



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

LETÍCIA MESQUITA EDUARDO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE ALTA ENERGIA LIGADOS A
SISTEMAS ATMOSFÉRICOS DO HEMISFÉRIO NORTE SOBRE O BALANÇO
SEDIMENTAR DA PRAIA DO MEIRELES, CEARÁ**

FORTALEZA, CEARÁ

2021

LETÍCIA MESQUITA EDUARDO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE ALTA ENERGIA LIGADOS A
SISTEMAS ATMOSFÉRICOS DO HEMISFÉRIO NORTE SOBRE O BALANÇO
SEDIMENTAR DA PRAIA DO MEIRELES, CEARÁ**

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE
ALTA ENERGIA LIGADOS A SISTEMAS
ATMOSFÉRICOS DO HEMISFÉRIO NORTE SOBRE O
BALANÇO SEDIMENTAR DA PRAIA DO MEIRELES,
CEARÁ

Área de concentração: Oceanografia Geológica

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Bezerra Lima Júnior

Coorientação: Prof. Dr. Alexandre Medeiros de Carvalho

FORTALEZA, CEARÁ

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- E1a Eduardo, Leticia Mesquita.
Avaliação da influência de eventos de alta energia ligados a sistemas atmosféricos do Hemisfério Norte sobre o balanço sedimentar da Praia do Meireles, Ceará. / Leticia Mesquita Eduardo. – 2021.
70 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. Sérgio Bezerra Lima Júnior.
Coorientação: Prof. Dr. Alexandre Medeiros de Carvalho.
1. Balanço sedimentar. 2. Ciclones extratropicais. 3. Ressacas do mar. 4. Gerenciamento costeiro. 5. VANT's. I. Título.

CDD 551.46

LETÍCIA MESQUITA EDUARDO

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE EVENTOS DE ALTA ENERGIA LIGADOS A
SISTEMAS ATMOSFÉRICOS DO HEMISFÉRIO NORTE SOBRE O BALANÇO
SEDIMENTAR DA PRAIA DO MEIRELES, CEARÁ**

Monografia apresentada ao Curso de Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar-LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Geológica.

Aprovada em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Bezerra Lima Júnior

Prof. Dr. Luís Parente Maia

Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco

“Eu fui e ainda sou um explorador, mas deixei de questionar estrelas e livros. Comecei a ouvir os ensinamentos que meu sangue me sussurra”.

(Hermann Hesse)

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e todos, à Dona Andréia, Seu Eduardo e Valeska pelo apoio incondicional em todos os meus – às vezes assertivos, às vezes titubeantes – passos.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Sérgio Bezerra, por ter em mim acreditado e oferecido a primeira oportunidade de desenvolver meu potencial acadêmico. Sou grata a toda a equipe do LABDIC (Prof. Sérgio, Prof. Alexandre, Gleidson e Prof. Luís Parente) pela parceria do dia-a-dia e pelo valioso conhecimento compartilhado.

Em especial, sou enormemente grata ao Prof. Alexandre Medeiros de Carvalho pelo trabalho minucioso (e, imagino, nada fácil) de esculpir as minhas habilidades de pesquisa científica no decorrer de todos os projetos que desenvolvemos juntos. Além de um grande pesquisador e orientador, ele foi um grande amigo (também um pai, meio irmão) que acreditou na minha capacidade de alcançar voos altos – muitas vezes mais do que eu mesma.

Agradeço a todo o corpo docente, funcionários e à coordenação do LABOMAR – assim como aos professores de outros departamentos da Universidade, a exemplo do Prof. Satander – pela contribuição essencial à minha formação. Estendo minha gratidão particularmente ao Laboratório de Oceanografia Geológica (LOG) e toda sua equipe – bem como ao LGCO-UECE – por todo o auxílio e troca de experiências científicas.

Finalmente, aos grandes amigos e colegas que fiz durante esta jornada, principalmente da turma 2017.1, agradeço pelo apoio e cumplicidade nos maravilhosos, bons, não tão bons e às vezes desesperadores momentos da graduação. Meu “muito obrigada” especialmente à Marina Martins, Débora Melo, Camille, Ben, Mariana, Felipe, Regimário (Régis), Antônio Ximenes (Tião) e Mariany.

RESUMO

Diante da dinamicidade dos processos costeiros em relação às variáveis atmosféricas e oceanográficas, as variações no balanço sedimentar em escala local são de grande interesse para questões de Gerenciamento Integrado da Zona Costeira. A diversidade de fatores ambientais atuantes, bem como a variação topográfica relacionada à chegada dispersivas de ondas do Atlântico Norte na Praia do Meireles, Fortaleza-CE, compõem os principais objetos de interesse deste estudo. Para os fins propostos, foram aplicados de forma conjunta métodos diretos e indiretos de aquisição e processamento de dados. Aerofotogrametria com uso de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), geração e refinamento de modelos 3D e análise sedimentológica foram feitas, bem como o acompanhamento detalhado de variáveis meteorológicas e oceanográfica através de fontes in situ e modelagem ambiental. Os resultados de um ano de monitoramento revelaram um balanço sedimentar com diferentes respostas a eventos de alta energia associados à ocorrência de ciclones extratropicais no Atlântico Norte. O balanço sedimentar expressou uma tendência erosiva de 25,5% refletida em uma diminuição de 17,4% no nível topográfico médio da área. A erosão da face de praia esteve relacionada à incidência de ondas de longo período e maior variabilidade de tipos de onda. Mudanças sedimentares positivas foram relacionadas a condições ambientais mais brandas. Ondas do tipo swell tiveram um papel significativo tanto no processo erosivo quanto construtivo da face de praia. Notou-se ainda uma assimetria na susceptibilidade a alterações entre diferentes setores da área de estudo. As perspectivas futuras de monitoramento contínuo de alta qualidade, como o realizado neste estudo, são um fator de importância para a área de estudo – e para um cenário mundial que reflete a, cada vez mais intensa, antropização da zona costeira.

Palavras-chave: *ciclones extratropicais; VANT's; ressacas do mar; balanço sedimentar; gerenciamento costeiro;*

ABSTRACT

Considering the high dynamicity of atmospheric and oceanographic variables in coastal processes, local sedimentary balance is a matter of great interest for Integrated Coastal Zone Management. The diversity of environmental factors as well as the topographic variations related to storm surge events associated to cyclone formation in the North Atlantic are assessed in this research for a stretch of the Meireles Beach, Fortaleza, Ceará. For this purpose, an association of direct and indirect methods was applied for data acquisition and processing. Remote sensing techniques with Unmanned Aerial Vehicle (UAV), 3D modelling and sedimentary analysis were performed, as well as detailed monitoring of meteorological and oceanographic variables with *in situ* sources and environmental modelling. The results of one-year monitoring revealed a sedimentary balance with different variations in response to high-energy events associated to extratropical cyclones on the North Atlantic. The sedimentary balance showed an erosional rate of 25.5%, reflected in a 17.4% diminution in average topographic level of the area. Beach erosion was correlated to long period waves and great variability of wave types. Positive volumetric changes were correlated to mild weather environmental conditions. Swell waves presented a significant role in both beach erosion and following consequential topographic recovery. There was an asymmetric susceptibility to volume losses in different beach sectors. Future perspectives of continuous high-quality monitoring, such as the one performed in this study, are a factor of great relevance for the study area – and for a global scenario which reflects the increasing anthropization of coastal zone.

Palavras-chave: *extratropical cyclones; UAV's; storm surges; sedimentary balance; coastal management;*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização geral da área de estudo. Fonte: o Autor.

Figura 2. Mapa de tipos climáticos (IPECE, 2021) e climatologia média mensal de chuvas e ventos da Estação Meteorológica de Fortaleza – INMET (1980 – 2019). Fonte: IPECE (2021); INMET (2021).

Figura 3. Mapa combinado de unidades geológicas e geoambientais. Fonte: Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) da Zona Costeira do Ceará (2006); IPECE (2021); CPRM (2020).

Figura 4. Breve histórico da construção do Porto do Mucuripe (1939 – 2020). A) Setas azuis indicam pontos de atracamento de embarcações, poucas residências e o aplainamento de dunas locais para a construção do Porto. B) Visão alternativa do litoral de Fortaleza; seta verde: Porto do Mucuripe; seta amarela: Ponte Metálica; seta azul: área urbanizada; seta vermelha: Poço da Draga. C) As modificações morfodinâmicas do litoral de Fortaleza tornam-se evidentes. D) Atual situação da costa. Fonte: Fechine (2007), modificado do Arquivo Nirez; o Autor.

Figura 5. Comparação histórica das modificações urbanísticas. A) Praia de Iracema em 1930; seta azul indica concentração de banhistas e setas amarelas indicam as linhas de maré alta. B) Praia do Meireles em 2020. Apesar de representarem trechos diferentes, observa-se clara diminuição da faixa de estirâncio e verticalização por estruturas imobiliárias. C) Instalação das primeiras obras de contenção da erosão. D) Setas vermelhas apontam todas as estruturas atualmente implantadas ao longo do litoral Leste/Oeste de Fortaleza. Fonte: Fechine (2007), modificado do Arquivo Nirez; o Autor.

Figura 6. Veículo Aéreo Não-Tripulado – Phantom 4 (DJI Technology Co) sobre esteira de marcação de Pontos de Controle (à esquerda). Demonstração de uso do equipamento RTK Trimble R10 GNSS (à direita). Fonte: o Autor.

Figura 7. Representação dos polígonos relativos aos setores Leste (a) e Oeste (b), com especificações de área e perímetro. Fonte: o Autor.

Figura 8. Demonstração do processo de análise granulométrica, com quarteamento (à esquerda acima), pesagem (à esquerda abaixo), peneiramento úmido (ao centro) e peneiramento mecânico (à direita). Fonte: o Autor.

Figura 9. Caracterização mensal estendida de variáveis ambientais (a) e proporções de tipos de ondas (b). Distribuição de marés, altura significativa (H_s) e altura resultante (H_r) de ondas para o período monitorado, com delimitação de temporadas de alta energia.

Figura 10. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no primeiro evento de ressaca (Evento 1). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.

Figura 11. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no segundo evento de ressaca (Evento 2). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.

Figura 12. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no terceiro evento de ressaca (Evento 3). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.

Figura 13. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no quarto evento de ressaca (Evento 4). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.

Figura 14. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no quinto evento de ressaca (Evento 5). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.

Figura 15. Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da primeira campanha (C1) Fonte: o Autor.

Figura 16. A) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da segunda campanha (C2). B) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da terceira campanha (C3). Fonte: o Autor.

Figura 17. A) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da quarta campanha (C4). B) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da quinta campanha (C5). Fonte: o Autor.

Figura 18. A) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da sexta campanha (C6). B) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da sétima campanha (C7). Fonte: o Autor.

Figura 19. Curvas de volume sedimentar (a) e nível médio (b) total da área e por setores Leste/Oeste, com identificação das porcentagens de perda e ganho sedimentar e de nível topográfico. Fonte: o Autor.

Figura 20. Modelos Digitais de Elevação (DEMs) dos setores Leste (acima) e Oeste (abaixo) nas campanhas C1 (Abr/18), C5 (Nov/18) e C7 (Mar/19), com V_{ACL} e ML associados e respectiva taxa variação em relação ao monitoramento inicial. Fonte: o Autor.

Figura 21. Mudanças no perfil praiado do setor Oeste, o mais representativo visualmente em relação às variações topográficas. Evidencia-se a formação de uma escarpa bem delimitada em Novembro/18, logo após a ocorrência de um evento de ressaca. Fonte: o Autor.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Nomenclatura, datas, altura de maré associada, número de imagens e número de amostras sedimentares coletadas em campo. Fonte: o Autor.

Tabela 2. Parâmetros decorrentes do processamento dos Modelos de Elevação. Erro horizontal em metros, pixels, erro vertical e número de pontos na Nuvem de Pontos e Nuvem de Pontos Densa. Fonte: o Autor.

Tabela 3. Temporadas e eventos de alta energia identificados no período de monitoramento com especificação de datas, duração, pressão mínima registrada, altura significativa de ondas máxima e tempo de resposta. Fonte: o Autor.

Tabela 4. Distribuição percentual das classificações de parâmetros granulométricos nos setores de estirâncio (EST) e pós-praia (PP). Fonte: o Autor.

Tabela 5. Distribuição percentual das classificações de parâmetros granulométricos nos setores Leste (SL) e Oeste (SO). Fonte: o Autor.

Tabela 6. Coeficientes de Correlação de Pearson (ρ) entre altura significativa (H_s), altura resultante (H_r), período (T), velocidade média de ventos (W_{spd}), precipitação ($Prec$), volume total (V_{ACL}), nível médio (ML), proporção de ondas *sea* (%*sea*) e proporção de ondas *swell* (%*swell*). Fonte: o Autor.

LISTA DE SIGLAS

CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
DHN	Diretoria de Hidrografia e Navegação
E	Leste
GFS	Global Forecast System
GIS	Geographic Information System
GIZC	Gestão Integrada da Zona Costeira
HN	Hemisfério Norte
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE	Modelo de Elevação
ML	Mean Level
MSLP	Mean Sea Level Pressure
N	Norte
NE	Nordeste
NEB	Nordeste Brasileiro
NW	Noroeste
PNBOIA	Programa Nacional de Boias
RBCM	Rede Brasileira de Monitoramento Costeiro
RTK	Real Time Kinematics
SE	Sudeste
UTM	Universal Transversa de Mercator
VACL	Volume Above Custom Level
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WW3	Wave Watch III
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos Gerais	17
1.2	Objetivos Específicos	17
2	ÁREA DE ESTUDO	18
2.1	Localização geral	18
2.2	Climatologia e variáveis ambientais	19
2.3	Geologia e unidades ambientais	20
2.4	Morfodinâmica costeira e histórico de intervenções	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1	Monitoramento com uso de VANT	24
3.1.1	Levantamento aerofotogramétrico	24
3.1.2	Tratamento de imagens e geração de modelos 3D	25
3.1.3	Análise comparativa	26
3.3	Caracterização sedimentológica	28
3.4	Fatores meteorológicos e oceanográficos	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Regime de Ondas	30
4.2	Formação de Ciclones Extratropicais e ocorrência de Eventos de Ressaca	31
4.2.1	Evento 1	32
4.2.2	Evento 2	33
4.2.3	Evento 3	34

4.2.4	Evento 4	35
4.2.5	Evento 5	36
4.3	Demais variáveis meteorológicas	37
4.4	Volume sedimentar	41
4.5	Granulometria	44
4.6	Interação entre fatores	46
5	DISCUSSÃO	47
6	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	APÊNCIDES	57

1 INTRODUÇÃO

A dinâmica inter-hemisférica que rege a chegada dispersiva de ondas de alta energia em resposta à formação de sistemas atmosféricos de escala sinótica no Hemisfério Norte tem sido continuamente documentada de forma global (HAMILTON, 1992; INNOCENTINI et al., 2000; CHEN et al., 2002; VASSIE et al., 2004; ALVES, 2005; SEMEDO et al., 2011) e na costa do Nordeste Brasileiro (NEB) (VIANNA, 2000; SILVA, 2011; FARIAS, 2012).

A geração de ondas de longo período ocorre em resposta à atuação de ventos com velocidade acima de 18 m s^{-1} sobre distâncias da ordem de 1.000 km (MUNK et al., 1963). Este padrão de ventos e área de *fetch* está geralmente associado com centros de baixa pressão de tempestades, onde originam-se as ondas *swell* (BARRER & URSELL, 1948). A partir deste momento, as ondas *swell* propagam-se através do oceano com baixo coeficiente de dissipação (DRENNAN et al., 2003), dispersando-se por longas distâncias em escala global (MUNK et al., 1963).

Os detalhes quanto à origem, ao padrão de ocorrência e impactos morfodinâmicos da chegada de ondas *swell* são de grande relevância para a Gestão Integrada da Zona Costeira (GIZC) (CASELLA et al., 2014; GUERRA, 2014). A ação do *swell* é particularmente importante na dinâmica litorânea quando coincide com períodos máximos de maré de sizígia, ocasionando eventos de “ressaca do mar”. A avaliação destes fatores em zonas litorâneas enfrenta desafios diante do contexto de intensa urbanização da faixa litorânea, onde é notável o histórico de intervenções antrópicas. Na costa do Nordeste do Brasil o registro de ressacas do mar está frequentemente associado à ação danosa sobre obras costeiras e urbanas (PAULA et al., 2015a).

