brazil). **Ocean and Coastal Management**, v. 77, p. 24-30, 2013.

STENECK, R. S. The ecology of coralline algal crusts: convergent patterns and adaptative strategies. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 17, n. 1, p. 273–303, 1986.

STOPA, J. E.; CHEUNG, K. F.; CHEN, Y. L. Assessment of wave energy resources in Hawaii. **Renewable Energy**, v. 36, n. 2, p. 554-567, 2011.

STORLAZZI, C. D.; ELIAS, E.; FIELD, M. E.; PRESTO, M. K. Numerical modeling of the impact of sea-level rise on fringing coral reef hydrodynamics and sediment transport. **Coral Reefs**, v. 30, n. 1, p. 83-96, 2011.

STORLAZZI, C. D.; OGSTON, A. S.; BOTHNER, M. H.; FIELD, M. E.; PRESTO, M. K. Wave- and tidally-driven flow and sediment flux across a fringing coral reef: Southern Molokai, Hawaii. **Continental Shelf Research**, v. 24, p. 1397-1419, 2004.

STORLAZZI, C. D.; REID, J. A. The influence of El Niño-Southern Oscillation (ENSO) cycles on wave-driven sea-floor sediment mobility along the central California continental margin. **Continental Shelf Research**, v. 30, n. 14, p.1582–1599, 2010.

TAIT, R. J. Wave set-up on coral reefs. **Journal of Geophysical Research**, v. 77, n. 12, p. 2207–2211, 1972.

TEIXEIRA, W.; CORDANI, U. G.; MENOR, E. A.; TEIXEIRA, M. G.; LINSKER, R. **Arquipélago Fernando de Noronha: o paraíso do vulcão**. São Paulo: Terra Virgem, 2003. 167 p.

TOLMAN, H. L. **User manual and system documentation of WAVEWATCH III**. Version 1.18. Camp Springs: NOAA, 1999.

TRAVASSOS, P.; HAZIN, F. H. V.; ZAGAGLIA, J. R.; ADVINCULA, R.; SCHOBBER, J. Thermohaline structure around seamounts and islets of North-Eastern Brazil. **Archive of Fishery and Marine Research**, v. 47, n.2, p. 211-222, 1999.

TSUTSUI, B.; CAMPBELL, J. F.; COULBOURN, W. T. Storm-generated, episodic sediment movements off Kahe Point, Oahu, Hawaii. **Marine Geology**, v. 76, pp. 281–299, 1987.

VAN RIJN, L. C. General view on sand transport by currents and waves: data analysis and engineering modelling for uniform and graded sand (TRANSPOR 2000 and CROSMOR 2000 models). Z2899.20 / Z2099.30 / Z2824.30. WL | Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands, 2001.

VAN RIJN, L. C. **Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas**. Aqua Publications, The Netherlands, 1993.

VAN RIJN, L. C.; WALSTRA, D.; GRASMEIJER, B.; SUTHERLAND, J.; PAN, S.; SIERRA, J. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. **Coastal Engineering**, v. 47, p. 295–327, 2003.

VITOUSEK, S.; FLETCHER, C. H.; MERRIFIELD, M. A.; PAWLAK, G. Model scenarios of shoreline change at Kaanapali Beach, Maui, Hawaii: seasonal and extreme events. **Coastal Sediments '07**, p. 1227–1240, 2007.

WALSTRA, D. J. R.; VAN RIJN, L. C.; BLOGG, H.; VAN ORMONDT, M. Evaluation of a hydrodynamic area model based on the COAST3D data at Teignmouth 1999. Report TR121-EC MAST Project No. MAS3-CT97-0086, HR Wallinford, UK, p. D4.1-D4.4, 2001.

WHEATCROFT, R. A.; SOMMERFIELD, C. K. River sediment flux and shelf sediment accumulation rates on the Pacific Northwest margin. **Continental Shelf Research**, v. 25, n. 3, p. 311-332, 2005.

WIBERG, P. L.; DRAKE, D. E.; CACCHIONE, D. A. Sediment resuspension and bed armoring during high bottom stress events on the northern California continental shelf: measurements and predictions. **Continental Shelf Research**, v. 14, n. 10-11, p. 1191-1219, 1994.

WIBERG, P. L.; SHERWOOD, C. R. Calculating wave-generated bottom orbital velocities from surface-wave parameters. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 10, p. 1243-1262, 2008.

WILDNER, W.; FERREIRA, R. V. Geoparque Fernando de Noronha (PE): Proposta. In: SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. R. (Orgs.) **Geoparques do Brasil: Propostas**. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. p. 317-360.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 90, n. C5, p. 8995–9005, 1985.

WILLMOTT, C. J.; WICKS, D. E. An empirical method for the spatial interpolation of monthly precipitation within California. **Physical Geography**, v.1, n.1, p. 59-73, 1980.

WRIGHT, L. D.; KIM, S. C.; FRIEDRICHS, C. T. Across-shelf variations in bed roughness, bed stress and sediment suspension on the northern California shelf. **Marine Geology**, v. 154, n. 1-4, p. 99–115, 1999.

WRIGHT, L. D.; SHORT, A. D. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. **Marine Geology**, v. 56, n. 1-4, p. 93-118, 1984.

WRIGHT, L. D.; XU, J. P.; MADSEN, O. S. Across-shelf benthic transports on the inner shelf of the Middle Atlantic Bight during the “Halloween storm” of 1991. **Marine Geology**, v. 118, n. 1-2, p. 61-77, 1994.

ZENKOVICH, V. P. **Processes of coastal development**. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1967.  
738 p.