Sistemas ciclônicos de baixa pressão são frequentes sobre o Atlântico Norte particularmente a partir dos meses de Janeiro e Julho, quando a região manifesta-se como uma das zonas primárias de ciclogênese (TRIGO et al., 1999; MENDES, 2004). A ocorrência destes sistemas atmosféricos, principalmente entre as latitudes 35° N e 65° N , dá origem à chegada de ondas do tipo *swell* na costa do estado do Ceará com tempo médio de resposta de 3 dias (FARIAS, 2012).

Os eventos de ressaca do mar são caracterizados pela chegada de ondas com até 2,8 m de altura significativa (H_s), períodos (T) de 11,2 a 20 segundos e direção (D_p) NW a NE, que, quando

somadas à ocorrência de marés de sizígia, chegam a atingir alturas significativas de 5 metros (FISCH, 2008). A alta energia associada a estes eventos confere-lhes uma capacidade modeladora da geomorfologia litorânea de atuação rápida e intensa, através da inserção ou retirada de sedimentos de diferentes setores do perfil praiial.

Diante desse cenário extremamente dinâmico, confronta-se com a necessidade de aplicação de um método de monitoramento eficiente e compatível com a escala espacial e temporal requerida para acompanhar as rápidas mudanças no balanço sedimentar praiial. No estudo em questão, e em diversos outros registrados na última década (GONÇALVES, 2015; BRUNIER, 2016; CASELLA et al., 2014; PAPAKONSTANTINO, 2016), o método aerofotogramétrico com uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) foi aplicado no monitoramento da zona costeira, avaliando suas vantagens e limitações e destacando, sobretudo, a obsolescência dos métodos diretos de perfilagem topográfica anteriormente utilizados (YOO, 2016; CHENG, 2016).

1.1 Objetivos Gerais

Analisar a relação entre a incidência de eventos de ressaca do mar na costa de Fortaleza, Ceará, associada à formação de ciclones extratropicais no Hemisfério Norte, com as variações sedimentares e morfológicas na Praia do Meireles.

1.2 Objetivos Específicos

- Aplicar uma abordagem abrangente ao estudo de dinâmica costeira com uma combinação de métodos diretos e indiretos.
- Medir e avaliar dados referentes aos fatores e processos ambientais atuantes na região ao longo do intervalo de um ano, confrontando-os com as variações topográficas medidas;
- Utilizar dados obtidos para valorar a atuação de cada fator/processo ambiental e demarcar seu período de maior atividade;
- Complementar o banco de dados morfodinâmicos da área em questão, produzindo resultados de grande valia para questões de gerenciamento da zona costeira em face às recorrentes propostas de engorda e urbanização da faixa de praia na área;

2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização geral

A região Nordeste Brasileira é composta por nove estados costeiros, com uma extensão de quase 3.400 km de linha de costa de grande variação geomorfológica (PINHEIRO, 2008). O estado do Ceará, inserido na região intertropical entre 2,5° e 8° de latitude Sul e 37° a 42° de longitude Oeste, está sob o domínio do clima semiárido e possui cerca de 573 km de extensão costeira.

A área do estudo em questão representa um trecho de 1 km da Praia do Meireles, no litoral de Fortaleza. Trata-se de uma paisagem litorânea historicamente artificializada pela construção de obras costeiras, a exemplo de espigões e aterramentos (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização geral da área de estudo. Fonte: o Autor.

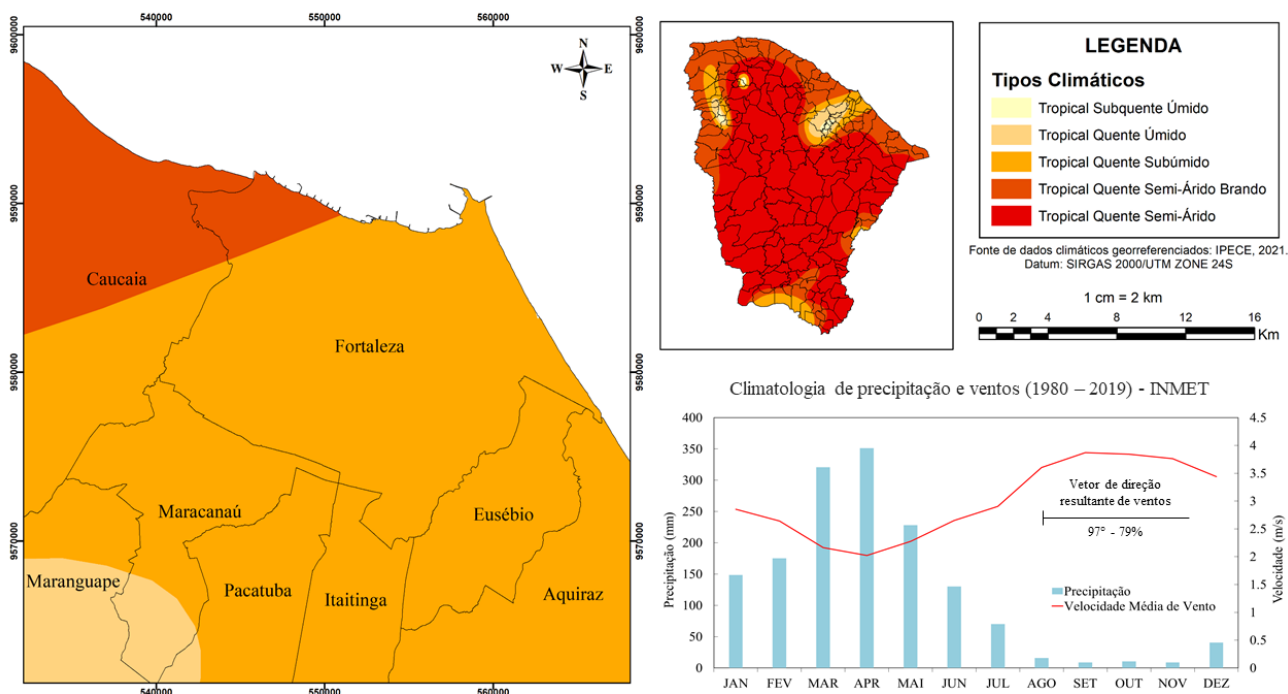


2.2 Climatologia e variáveis ambientais

O litoral da cidade de Fortaleza está sob um regime climatológico Tropical Quente Subúmido no qual dois períodos são claramente distintos: o período chuvoso (Janeiro – Maio) e o período seco, correspondente ao restante do ano (Figura 2). A pluviometria, que na época chuvosa corresponde a 90% do total, pode chegar a cerca de 1.400 mm, associada a temperatura média de 27°C com baixa amplitude de variação (IPECE, 2018).

O regime de ventos varia sazonalmente de forma inversamente proporcional ao padrão de chuvas (CARVALHO, 2003) (Figura 2), apresentando velocidades mínimas no primeiro semestre (média de 4,0 m/s) e máximas no segundo semestre do ano (média de 7,0 m/s). As direções predominantes são de E e ESE, sob a influência principal dos Ventos Alísios de Sudeste (CHUNG, 1982; UTILDA et al., 2019).

Figura 2. Mapa de tipos climáticos (IPECE, 2021) e climatologia média mensal de chuvas e ventos da Estação Meteorológica de Fortaleza – INMET (1980 – 2019). Fonte: IPECE (2021); INMET (2021).



Sob um regime de mesomarés semidiurnas, o litoral de Fortaleza está sujeito a variações na altura de marés de 2 a 3 metros – com máximas de cerca de 3 m e mínimas de até -0,2 m.

Os estados de mar observados no Ceará, segundo Fisch (2008), têm essencialmente quatro fatores atuantes. São estes: *a*) estado associado aos Ventos Locais, com ondas de Hsmáx = 1,1 m ($T_{(s)} = 2$ a 5, Dp = NW e E/SE); *b*) estado associado aos Alísios de NE, com ondas de Hsmáx = 1,1 m ($T_{(s)} = 8$ a 11, Dp = N a NE); *c*) estado associado aos Alísios de SE, com Hsmáx = 2 m ($T_{(s)} = 5$ a 11, Dp = E a SE); e, finalmente, *d*) Chegadas Dispersivas do Hemisfério Norte (HN), com Hsmáx = 2,8 m ($T_{(s)} = 11$ a 20, Dp = NW a NE).

Ainda de acordo com Fisch (2008), o estado de Chegadas Dispersivas é identificado com maior frequência durante os meses de janeiro a março. Sob a influência do Ventos Alísios de SE, estados de mar de maior energia podem ser registrados nos meses de setembro a novembro pela influência do afastamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) em relação à área – possibilitando ventos mais intensos.

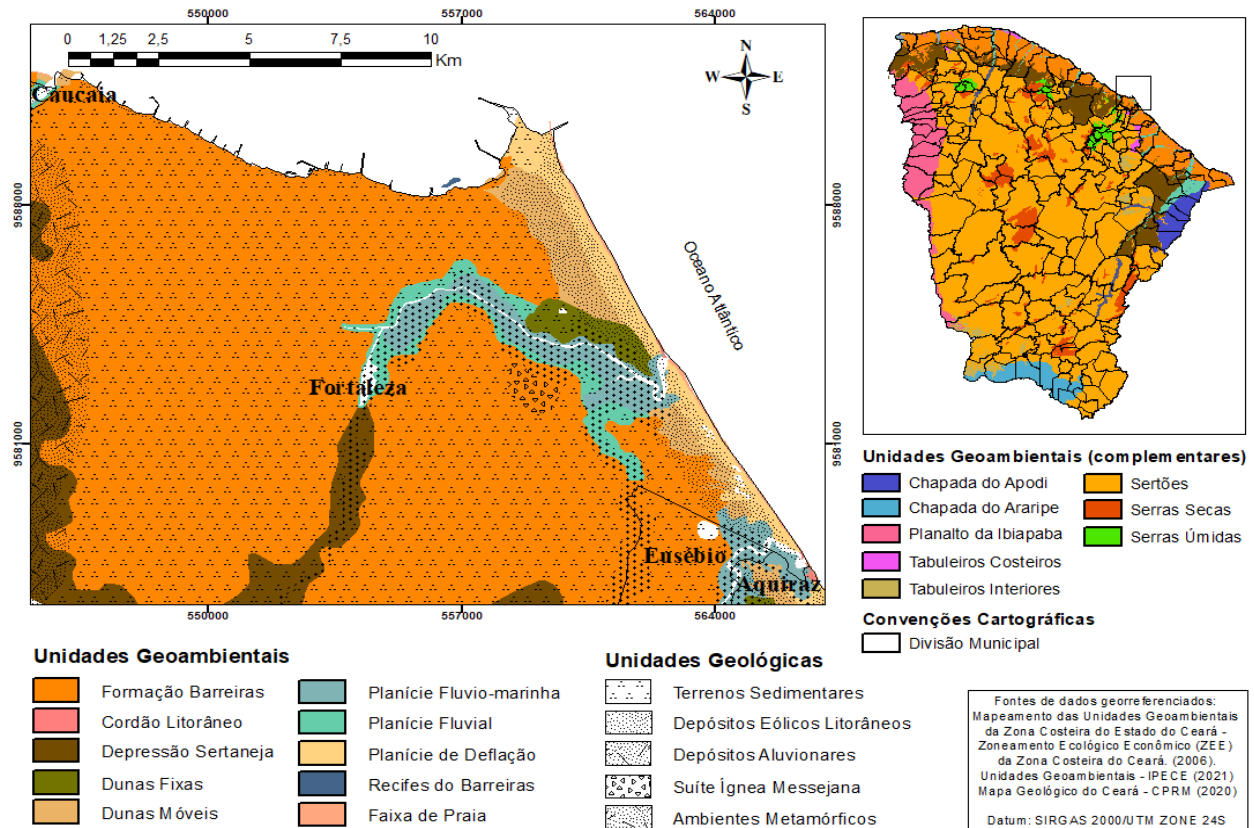
2.3 Geologia e unidades geoambientais

De forma geral, o município de Fortaleza é caracterizado pela primazia de coberturas sedimentares Cenozoicas, terrenos cristalinos e relevos decorrentes de vulcanismo terciário (Figura 3). As coberturas sedimentares Cenozoicas, que representam a maior porcentagem de área, são constituídas pela Planície Litorânea, vales e glaciais de deposição pré-litorâneos da Formação Barreiras. Os terrenos cristalinos são compostos por rochas dos complexos Gnáissico-Migmático e Granítico Migmático do Proterozoico inferior (SOUZA *et al.*, 2007).

Segundo Maia (1998a), a Planície Litorânea fortalezense é caracterizada como um sistema arenoso com presença pontual de afloramentos de depósitos litificados da Formação Barreiras. Os sedimentos desta unidade têm aspectos morfológicos distintos, com predomínio de areias quartzosas com níveis de minerais pesados, fragmentos de conchas e minerais micáceos. O grau de seleção costuma ser moderado, com granulometria fina a média e cores esbranquiçadas.

Nesses depósitos sedimentares litorâneos desenvolvem-se plataformas de abrasão sobre as quais se formam eventuais arenitos de praia (*beachrocks*), com ocorrência comum nas praias do Meireles e Sabiaguaba.

Figura 3. Mapa combinado de unidades geológicas e geoambientais. Fonte: Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) da Zona Costeira do Ceará (2006); IPECE (2021); CPRM (2020).

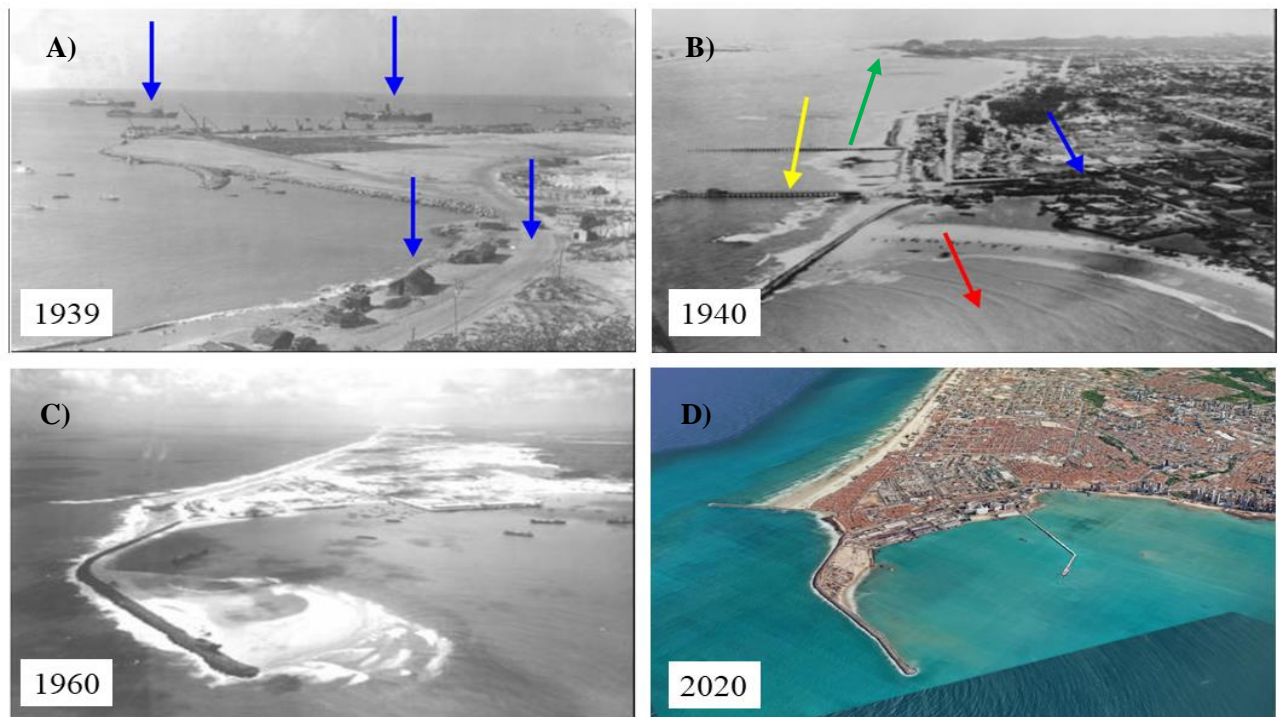


2.4 Morfodinâmica costeira e histórico de intervenções

De acordo com Maia (1998a) os processos mais relevantes para o equilíbrio e evolução da linha de costa de Fortaleza são o transporte longitudinal por ação das ondas e o transporte sedimentar eólico. Nesta região, os aspectos morfodinâmicos locais, bem como a interação das variáveis naturais atuantes, foram intensamente afetados pela intervenção humana, expressa na construção de portos, molhes, espigões, aterramentos e artificialização do litoral por questões urbanísticas (FECHINE, 2007; PAULA et al., 2015b).

Neste cenário, o Porto do Mucuripe, desde sua construção, configura-se como a mais importante obra de impacto geral na orla marítima de Fortaleza (Figura 4). Em decorrência de sua construção no Pontal do Mucuripe, sem a consideração detalhada dos aspectos hidrodinâmicos locais, o Porto impulsionou relevantes alterações no padrão de propagação de ondas e transporte de sedimentos (MORAIS, 1980, 1981; MAIA et al., 1996, 1998b; BEZERRA, 2007). A construção do molhe do porto interrompeu o processo natural de alimentação de praias com sedimentos no sentido Leste-Oeste, dando início a tendências erosivas em todo o litoral à sotamar da estrutura.

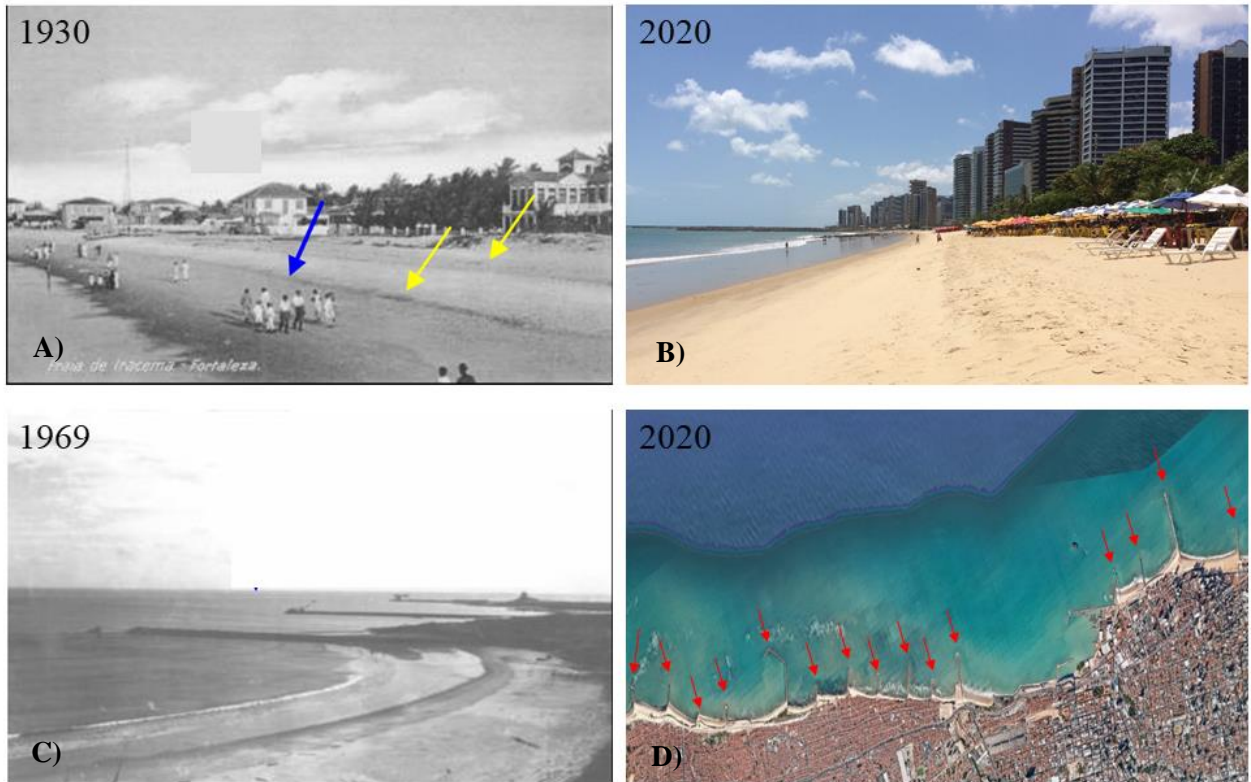
Figura 4. Breve histórico da construção do Porto do Mucuripe (1939 – 2020). A) Setas azuis indicam pontos de atracamento de embarcações, poucas residências e o aplainamento de dunas locais para a construção do Porto. B) Visão alternativa do litoral de Fortaleza; seta verde: Porto do Mucuripe; seta amarela: Ponte Metálica; seta azul: área urbanizada; seta vermelha: Poço da Draga. C) As modificações morfodinâmicas do litoral de Fortaleza tornam-se evidentes. D) Atual situação da costa. Fonte: Fechine (2007), modificado do Arquivo Nirez; o Autor.



Pelos registros históricos, apenas a porção mais próxima do promontório do Mucuripe recebia sedimentos eólicos trazidos do trecho a barlamar – os quais eram depositados diretamente na área interna da bacia do Porto (Figura 4A e C). Em resposta à sucessiva instalação de espigões e consequente retenção dos sedimentos em deriva, sempre produzindo erosão a jusante, o processo de intervenção antropogênica estendeu-se para além do limite oeste do litoral de Fortaleza,

transformando sua paisagem litorânea e de municípios adjacentes (Figura 5) (MAIA et al., 1998b; MOURA, 2012).

Figura 5. Comparação histórica das modificações urbanísticas. A) Praia de Iracema em 1930; seta azul indica concentração de banhistas e setas amarelas indicam as linhas de maré alta. B) Praia do Meireles em 2020 . Apesar de representarem trechos diferentes, observa-se clara diminuição da faixa de estirâncio e verticalização por estruturas imobiliárias. C) Instalação das primeiras obras de contenção da erosão. D) Setas vermelhas apontam todas as estruturas atualmente implantadas ao longo do litoral Leste/Oeste de Fortaleza. Fonte: Fachine (2007), modificado do Arquivo Nirez; o Autor.



De forma restrita ao sítio de monitoramento, o Espigão do Náutico (Figura 1) constitui a mais importante feição costeira artificial a ser considerada na dinâmica de incidência de ondas e acúmulo de sedimentos na área de estudo. Secundariamente, destaca-se a presença de galerias pluviais e áreas pontuais de afloramentos rochosos da Formação Barreiras. À barlamar do sítio de estudo, encontra-se o Riacho Maceió (Figura 1), cuja contribuição à sedimentação na plataforma interna está relacionada a uma granulometria fina (LIMA FILHO et al., 2019), com vazão estimada pela CAGECE (Companhia de Água e Esgoto do Ceará, 2010) em $0,02\text{m}^3/\text{s}$.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Monitoramento com uso de VANT

3.1.1 Levantamento aerofotogramétrico

Para a aquisição de aerofotografias foram utilizados alternadamente dois modelos de VANT's: o drone Phantom 4 (DJI Technology Co) (Figura 6), associado a uma câmera DJI FC330 com resolução de 4000 x 3000 pixels e distância focal de 3,61 mm, bem como o modelo Phantom 4 Advanced com câmera FC6310 de resolução 4864 x 3648 pixels e distância focal de 8,80 mm.

Figura 6. Veículo Aéreo Não-Tripulado – Phantom 4 (DJI Technology Co) sobre esteira de marcação de Pontos de Controle (à esquerda). Demonstração de uso do equipamento RTK Trimble R10 GNSS (à direita). Fonte: o Autor.



Um plano de voo foi previamente criado no software DroneDeploy v.2.7.6.0 através da inserção de informações relativas à altura de voo (135 m), sobreposição lateral e longitudinal (80%), velocidade de voo (11 m/s) e a inserção de *waypoints* que guiaram o levantamento sobre uma área de aproximadamente 48.700 m² (Figura).

A periodicidade associada às atividades de monitoramento deu-se em intervalos bimestrais no período de Abril/2018 a Março/2019, resultando em 7 missões de voos cujas especificações encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Nomenclatura, datas, altura de maré associada, número de imagens e número de amostras sedimentares coletadas em campo. Fonte: o Autor.

Campanhas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Data	17 de Abr/2018	18 de Mai/2018	27 de Jul/2018	26 de Set/2018	26 de Nov/2018	23 de Jan/2019	20 de Mar/2019
Maré (m)	0,1	0,1	0,4	0,3	0,4	0,1	0,0
N° de imagens	194	192	198	247	204	191	255
N° de amostras sedimentares	-	-	19	18	16	12	13

Imediatamente anterior ao sobrevoo, foi executada a etapa de determinação de Pontos de Controle (PC's) cuja exata localização geográfica foi obtida através do sistema de GPS Geodésico com Real Time Kinematic (RTK) com o uso do equipamento Trimble R10 GNSS (Figura 6). Os PC's foram demarcados, para sua posterior identificação no conjunto de imagens com esteiras pretas de dimensões 50 cm x 50 cm, pintadas com um "X" em cor branca (Figura 6). Após a aquisição *in situ*, os pontos foram ajustados à altura elipsoidal e horizontalmente corrigidos por triangulação com base nas informações das estações altimétricas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), localizadas na cidade de Eusébio (CEEU) e no Porto de Fortaleza (CEFT). Finalmente, no software MAPGEO 2015, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), foram feitas a verificação de altitude da ondulação geoidal e correção de dados geométricos para ortométricos.

3.1.2 Tratamento de imagens e geração de modelos 3D

O processamento digital das imagens foi feito no ambiente do software OpenDroneMap v.0.4, no qual 8 etapas foram aplicadas para a geração do produto final de Modelo Digital de Elevação (MDE).

A etapa preliminar de *Masking* envolveu a seleção de feições potencialmente geradoras de ruídos e sua deleção da base de referência para a composição das imagens. A seguir, o *Alinhamento* de câmeras foi feito em alta resolução, criando uma rede de pontos de referência denominados *tie*

points. A Geração de Nuvem de Pontos Primária seguinte resulta na criação de um conjunto de Mapas de Profundidade.

Com o intuito de retificar o modelo no Datum WGS84 – UTM Zone 24S, a *Inserção de Pontos de Controle* foi feita manualmente, passando em seguida por um processo de *Otimização* posicional. A reconstrução de alta resolução adquirida na etapa de *Geração de Nuvem Densa de Pontos* passou por um processo de seleção e deleção manual para elidir os ruídos mais acentuados provenientes da reflexão do espelho d'água na região do estirâncio. Posteriormente, a etapa de *Construção do MDE* pôde ser executada. A *Construção de Ortomosaico* foi feita de forma a garantir uma visualização adequada dos modelos em seus respectivos contextos ambientais. As análises visuais e quantitativas, bem como a composição e interpretação de mapas, foram efetuadas em ambiente GIS. Os parâmetros do processamento das imagens, assim como os erros atribuídos ao georreferenciamento e construção de DEM's encontram-se especificados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros decorrentes do processamento dos Modelos de Elevação. Erro horizontal em metros, pixels, erro vertical e número de pontos na Nuvem de Pontos e Nuvem de Pontos Densa. Fonte: o Autor.

	Erro (m)	Erro (pix)	Erro em Z (m)	Nuvem de Pontos	Nuvem de Pontos Densa
C1	0,04336	0,630	0,00925	182.163	12.316.715
C2	0,04339	0,418	0,00561	151.077	9.332.570
C3	0,04109	0,279	0,01959	164.346	9.268.878
C4	0,03912	0,339	0,01015	163.866	8.968.106
C5	0,03076	0,429	0,00135	175.462	9.191.002
C6	0,04303	0,393	0,00362	178.326	9.895.739
C7	0,03532	0,270	0,00745	292.439	21.977.715
Valor Médio	0,03943	0,394	0,00814	186.911	11.564.389

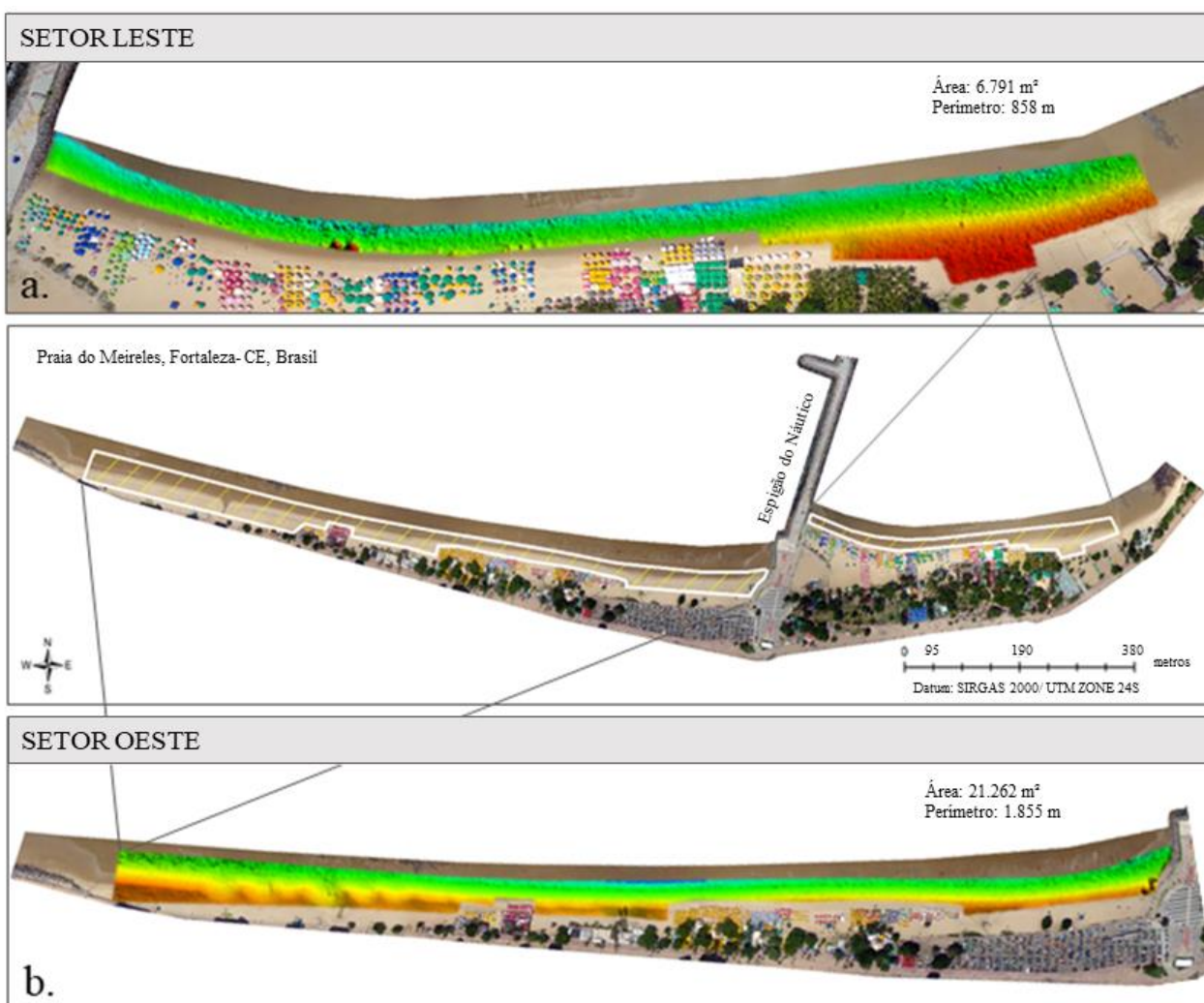
3.1.3 Análise comparativa

Visando a obtenção de uma base equitativa para a análise dos dados obtidos pela modelagem, foram estabelecidos polígonos padronizados – com proporções de área e perímetro que permitissem a comparação entre os modelos independente de suas limitações quanto à reflectância da zona de estirâncio. Além disso, foi feita a divisão da área entre os macro setores Leste e Oeste, considerando como referência o Espigão rochoso que os separa, de forma a possibilitar a visualização mais detalhada de áreas sob condições morfodinâmicas particulares (Figura 7). O polígono padrão para

o setor Leste possui área de 6.791 m² e perímetro de 858 m, enquanto ao setor Oeste possui área de 21.265 m² e perímetro de 1.855 m.

A comparação quantitativa entre os modelos envolveu os parâmetros de Volume Above Custom Level (V_{ACL}) – que oferece o volume em m³ sobre um valor de altimetria de melhor aplicação – e Mean Level (ML) – que descreve o nível altimétrico médio para a área delimitada.

Figura 7. Representação dos polígonos relativos aos setores Leste (a) e Oeste (b), com especificações de área e perímetro. Fonte: o Autor.



3.2 Caracterização sedimentológica

No decorrer das missões de levantamento aerofotogramétrico, a coleta de amostras de sedimentos foi feita com base nas mudanças topográficas e texturais identificadas visualmente ao longo da faixa de praia entre os setores de estirâncio inferior, estirâncio superior e pós-praia. Em média 18 coletas foram feitas por missão de voo no período de Julho/2018 a Março/2019, totalizando 78 pontos de amostragem.

A análise granulométrica foi feita segundo a rotina descrita por Suguio (1973), utilizando como parâmetro a Escala Sedimentar de Wentworth (1922). As amostras passaram pelos processos de: a) secagem em estufa, b) quartejamento, c) pesagem de 100g representativos, d) peneiramento úmido, e) segunda secagem e f) peneiramento mecânico com auxílio de um RoTap (Figura 8). A caracterização faciológica, dimensional e quanto ao grau de seleção foi feita sob a Classificação de Folk & Ward, com uso do software ANASED 5.0.

Figura 8. Demonstração do processo de análise granulométrica, com quartejamento (à esquerda acima), pesagem (à esquerda abaixo), peneiramento úmido (ao centro) e peneiramento mecânico (à direita). Fonte: o Autor.



3.3 Fatores meteorológicos e oceanográficos

Os dados oceanográficos (altura, período e direção predominante de ondas), foram majoritariamente obtidos pela aplicação do Modelo WaveWatch III (WW3). Informações da Boia Fortaleza (Programa Nacional de Boias - PNBOIA) e Avisos Oficiais da Marinha do Brasil sobre eventos de alta energia também foram utilizados de forma complementar. Registros maregráficos foram adquiridos pela plataforma Diretoria de Hidrografia e Navegação (DNH).

Associado à caracterização de chegadas dispersivas, o acompanhamento dos sistemas ciclônicos extratropicais do HN foi feito através do Global Forecast System (GFS). Dados meteorológicos, como taxa de precipitação diária, velocidade e direção de ventos, foram obtidos por sensores *in situ* da Estação Meteorológica de Fortaleza, sob monitoramento do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

A análise do conjunto de variáveis ambientais foi feita por classificação média mensal para o período de monitoramento. Na descrição de ondas, recorreu-se à classificação de Fisch (2008) para a identificação de Chegadas Dispersivas do HN. A tipologia de ondas foi feita majoritariamente com base no período, se fosse este abaixo (ondas *sea*) ou acima (ondas *swell*) de 10 segundos.

A taxa de correlação entre os parâmetros ambientais monitorados e a variação volumétrica/topográfica foi estabelecida pela aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson (ρ) (Equação 1). A interpretação de ρ deu-se com base na regra definida em Hinkle (2003), segundo a qual valores de: *a*) 0,90 a 1,0, correlação muito forte; *b*) 0,70 a 0,90 correlação forte; *c*) 0,50 a 0,70, correlação moderada; *d*) 0,30 a 0,50, correlação fraca; *e*) 0,0 a 0,30, correlação desprezível.

Equação 1. Definição do Coeficiente de Correlação de Pearson.

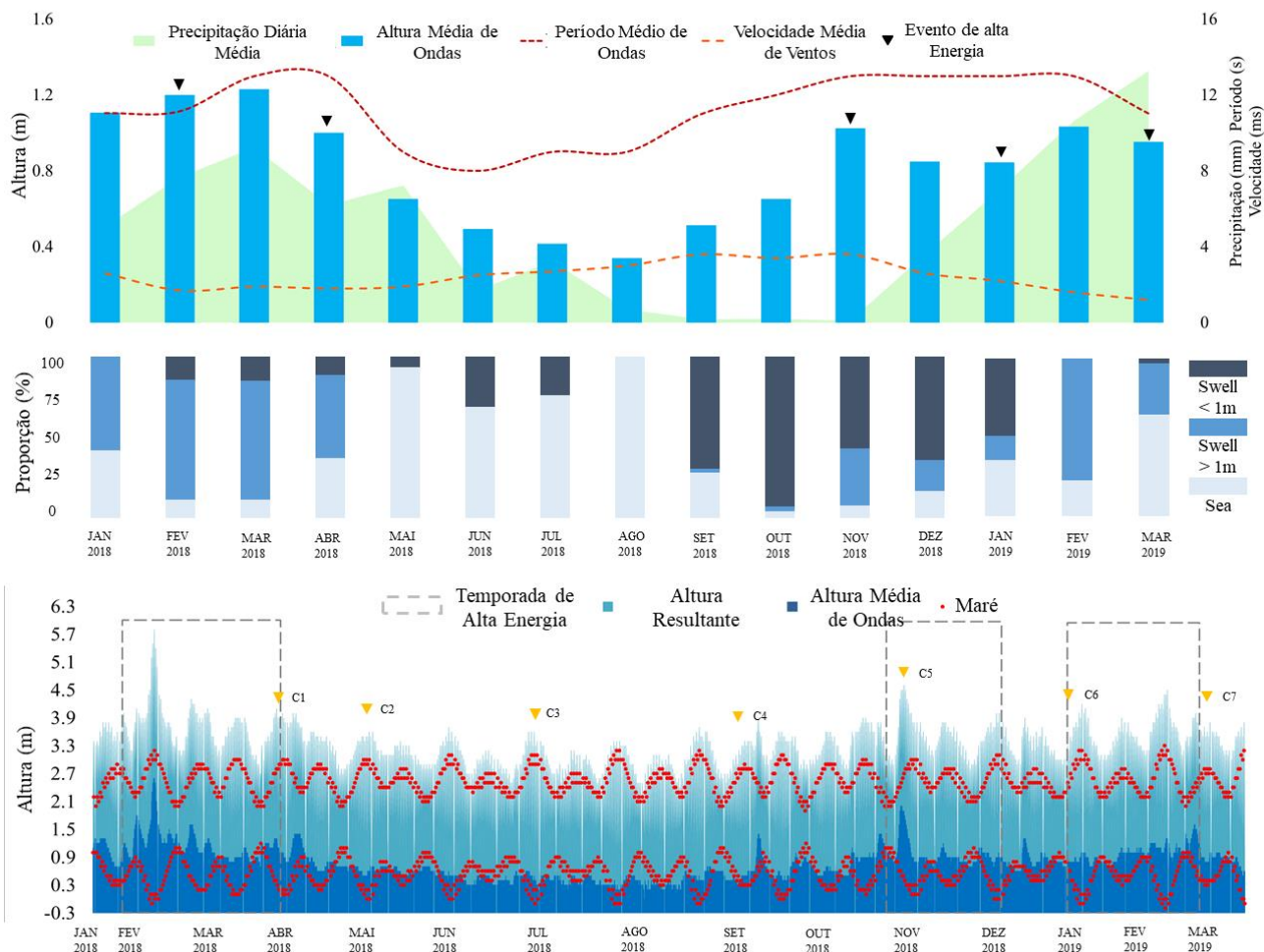
$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X) \cdot var(Y)}}$$

4 RESULTADOS

4.1 Regime de Ondas

A análise do regime de ondas local revelou clara distinção em termos de altura significativa (H_s) e proporção de tipos de ondas (Figura 9). O período de menores alturas (0,3 – 0,7 m) distribuíram-se entre os meses de Junho a Outubro (2017) e Maio a Outubro (2018). Neste cenário, a presença de ondas *sea* começa a manifestar-se significativamente em Junho/2017 e em Maio/2018, atingindo predominância (56 – 100%) de forma comum aos dois anos nos meses de Julho e Agosto.

Figura 9. Caracterização mensal de variáveis ambientais e proporções de tipos de ondas (acima). Distribuição de marés, altura significativa (H_s) e altura resultante (H_r) de ondas para o período monitorado, com delimitação de temporadas de alta energia e campanhas de monitoramento (abaixo).



As maiores alturas de ondas (0,9 - 1,2 m) foram registradas, de forma geral, no período de Dezembro a Abril – com exceção do ano de 2018, no qual uma elevação distinta da Hs média do mês de Novembro ocorreu concomitantemente à segunda temporada de alta energia registrada (Figura 9). Neste período, ocorreu entre os meses de Fevereiro – Abril a predominância de ondas do tipo *swell* com Hs > 1 m (proporção de até 77%).

4.2 Formação de Ciclones Extratropicais e ocorrência de Eventos de Ressaca

Durante o período de monitoramento, foram acompanhadas três temporadas de eventos de alta energia (Tabela 3). Estes eventos tiveram duração média de 8 dias, concentrados ao longo dos meses de Janeiro a Abril, tanto de 2018 quanto 2019 – com exceção da Temporada 2, que ocorreu em Novembro/2018. O tempo médio de resposta entre os ápices das tempestades (pressão atmosférica mínima registrada) e a chegada das primeiras ondas *swell* foi de aproximadamente 4 dias.

Os eventos de maiores intensidades tiveram entre 4,5 e 5,8 m de altura resultante máxima (Hr), que corresponde ao somatório da altura significativa de ondas e da maré atuante. A linha de costa foi também acometida, em Novembro/2018, por um evento de ressaca de menor intensidade com Hr máxima de 4,5 m e duração média de 4 dias. Em todos os casos, as ressacas foram precedidas pelo desenvolvimento de múltiplos sistemas de baixa pressão atmosférica (ciclones extratropicais), com duração média de 6 dias, entre as latitudes 40°N e 70°N.

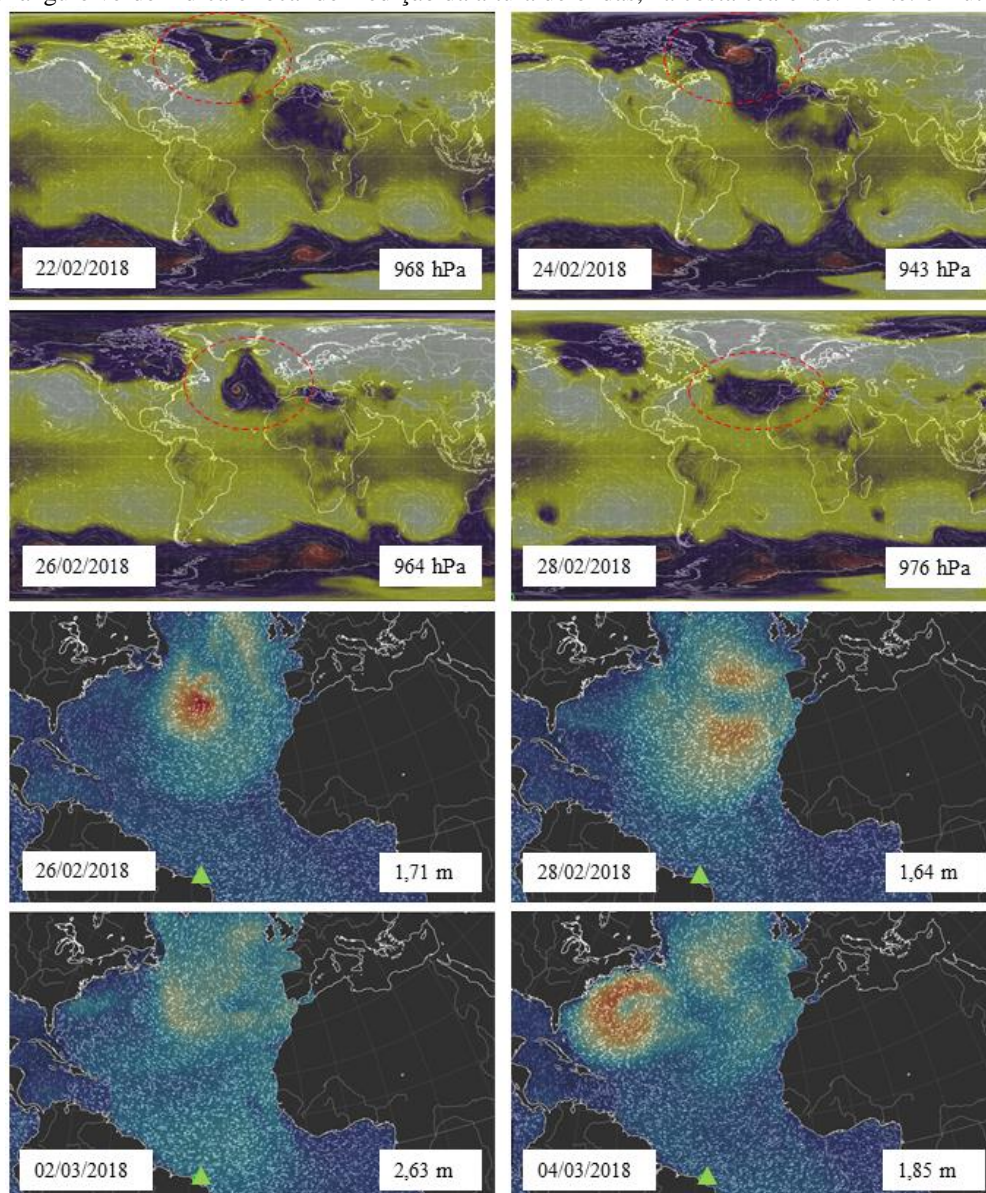
Tabela 3. Temporadas e eventos de alta energia identificados no período de monitoramento com especificação de datas, duração, pressão mínima registrada, altura significativa de ondas máxima e tempo de resposta. Fonte: o Autor.

	Datas	Duração (dias)	Pressão mínima (hPa)	H _{Smax} (m)	Tempo de resposta (dias)
Temporada 1 (Fev – Abr/2018)	21-28 Fev/2018	7	943	2.63	4
	14-18 Abr/2018	4	951	1.78	3
Temporada 2 (Nov/2018)	13-17 Nov/2018	5	953	2.32	3
Temporada 3 (Fev/2019)	03-10 Fev/2019	7	960	1.75	4
	20-26 Fev/2019	6	937	1.54	4

4.2.1 Evento 1

O primeiro registro de ressaca do mar deu-se no intervalo referente à Campanha 1, em Fevereiro/2018. Anterior à intensificação das ondas no litoral de Fortaleza houve a formação de um sistema ciclônico, com pressão atmosférica mínima de 943 hPa no dia 24/Fev (Figura 10). A altura significativa de ondas apresentou aumento a partir do dia 26/Fev, chegando ao seu ápice no dia 02/Março, com 2,63 m. Somada à maré de 3 m, foi estimada uma altura resultante de 5,63 m.

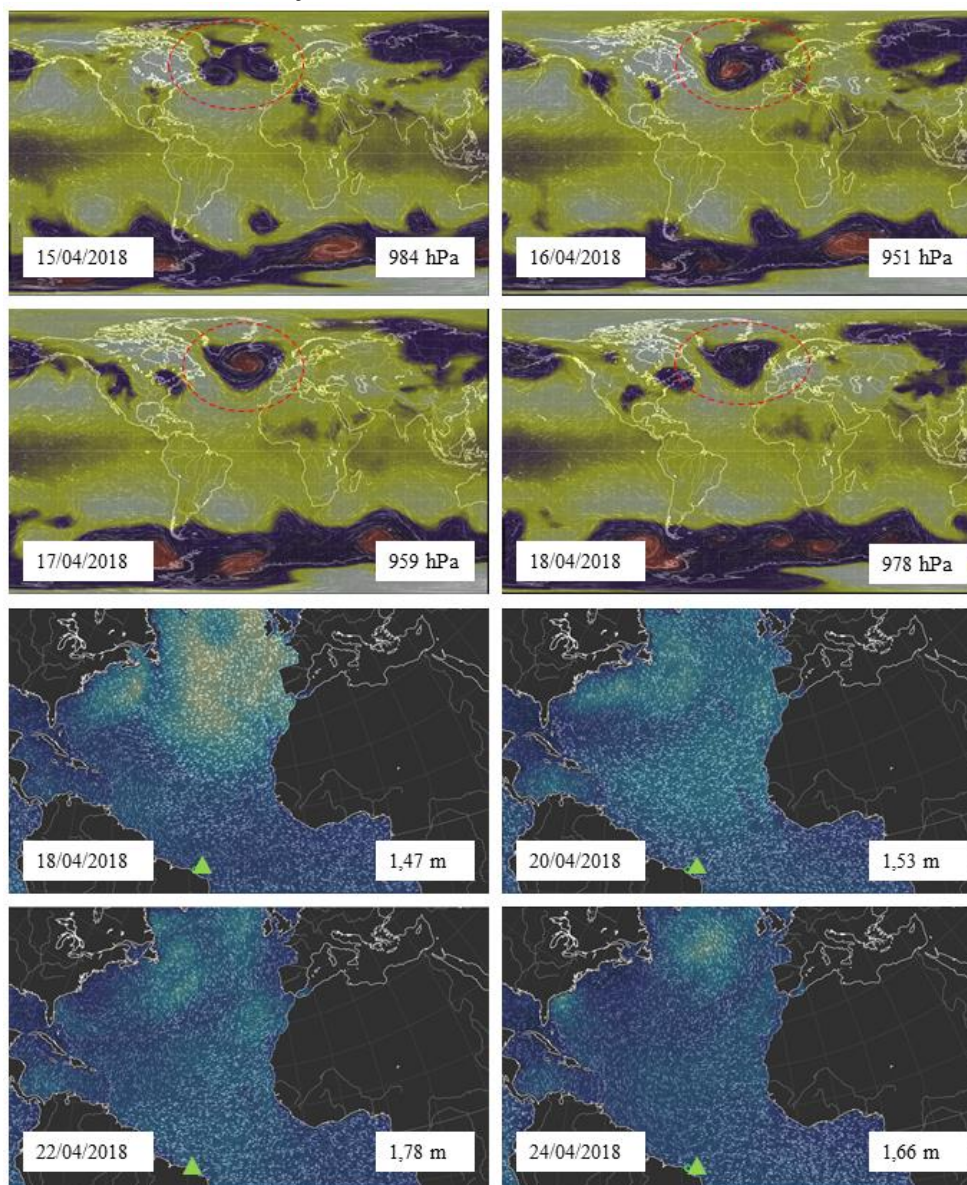
Figura 10. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no primeiro evento de ressaca (Evento 1). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.



4.2.2 Evento 2

O segundo evento de ressaca, menos intenso que o anterior, ocorreu no mês de Abril/2018 (Campanha 2), em resposta à formação de um sistema atmosférico de pressão mínima de 951 hPa, no dia 16/Abr. Os valores de Hs apresentaram aumento a partir do dia 20/Abr, chegando ao máximo de 1,78 m dois dias depois. Somada à maré de menor altura (2,3 m), o valor de Hr foi 4,08 m (Figura 11).

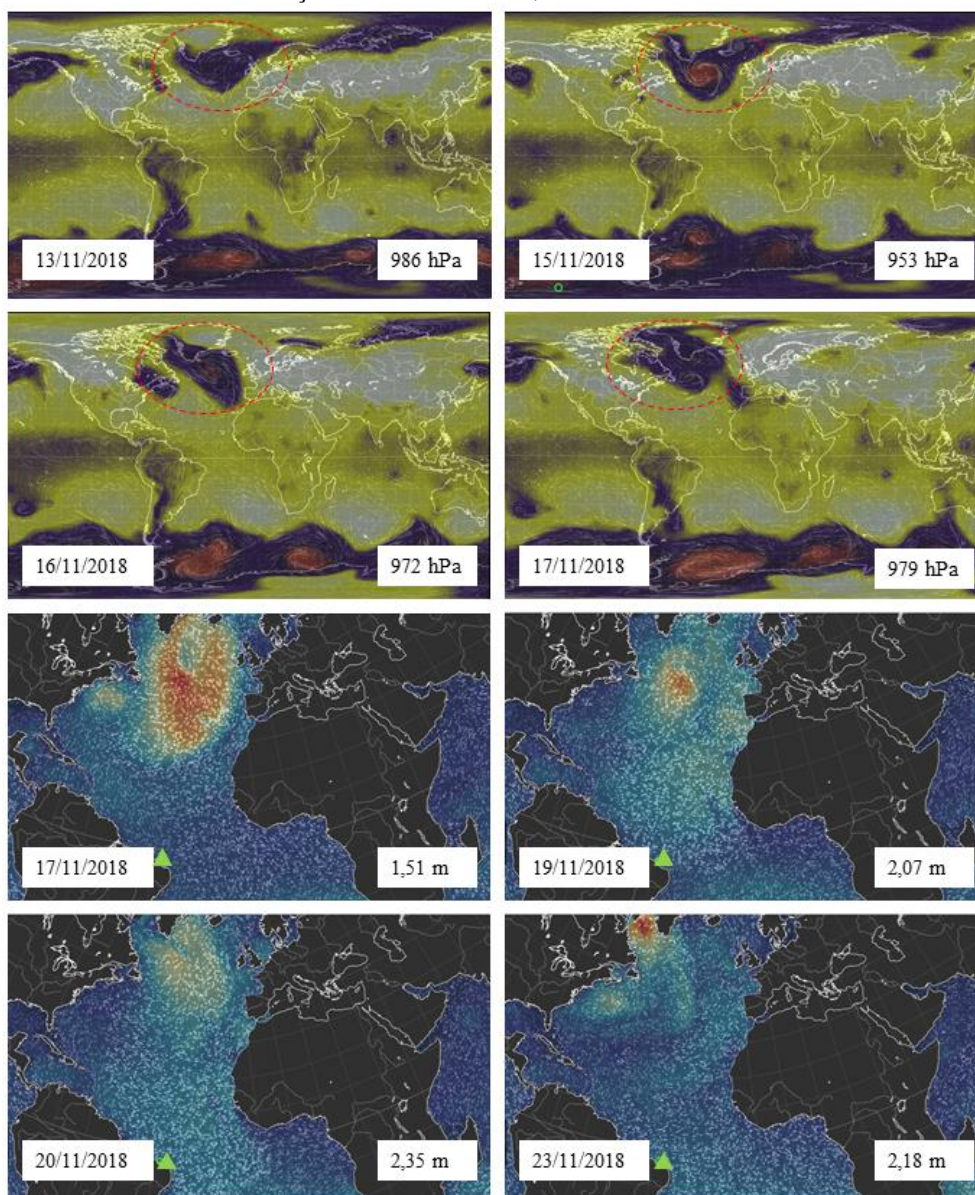
Figura 11. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no segundo evento de ressaca (Evento 2). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.



4.2.3 Evento 3

Em Novembro/2018 (Campanha 5) ocorreu o terceiro evento, atribuído à maior perda sedimentar relativa (Figura 12). O sistema atmosférico associado teve mínimo de pressão no dia 15/Nov (953 hPa), culminando em um aumento de Hs a partir do dia 19/Nov que atinge seu máximo no dia seguinte, com 2,35 m. A associação à maré (2,5 m) resultou em Hr de 4,85 m.

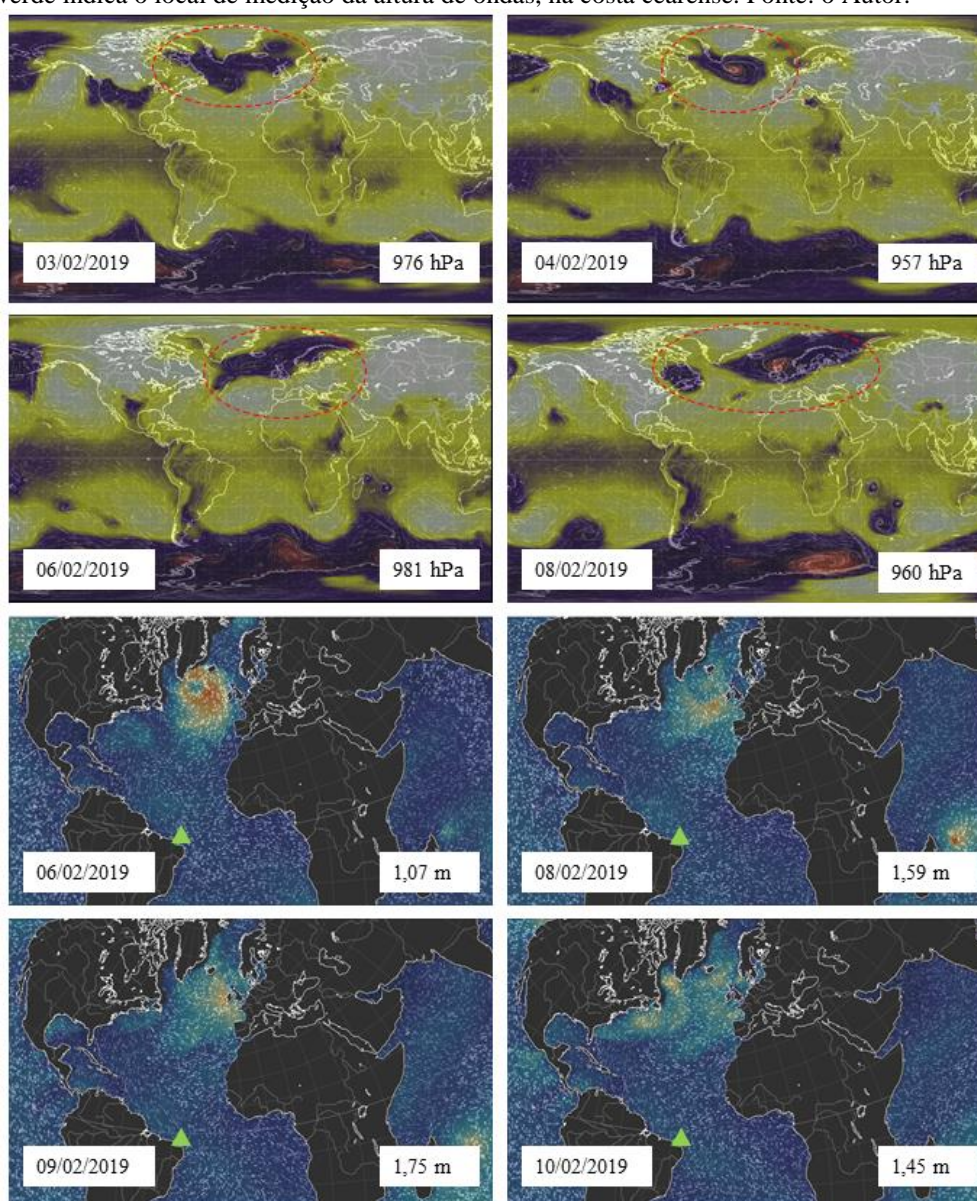
Figura 12. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no terceiro evento de ressaca (Evento 3). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.



4.2.4 Evento 4

O quarto evento de ressaca, em Fevereiro/2019 (Campanha 7), caracterizado pela formação de múltiplos sistemas atmosféricos de menor intensidade, teve seu mínimo de pressão no dia 04/Fev (957 hPa) (Figura 13). O máximo de Hs ocorreu no dia 09/Fev, registrando 1,75 m – em associação com a maré atuante, de 2,5 m, a altura resultante foi de 4,25 m.

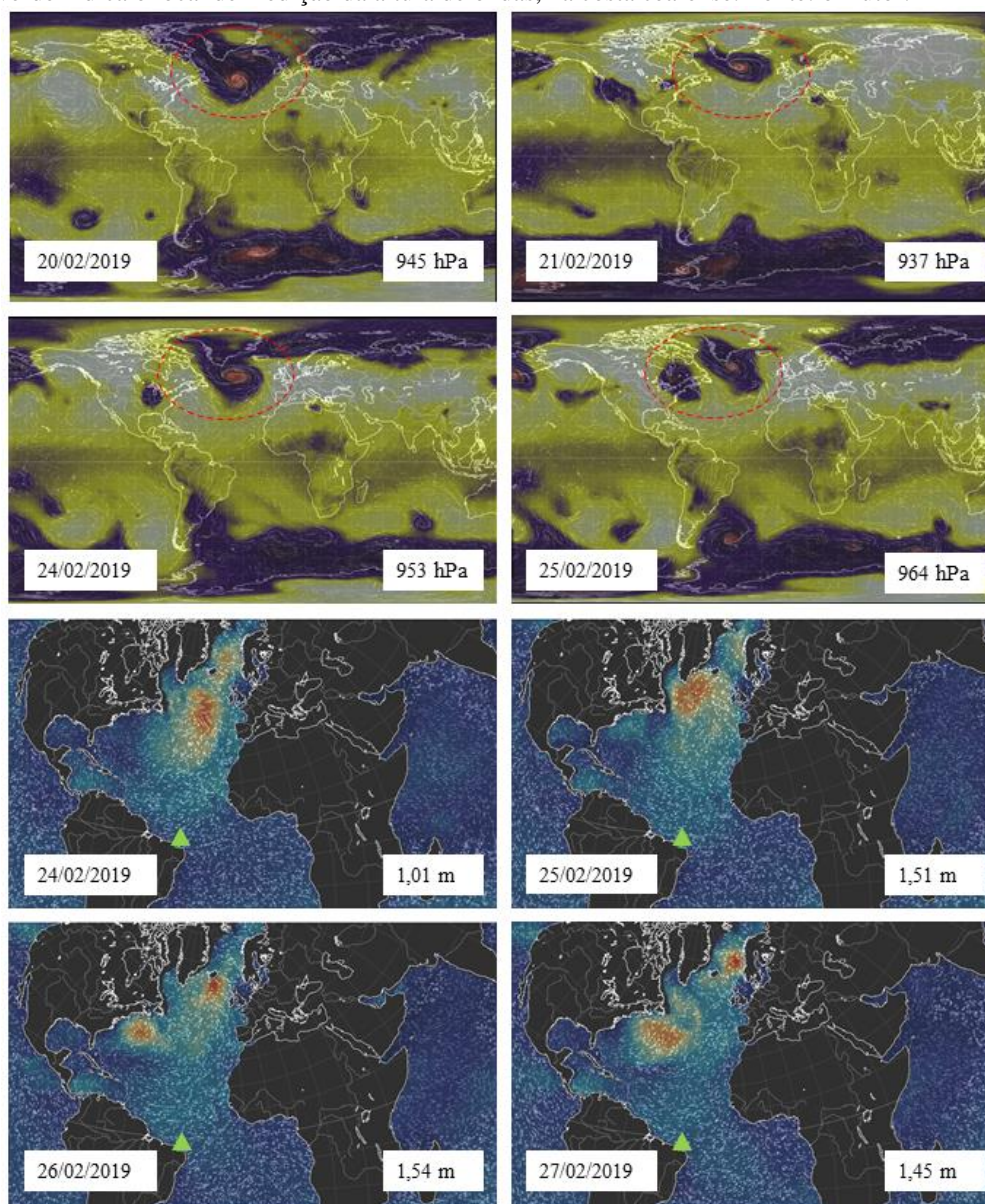
Figura 13. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no quarto evento de ressaca (Evento 4). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.



4.2.5 Evento 5

O último evento de alta energia, de menor intensidade registrada, ocorreu no final do mesmo mês, Fevereiro/2018, ainda no intervalo de monitoramento da Campanha 7 (Figura 14). O sistema atmosférico do HN teve mínimo de 937 hPa no dia 21/Fev, o que refletiu em um aumento das ondas na costa cearense a partir do dia 25/Fev, chegando ao máximo no dia seguinte (1,54 m). Somada à maré de 2,3 m, a altura resultante foi de apenas 3,84 m.

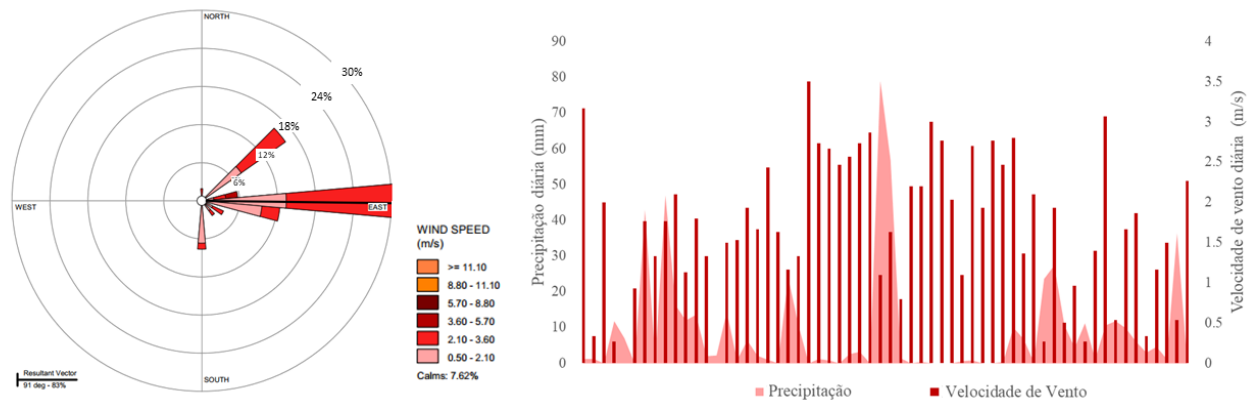
Figura 14. Desenvolvimento do sistema atmosférico no Hemisfério Norte (acima) e propagação de ondas (abaixo) que culminaram no quinto evento de ressaca (Evento 5). O círculo vermelho pontilhado indica o sistema de baixa pressão; o triângulo verde indica o local de medição da altura de ondas, na costa cearense. Fonte: o Autor.



4.3 Demais variáveis meteorológicas

O intervalo de monitoramento de variáveis meteorológicas que antecedeu à Campanha 1 (C1) teve duração de Fevereiro a Abril/2018 e está representado na Figura 15. A velocidade média de ventos foi de 1,7 m/s, com máximos de 3,6 m/s e mínimos de 0,5 m/s. O quadrante preferencial de direção de ventos (83%) foi atribuído a cerca de 91° (Leste). A precipitação diária atingiu uma média de 9,1 mm, com máximos de 80 mm e distribuição desuniforme ao longo do período.

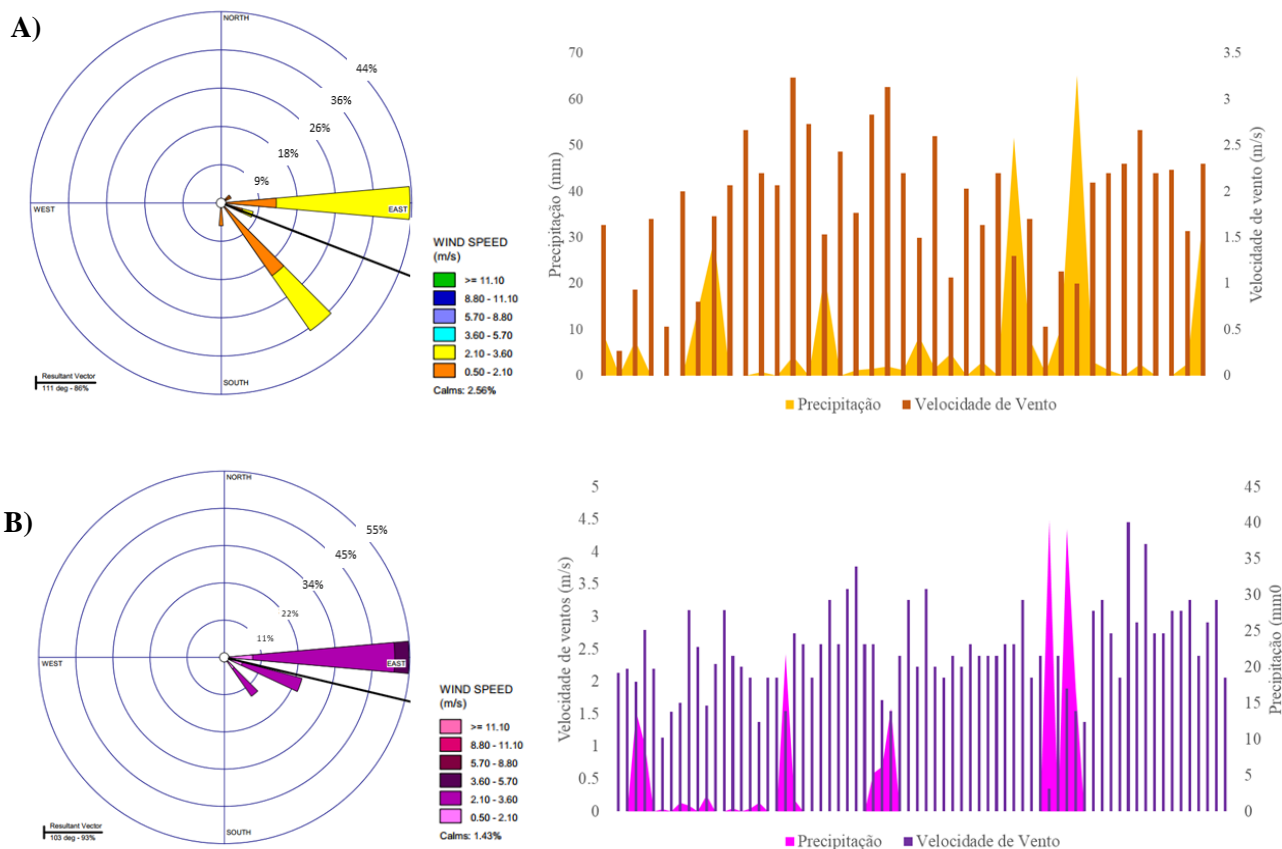
Figura 15. Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da primeira campanha (C1) Fonte: o Autor.



No intervalo correspondente à Campanha 2 (C2), entre Abril e Maio/2018, o valor médio de velocidade de ventos apresentou sensível aumento (1,9 m/s), sem variação significativa entre máximos e mínimos. A direção preferencial de ventos permaneceu Leste (111°) (Figura 16A). Em contrapartida, o valor de precipitação decresceu (6,6 mm/dia), com máxima de 65 mm – em decorrência da menor duração do intervalo de monitoramento.

Entre Maio e Julho/2018 foi compreendido o intervalo da Campanha 3 (C3). A partir de então foi possível perceber mais nitidamente a transição entre as condições meteorológicas do primeiro e segundo semestre (Figura 16B). A velocidade média de ventos foi de 2,5 m/s, atingindo valor máximo de 4,5 m/s, com direção predominante no quadrante Leste (103°). A precipitação diária teve média de 2,5mm, com máximo de apenas 40 mm e distribuição esparsa.

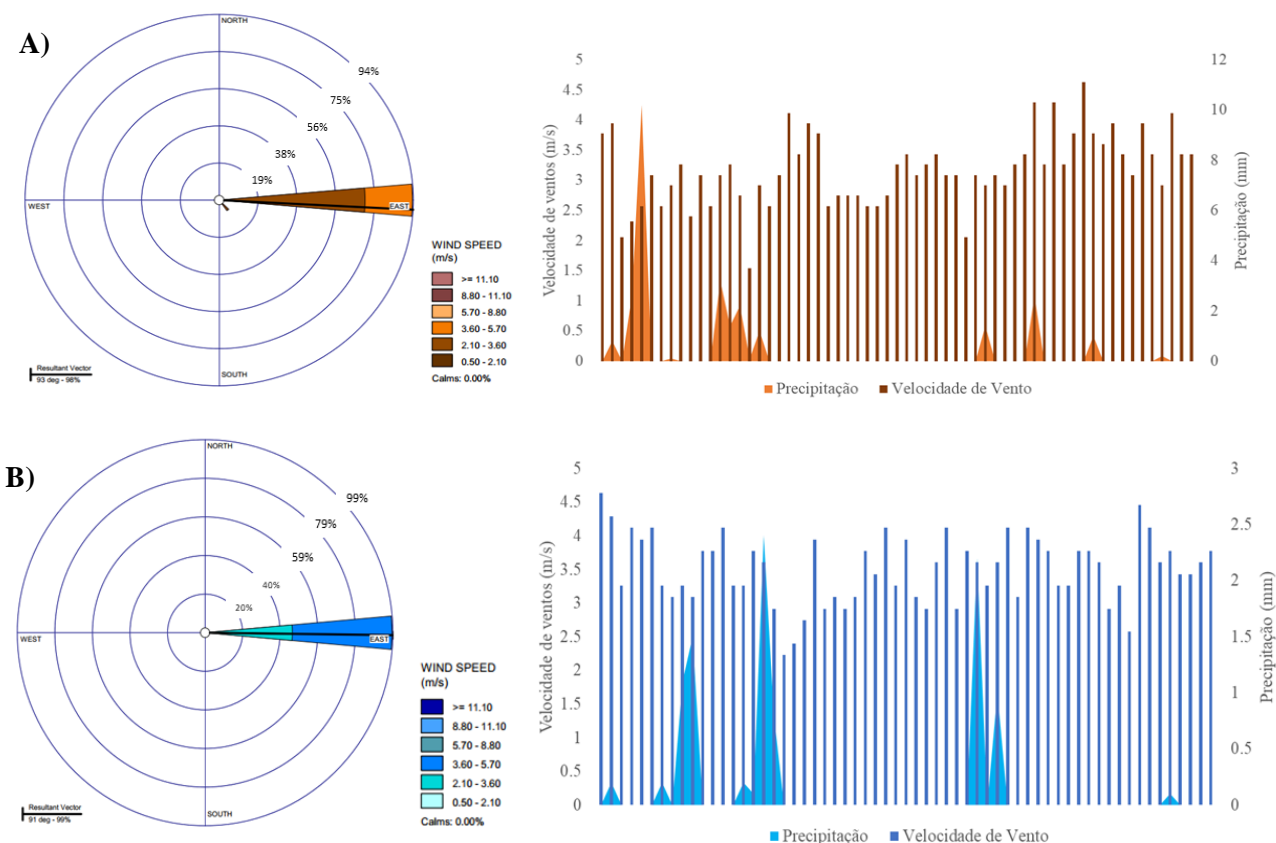
Figura 16. A) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da segunda campanha (C2). B) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da terceira campanha (C3). Fonte: o Autor.



De Julho a Setembro/2018 ocorreu o monitoramento atribuído à Campanha 4 (C4), na qual as condições características do segundo semestre – baixa precipitação e maior intensidade de ventos – tornaram-se nítidas (Figura 17A). A velocidade média de ventos atingiu 3,2 m/s, vindo preferencialmente do quadrante Leste (93°) e atingindo valor máximo de 4,8 m/s. A precipitação teve média de 0,4 mm, com máximo de apenas 10 mm.

No período anterior à Campanha 5 (C5), de Setembro a Novembro/2018, as condições meteorológicas mantiveram-se constantes (Figura 17B). Foi registrada velocidade média de ventos de 3,5 m/s (máximo de 4,7 m/s) e direção predominante de Leste (91°). A precipitação diária teve sensível diminuição no valor médio (0,2mm), com máximo de apenas 2,5 mm.

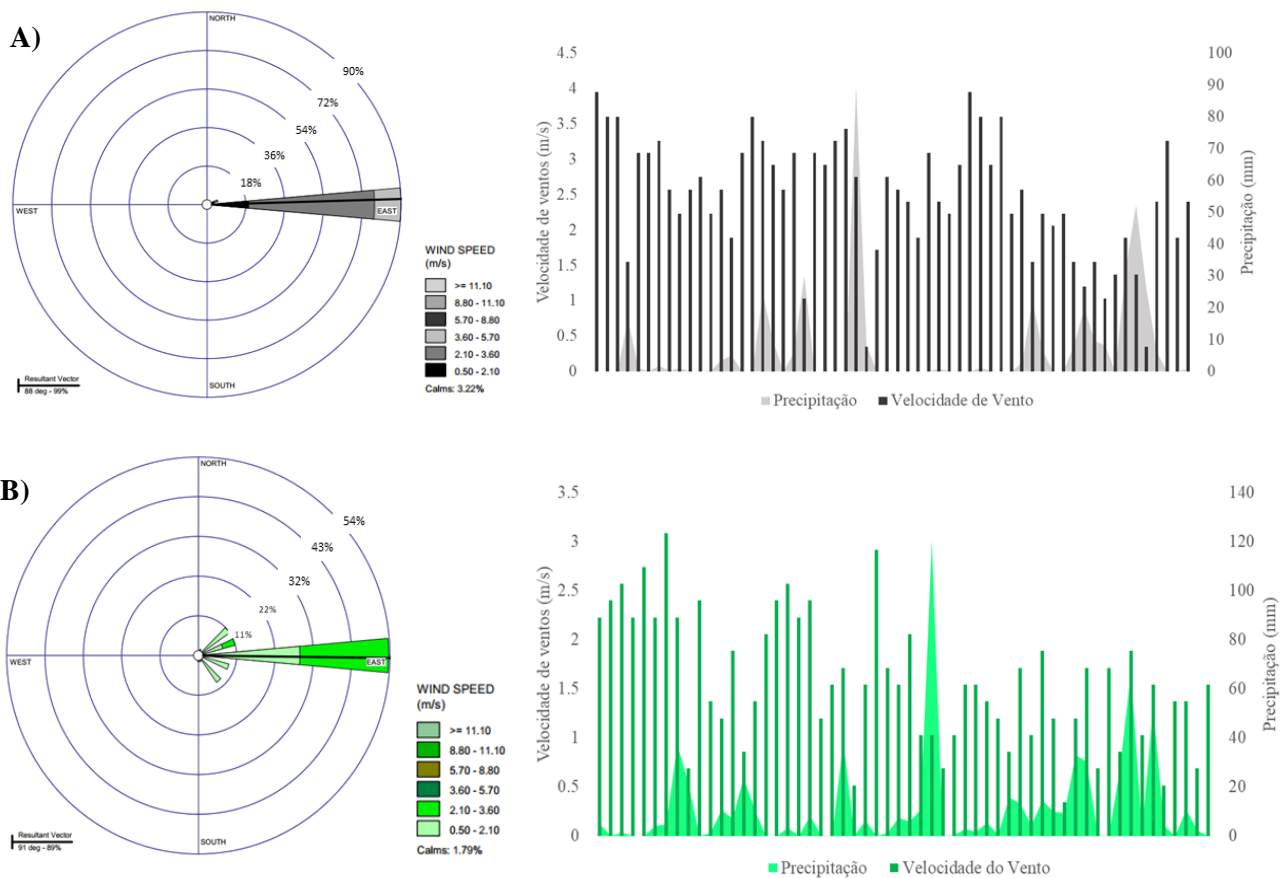
Figura 17. A) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da quarta campanha (C4). B) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da quinta campanha (C5). Fonte: o Autor.



O monitoramento da Campanha 6 (C6), de Novembro/2018 a Janeiro/2019, já apresenta variações significativas que indicam a transição para as condições meteorológicas do primeiro semestre (Figura 18A). Houve diminuição significativa da velocidade média de ventos (2,5 m/s) e mudança na direção preferencial (88° - Leste-Nordeste), com valor máximo de 4 m/s. A precipitação diária média aumentou para 6,8 mm (máximo de 90mm).

Na Campanha 7 (C7), com intervalo de Janeiro a Março/2019, as condições do primeiro semestre estão nitidamente consolidadas (Figura 18B). A precipitação média de 11,4 mm atingiu máximo de 105 mm, com distribuição menos esparsa. A velocidade média de ventos atingiu apenas 1,6 m/s, com máximo de 3,1 m/s e direção predominante Leste (91°).

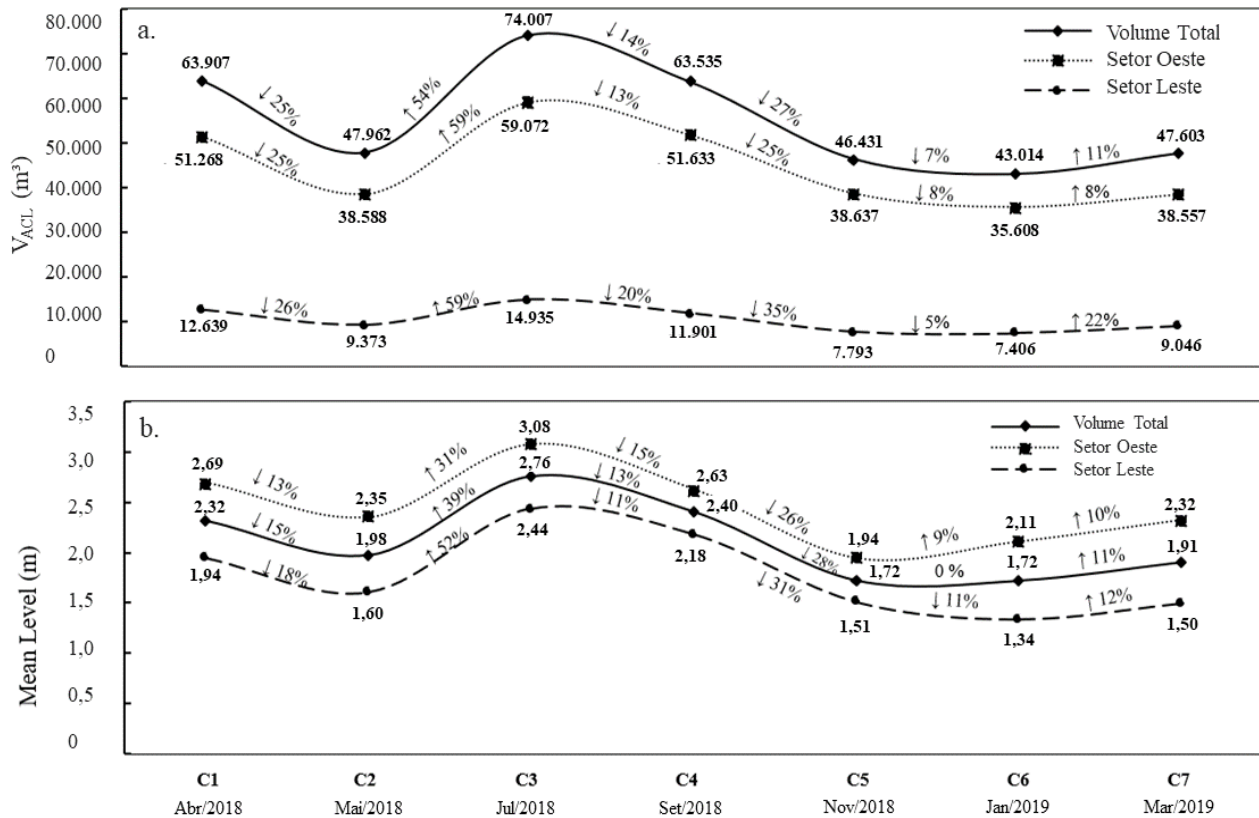
Figura 18. A) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da sexta campanha (C6). B) Rosa de distribuição de ventos (à esquerda) e registro de precipitação e velocidade de vento diárias (à direita) para o intervalo de monitoramento da sétima campanha (C7). Fonte: o Autor.



4.4 Volume Sedimentar

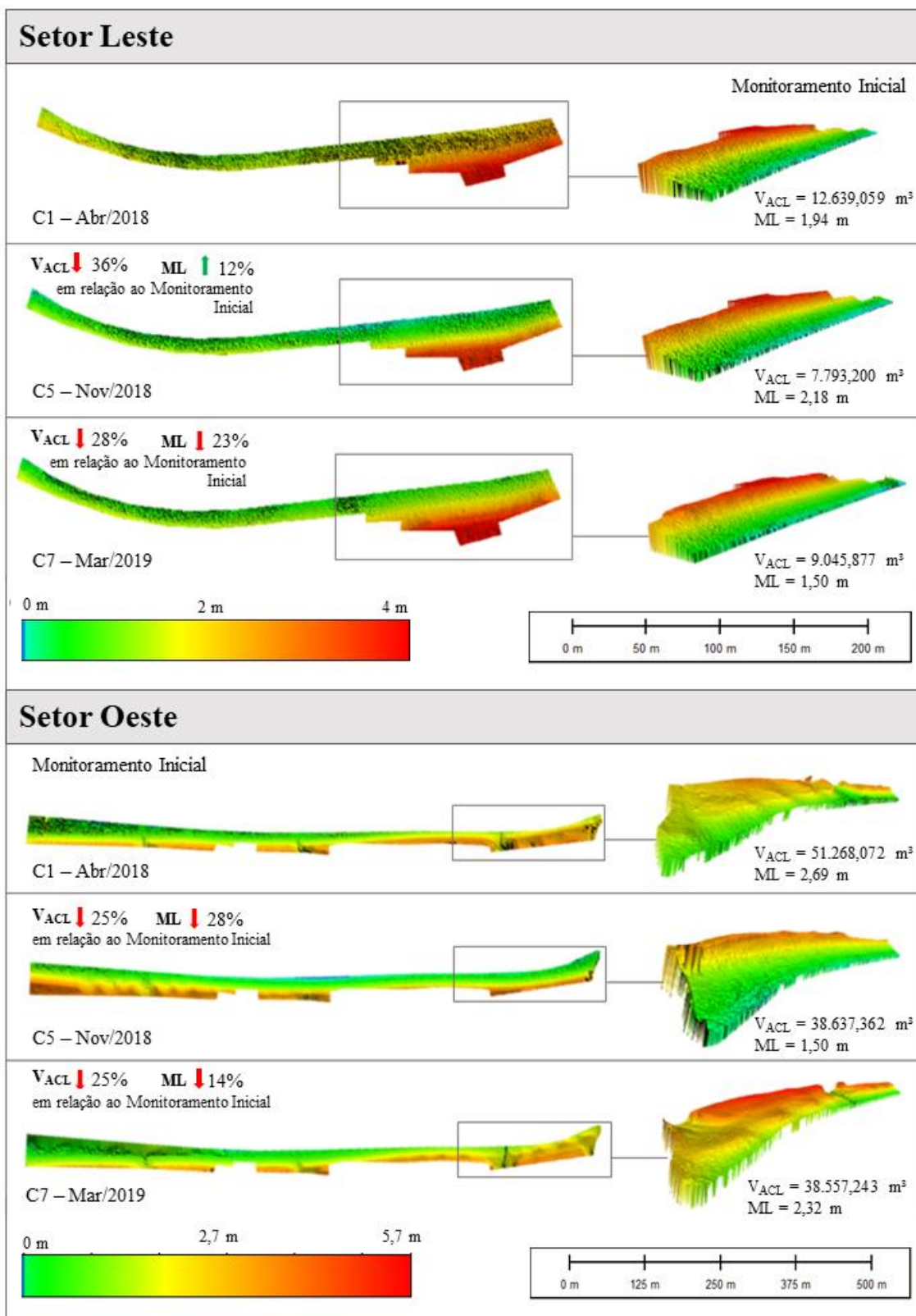
O volume total da área sofreu variações como seguem ilustradas nas Figuras 19 e 20. O volume inicial, que em Abril/2018 contabilizava 63.907 m³ e nível médio de 2,3 m, sofreu uma diminuição de 25%, resultando em 47.961 m³ (ML = 2 m) no mês de Maio/2018. No final de Julho/2018, um aumento de 54,3% associa-se ao maior volume registrado, de 74.006 m³ (ML = 2.8 m). Este valor decresce em 14,2% até o fim de Setembro/2018, registrando 63.534 m³ com ML = 2,4 m. Este valor decresce em 14,2% até o fim de Setembro/2018, registrando 63.534 m³ com ML = 2,4 m.

Figura 19. Curvas de volume sedimentar (a) e nível médio (b) total da área e por setores Leste/Oeste, com identificação das porcentagens de perda e ganho sedimentar e de nível topográfico. Fonte: o Autor.



A seguir, os valores mínimos registrados, de 46.430 m³ (-27%, ML = 1,7 m) em Novembro/2018 e 43.014 m³ em Janeiro/2019 (-7,4%, ML = 1,7 m), foram sucedidos por uma sutil recuperação, em Março/2019, de 10,7% (47.602 m³, ML = 1,9 m). O saldo final revela uma perda de 16.305 m³ (-25,5%) em termos de volume e de 0,4 m (-17,4%) em nível médio entre o primeiro e o último levantamento.

Figura 20. Modelos Digitais de Elevação (DEMs) dos setores Leste (acima) e Oeste (abaixo) nas campanhas C1 (Abr/18), C5 (Nov/18) e C7 (Mar/19), com V_{ACL} e ML associados e respectiva taxa variação em relação ao monitoramento inicial. Fonte: o Autor.



As taxas de variação dos setores Leste e Oeste foram similares à tendência de variação volumétrica geral (Figuras 19 e 20). No entanto, o setor Leste ($\Delta V_{ACL \text{ máx}} = + 59,3\%$ e $\Delta V_{ACL \text{ mín}} = - 34,5\%$) apresentou uma tendência de intensificação das variações volumétricas em relação ao setor Oeste ($\Delta V_{ACL \text{ máx}} = + 53,1\%$ e $\Delta V_{ACL \text{ mín}} = - 25,2\%$).

Apesar das mudanças volumétricas mais significativas terem ocorrido no Setor Leste, as mudanças topográficas no perfil praiado foram mais evidentes no Setor Oeste (Figura 21). Por exemplo, em resposta aos eventos de ressaca de Novembro/2018, uma escarpa proeminente foi formada, mobilizando sedimentos para a porção superior da praia. Em contrapartida, no Setor Leste, esta variação volumétrica ocorreu de forma que as variações morfológicas do perfil em função da movimentação sedimentar são praticamente imperceptíveis.

Figura 21. Mudanças no perfil praiado do setor Oeste, o mais representativo visualmente em relação às variações topográficas. Evidencia-se a formação de uma escarpa bem delimitada em Novembro/18, logo após a ocorrência de um evento de ressaca. Fonte: o Autor.



4.5 Granulometria

A análise de 78 pontos de coleta revelou uma composição faciológica com sensíveis variações entre Areias Litoclásticas Médias e Finas, em maioria bem selecionadas (Tabela 4). No setor de pós-praia, durante todo o período monitorado, houve a predominância de Areia Média em proporções de 57 – 89%. A faixa de estirâncio, em contrapartida, experimentou variações mais expressivas entre Areia Fina (14 – 75%) e Areia Média (25 – 86%), especialmente no período de transição entre Setembro – Novembro/2018.

O parâmetro de Curtose (KG) para ambos os setores foi predominantemente Mesocúrtico, com manifestação pontual de padrões Platicúrticos nos levantamentos C4 e C7, para a zona de estirâncio e pós-praia, respectivamente. Quanto à Assimetria (Ski), houve a predominância de curvas Aproximadamente Simétricas em toda a faixa de praia, para todo o período monitorado.

Tabela 4. Distribuição percentual das classificações de parâmetros granulométricos nos setores de estirâncio (EST) e pós-praia (PP). Fonte: o Autor.

		C3		C4		C5		C6		C7	
		EST	PP	EST	PP	EST	PP	EST	PP	EST	PP
Folk&Ward	Areia Média	33%	57%	25%	83%	86%	89%	67%	83%	50%	67%
	Areia Fina	67%	43%	75%	17%	14%	11%	33%	17%	50%	33%
Grau de Seleção	Bem selecionado	92%	86%	92%	83%	57%	56%	100%	50%	88%	100%
	Seleção moderada	8%	14%	8%	17%	43%	44%	-	50%	13%	-
Assimetria (Ski)	Aprox. simétrica	67%	43%	42%	33%	86%	89%	100%	83%	86%	50%
	Assimetria positiva	33%	29%	16%	33%	-	-	-	-	14%	50%
	Assimetria negativa	-	29%	42%	33%	14%	11%	-	17%	-	-
Curtose (KG)	Mesocúrtica	33%	57%	25%	50%	86%	78%	50%	50%	57%	17%
	Platicúrtica	33%	29%	42%	33%	14%	11%	17%	33%	29%	66%
	Leptocúrtica	25%	-	33%	17%	-	11%	33%	17%	14%	17%
	Muito Leptocúrtica	8%	14%	-	-	-	-	-	-	-	-

A maior discrepância entre os parâmetros granulométricos foi observada entre Setembro – Novembro/2018, após a ocorrência do segundo período de alta energia. Na faixa do estirâncio, o

5 DISCUSSÃO

As fases de erosão e recomposição de praias frequentemente ocorrem em eventos cíclicos concomitantes às variações climáticas sazonais, delimitando perfis volumétricos característicos de verão e de inverno (SHEPARD, 1950; SCHWARTZ, 1967; OWENS, 1977; SHORT, 1980; CLARKE & ELIOT, 1983). Na área de estudo, o balanço sedimentar durante o período de um ano apresentou uma tendência de variação cíclica de correlação moderada a forte com o clima de ondas local – no qual, por sua vez, a climatologia atmosférica no Hemisfério Norte é uma componente de notória importância.

O período de significativa acreção volumétrica esteve relacionado com condições ambientais mais brandas, especialmente em termos de altura e período de ondas. Baixas taxas sedimentares foram registradas durante o predomínio de ondas *swell* com alturas menores que 1 metro e em momentos de maior variabilidade de tipos de ondas, uma resposta similar à registrada por Dubois (1988), em Delaware-EUA. O balanço sedimentar líquido resultou em uma tendência erosiva de cerca de 25,5% do perfil praiial; esta taxa, apesar de numericamente intensificada, pode ilustrar um comportamento representativo e recorrente da área, considerando o histórico de intervenções antrópicas no sentido de evitá-lo.

Apesar de sua variação cíclica, a distinção entre perfis de verão e inverno como convencionada sinteticamente pela Regra de Bruun (BRUUN, 1962), por exemplo, deve ser utilizada com cautela quando se considera a atuação das ondas *swell*. Em dois dos três casos acompanhados, a ocorrência de múltiplos eventos de ressaca esteve relacionada a variações volumétricas positivas no período bimestral de sua incidência. Processos semelhantes foram notados por Dubois (1988) e Dail et al. (2000) em praias arenosas de Delaware e Havaí, nas quais a incidência de ondas de tempestade causaram erosão imediata do berma, seguida de um rápido processo de acresção vertical e, em seguida, horizontal da faixa de praia. Outros autores destacam ainda a atuação das ondas *swell* mais brandas, subsequentes a eventos de alta energia, na reconstrução do perfil praiial (QUARTEL et al. 2008; SHEPARD, 1950).

É importante ressaltar, com base na distinção de resposta dos dois setores (Leste e Oeste), a morfodinâmica local como um fator de relevância para o balanço sedimentar. O padrão de modificação no setor Leste, por exemplo, com variações geomorfológicas sutis em resposta ao

transporte sedimentar, pode ser explicado considerando a presença do espigão e dos afloramentos de *beachrocks* e seu papel retentor, caracterizando uma zona mais protegida em relação ao setor Oeste.

A intensa interferência antrópica e alto grau de artificialização em áreas costeiras estabelecem condições morfodinâmicas nas quais a aplicação de modelos sintéticos, como o de Bruun (1962), tornam-se particularmente limitados (COOPER & PILKEY, 2004). Para chegar a esta conclusão, a caracterização sedimentológica foi um fator chave, enfatizando diferentes manifestações de condições energéticas e suas variações em resposta a ondas de alta energia, similarmente aos registros de Herrling and Winter (2014) e Miot da Silva et al. (2012). Neste cenário, a inversão do fácies granulométrico e do grau de seleção, principalmente na zona de estirâncio e no setor Leste, representaram o potencial modificador dos eventos de ressaca.

Em face à não consideração da variável da inclinação do perfil de praia para a determinação do padrão de mudanças morfodinâmicas, foram consideradas, particularmente, as conclusões de Quintana et al. (1997). Segundo os autores – apesar de contribuir para acurácia da análise quantitativa – do ponto de vista qualitativo, as análises que desconsideram a inclinação da encosta de praia possuem melhor comportamento preditivo.

Com respeito às correlações entre variáveis ambientais, as oscilações no balanço sedimentar apresentaram conexão predominante com as condições de ondas e marés. De forma geral, todos os parâmetros de onda apresentaram correlação moderada a forte com o volume sedimentar e nível topográfico médio. Contudo, uma exceção a esta tendência foi notada em relação à altura significativa (H_s), mostrando que a altura de ondas isoladamente não causa variações relevantes em termos de volume e nível – mas sua associação com condições de maré de sizígia, expressa na altura resultante (H_r), tem efeito considerável.

No que compete à avaliação da metodologia aplicada com uso de VANT's, enormes vantagens foram notadas em termos de robustez de dados, acurácia e custo benefício em função da cobertura e logística de levantamento. De fato, a aplicação aerofotogramétrica é amplamente compatível com a dinamicidade dos processos litorâneos e imprescindível às tomadas de decisão no âmbito do Gerenciamento Costeiro, como descrito por diversos autores (GONÇALVES, 2015; BRUNIER, 2016; CHENG, 2016; CASELLA et al., 2014; PAPAKONSTANTINO, 2016; YOO,

2016). Todavia, a associação desta ferramenta com outros métodos diretos e indiretos complementares foi decisiva para um entendimento amplo das variáveis e processos envolvidos no balanço sedimentar.

Apesar de os métodos utilizados neste estudo promoverem uma valiosa perspectiva sobre o padrão de balanço sedimentar local e possivelmente regional, é reconhecida a necessidade de maior elucidação dos processos envolvendo o setor submerso através de levantamentos batimétricos (HALLERMEIER, 1981), bem como a utilização de métodos geofísicos para completar o entendimento da movimentação sedimentar em toda a abrangência do ambiente costeiro.

6 CONCLUSÕES

Sob as condições ambientais características do NEB, o balanço sedimentar de estirâncio e pós-praia do litoral da cidade de Fortaleza é influenciado majoritariamente pelas variações no regime de ondas. Nesse cenário, uma forte correlação foi identificada entre a formação de ciclones extratropicais no HN e a incidência de ondas de alta energia na costa do NEB, com resposta média de 3 a 4 dias entre ápices de MSLP (hPa) e chegadas de ondas *swell*.

O regime de ondas da região é bem delimitado durante o ano em termos de Hs (m) e T (s), em fase com fatores de sazonalidade climática e conexão inter-hemisférica. A estação de ondas de alta energia concentra-se no primeiro semestre, entre janeiro e abril, com maior incidência de ondas *swell* amplificadas e ocorrência de eventos de ressaca mais intensos. Entre maio e agosto, a predominância de ondas *sea* e a atuação dos fortes ventos locais evidenciam a diminuição da influência da conexão com o HN e associam-se a taxas de máximo acúmulo sedimentar.

A tendência erosiva na área, representada no período em questão por um déficit de 25.5% do volume inicial, esteve relacionada principalmente às condições de maiores períodos e grande variabilidade de tipos de ondas. A análise de correlação de fatores mostrou que as variações sedimentares ocorreram principalmente em função das condições de ondas e marés. Enquanto o período de ondas – e, conseqüentemente, o tipo – tem forte influência, a altura de ondas isoladamente não segue a mesma tendência, o que enfatiza o papel das condições de maré associadas.

Variações granulométricas sutis evidenciam que a área se encontra, na maior parte do tempo, em relativo equilíbrio energético. As perturbações neste sistema ocorrem mais intensamente na faixa média do estirâncio superior, destacando a atuação do setor nos processos de mobilização sedimentar e a importância do seu monitoramento detalhado.

Para atender ao intuito geral deste estudo, a aplicação de métodos diretos e indiretos mostrou-se indiscutivelmente vantajosa, permitindo a percepção de mudanças tanto em escala larga quanto local, em diferentes séries cronológicas. Todavia, destaca-se a necessidade de associação com outros métodos direcionados ao setor submerso, bem como métodos geofísicos de detalhamento volumétrico, para uma descrição abrangente do balanço sedimentar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J.H.G.M. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. **Ocean Modelling**, v. 11, p. 98-122. 2006.
- BARRER, N.F.; URSELL, F. The generation and propagation of ocean waves and swell – I. Wave periods and velocities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London – Series A. Mathematical and Physical Sciences*, v. 240, n. 824, p. 527-560. 1948.
- BEZERRA, M.O.; PINHEIRO, L.; MORAIS, J.O. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast Brazil) 1972 – 2003. **Journal of Coastal Research**, SI.50, p. 1163-1167. 2007.
- BRUNIER, G.; FLEURY, J.; Anthony, E.J.; GARDEL, A.; DUSSOUILLEZ, P. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. **Geomorphology**. v. 261, p. 76-88. 2016.
- BRUUN, P. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Proc. Am. Soc. Vil. Eng.*, **Journal of Waterways and Harbors Division**, v. 88, p. 117-130. 1962.
- CARVALHO, A.M. **Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões-Costa NW do Estado do Ceará. Ênfase nos processos eólicos**. 2003. 188p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador, 2015.
- CAMARGO, M.G. Sysgran: um sistema de código aberto para análise granulométrica do sedimento. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 36, n. 2, p. 371-378. 2006.
- CASELLA, E.; ROVERE, A.; PEDRONCINI, A.; MUCERINO, L.; CASELLA, M.; CUSATI, L.A.; VACCHI, M.; FERRARI, M.; FIRPO, M. Study of wave run up using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 149, p. 160-167. 2014.
- CLAUDINO-SALES, V. **Cenários litorâneos - Lagoa do Papicu, natureza e ambiente na cidade de Fortaleza, Ceará**. 1993. 349p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de São Paulo, USP, São Paulo, 1993.
- CLAUDINO-SALES, V.; WANG, P.; CARVALHO, A.M. Interactions between various headlands, beaches and dunes along the coast of Ceara State, Northeast Brazil. **Journal of Coastal Research**, vol. 34, p. 413-428. 2018.
- CHEN, G.; CHAPRON, B.; EZRATY, R.; VANDEMARK, D. A Global View of Swell and Wind Sea Climate in the Ocean by Satellite Altimeter and Scatterometer. **American Meteorological Society**, v. 19, p. 1849-1859. 2002.
- CHENG, J.; WANG, P.; GUO, Q. Measuring Beach Profiles along a Low-Wave Energy Microtidal Coast, West-Central Florida, USA. **Geosciences**. v. 6, n. 44. 2016.

CHUNG, J.C. Correlations between the tropical Atlantic trade winds and precipitation in northeastern Brazil. **Journal of Climatology**, v. 2, n. 1. 1982.

CLARKE, D.J.; ELIOT, I.G. Mean sea-level and beach-width variation at Scarborough, Western Australia. **Marine Geology**, v. 51, p. 251-267. 1983.

COOPER, J.A.G.; PILKEY, O.H. Sea level rise and shoreline retreat: time to abandon the Bruun Rule. **Global and Planetary Change**, v. 43, p. 157-171. 2004.

DAIL, H.J.; MERRIFIELD, M.A.; BEVIS, M. Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing. **Marine Geology**, v. 162, p. 443-458. 2000.

DNH. *Tábuas de Maré. Centro de Hidrografia da Marinha*. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>. Acesso em: 20 mar. 2020.

DRENNAN, W.M.; GRABER, H.C.; HAUSER, D.; QUENTIN, C. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. **Journal of Geophysical Research**, v. 30, p. 1-13. 2009.

DUBOIS, R.N. Seasonal changes in beach topography and beach volume in Delaware. **Marine Geology**, v. 81, p. 79-96. 1968.

FARIAS, E.G.G.; LORENZZETTI, J.A.; CHAPRON, B.; CORREIA DE SOUZA, J.M.A. Analysis of surface wave climate in the North Atlantic by satellite altimeter and scatterometer. **In**: [S.I.: s.n.], p. 7075-7081. 2011.

FARIAS, E.G.G. **Uso de dados obtidos por sensores orbitais ativos no estudo dos campos de ondas de superfície no Atlântico Norte Tropical**. 2012. 207p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

FECHINE, J.A.L. **Alterações no perfil natural da zona costeira da cidade de Fortaleza, Ceará, ao longo do século XX**. 2007. 116p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

FISCH, C.L. **Caracterização do Clima de Ondas na Costa do Ceará**. 2008. 231p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 27, p. 3-26. 1957.

GFS. *Global Forecast System (GSF)*. **National Centers for Environmental Information**. Disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. Acesso em: 20 mar. 2020.

GONÇALVES, J.A.; HENRIQUES, R. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 101-111. 2015.

GUERRA, R.G.P. **Vulnerabilidade costeira a eventos de alta energia no Litoral de Fortaleza, Ceará**. 2014. 103p. Tese (Mestrado em Ciências Marinhas Tropicais) – Universidade Federal do Ceará, 2014.

HALLERMEIER, R.J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. **Coastal Engineering**, v.4, p. 253-27. 1981.

HAMILTON, G.D. Measurements of Long-Period, Low-Amplitude Swell in the Western North Atlantic. **American Meteorological Society**, v. 9, p. 645-658. 1992.

HERRLING, G.; WINTER, C. Morphological and sedimentological response of a mixed-energy barrier island tidal inlet to storm and fair-weather conditions. **Earth Surface Dynamics**, v. 2, p. 363-382. 2014.

HINKLE, D.E.; WIERSMA, W.; JURIS, S.G. Applied Statistic for the Behavioral Sciences. Ed. 5. **Houghton Mifflin**. Boston. 2003.

IPECE, 2018. **Perfil Municipal 2017**. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE. Fortaleza. Ano I – janeiro de 2018.

INMET. *BDMEP* (Banco de Dados Meteorológicos do Instituto de Nacional de Meteorologia). **INMET**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 20 mar. 2020.

INNOCENTINI, V.; CUNHA PRADO, S.C.S.; PEREIRA, C.S.; ARANTES, F.O.; BRANDÃO, I.N. Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: Caso de 24 de outubro de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 2, p. 177-186. 2000.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. *In*: Köppen W and Geiger R (eds) **Handbuch der Klimatologie**. Berlin: Gerbrüder Borntraeger, Vol. I, Part C, 44p. 1936.

LIMA FILHO, R.P.; CASTELO BRANCO, M.P.N.; PINHEIRO, L.S. Contribuição do rio Cocó e riacho Maceió na sedimentação da plataforma interna de Fortaleza-CE. **REGNE**, v. 5. 2019.

MAIA, L.P.; JIMENEZ, J.A.; SERRA, J.; MORAIS, J.O.; SANCHEZ-ARCILLA, A. The Fortaleza (NE Brazil) Waterfront: Port versus Coastal Management. **Journal of Coastal Research**, v. 14, p. 1284-1292. 1996.

MAIA, L.P. **Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): implicaciones para una gestión adecuada de la zona litoral**. 1998a. Tese (Doutorado) – Universitat de Barcelona, Barcelona. 1998a.

MAIA, L.P.; JIMENEZ, J.A.; SERRA, J.; MORAIS, J.O. The coastline of Fortaleza City. A product of environmental impacts caused by the Mucuripe Harbor. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 31, p. 93-100. 1998b.

MEIRELES, A.J.A.; DILVA, E.D.; SERRA, J.R. Geomorfologia e dinâmica ambiental da planície litorânea entre as desembocaduras dos rios Pacoti e Ceará, Fortaleza – Ceará. **Revista Geonotas**, v. 5, n. 1. 2001.

MELO, F.E. Instrumental confirmation of the arrival of North Atlantic swell to the Ceará coast. In: **International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC**. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 1995.

MENDES, D.; MENDES, M.D. Climatology of cyclones, anticyclones and storm tracks: revision of concepts. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 22, n. 2, p. 127-134. 2004.

MIOT DA SILVA, G.; MOUSAVI, S.M.S.; JOSE, F. Wave-driven sediment transport and beach-dune dynamics in a headland bay beach. **Marine Geology**, 323-325, p.29-46. 2012.

MORAIS, J.O. Aspectos do transporte de sedimentos no litoral do município de Fortaleza, Estado do Ceará, Brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 20, n. 1, p. 71-100. 1980.

MORAIS, J.O. Evolução sedimentológica da enseada de Mucuripe (Fortaleza – Ceará – Brasil). **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 21, n. 1, p. 19-46. 1981.

MORAIS, J.O.; PINHEIRO, L.; PESSOA, P.R.S.; FREIRE, G.S.; CARVALHO, A.M.; GUERRA, R.G.P.; BARROS, E.L.; MOURA, F.J.M.Ceará. In: Dieter Muehe. (Org.). **Panorama da Erosão Costeira no Brasil**. 1ed.Brasília: MMA,v.. 1, p. 261-289. 2018.

MOURA, M.R. **Dinâmica costeira e vulnerabilidade à erosão do litoral dos municípios de Caucaia e Aquiraz, Ceará**. 2012. 210p. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MUNK, W.H.; MILLER, G.R.; SNODGRASS, F.E.; BARBER, N.F. Directional recording of swell from distant storms. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 255, p. 505-584. 1963.

OWENS, E.H. Temporal variations in beach and nearshore dynamics. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 47, p. 168-190. 1977.

PAPAKONSTANTINO, A.; TOPOUZELIS, K.; PAVLOGEORGATOS, G. Coastline Zones Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spatial Data. **International Journal of Geo-Information**, v. 5, n. 75. 2016.

PAULA, D.P.; MORAIS, J.O.; FERREIRA, O.; DIAS, J. Análise histórica das ressacas do mar no litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. **Ressacas do Mar, Temporais e Gestão Costeira**, p. 173-201. Editora Premium. Fortaleza. 2015a.

PAULA, D.P.; MORAIS, J.O.; FERREIRA, O.; DIAS, J. De um simples porto a uma cidade convertida para o turismo: artificialização do litoral de Fortaleza-CE, Brasil. **O Homem e as Zonas Costeiras**, Tomo IV. Rede BrasPor, Faperj. Rio de Janeiro. 2015b.

PINHEIRO, L.S.; MORAIS, J.O.; MAIA, L.P. The Beaches of Ceará. In: Andrew D. Short; Antonio Henrique da F. Klein. (Org.). **Brazilian Beaches System**. Coastal Research Library. 1ed: Springer International Publishing, 2016, v. 1, p. 175-199. 2016.

PINHEIRO, L.S.; CORIOLANO, L.N.; COSTA, M.F.; DIAS, J.A. O Nordeste Brasileiro e a Gestão Costeira. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 8, n. 2, p. 5-10. 2008.

PNBOIA. *Dados PNBOIA*. **Centro de Hidrografia da Marinha**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>. Acesso em 20 mar. 2020.

QUARTEL, S.; KROON, A.; RUESSINK, B.G. Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. **Marine Geology**, v. 250, p. 19-33. 2008.

QUINTANA, J.A.J.; CONEJO, A.S.; GARCÍA, H.I.V. Predicción de los cambios en el perfil de playa utilizando parámetros adimensionales sencillos. **Revista de Obras Públicas - Ciencia y Técnica de la Ingeniería Civil**. N. 3.362. 1997.

RICARTE, E.R. **Avaliação de Sítios para o Aproveitamento de Recursos Energéticos das Ondas do Mar**. 2007. 231p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2007.

SILVA, A.C.; FAÇANHA, P.; BEZERRA, C.; ARAÚJO, A.; PITOMBEIRAS, E. Características das ondas “sea” e “swell” observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. **Tropical Oceanography**. v. 39, n. 2, p. 123-132. Recife. 2011.

SOUZA, M.J.N.; NETO, J.M.; ROSA, A.M.M.; MADEIRO, C.; SANTOS, J.O.; GONDIM, M.S.; FILHO, M.J.N.S. **Diagnóstico geoambiental do Município de Fortaleza: subsídios ao Macrozoneamento Ambiental e à revisão do Plano Diretor Participativo**. Fortaleza. 172p. 2007.

SUGUIO, K., 1973. Introdução a Sedimentologia. Edgard Blucher/EDUSP, São Paulo, 317p.

VASSIE, J.M.; WOODWORTH, P.L.; HOLT, M.W. An Example of North Atlantic Deep-Ocean Swell Impacting Ascension and St. Helena Islands in the Central South Atlantic. **American Meteorological Society**, v. 21, p. 1095-1103. 2004.

VIANNA, M.L. Ressacas na costa norte do nordeste causadas por furacões extratropicais. In: **IX Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2613-1619. Rio de Janeiro-RJ. 2000.

SEMEDO, A.; SUSELJ, K.; RUTGERSSON, A.; STERL, A. A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40. **American Meteorological Society**, v. 24, p. 1461-1479. 2011.

SCHWARTZ, M.L. The Bruun Theory of Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. **The Journal of Geology**, v. 75, n. 1, p. 76-92. 1967.

SHEPARD, F.P. Beach cycles in southern California. **United States Beach Erosion Board**, Tech. Memo. No. 20, 26p. 1950.

SHORT, A.D. Beach response to variations in breaker height. **Proceedings of Coastal Engineering Conference**, 7th Am. Soc. Civ. Eng., p. 1016-1035. 1980.

TRIGO, I.F.; DAVIES, T.D.; BIGG, G.R. Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. **Journal of Climate**, 12, p. 1685-1696. 1999.

UTILDA, G.; CRUZ, F.W.; ETOURNEAU, J.; BOULOUBASSI, I.; SCHEFUB, E.; VUILLE, M.; NOVELLO, V.F.; PRADO, L.F.; SIFEDDINE, A.; KLEIN, V.; ZULAR, A.; VIANA, J.C.C.; TURCQ, B. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. **Scientific Reports**, v. 9. 2019.

WENTWORTH, C.K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**, v. 30, n. 5, p. 377-392. 1922.

YOO, C.I.; OH, T.S. Beach volume change using UAV photogrammetry in Songjung Beach, Korea. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – XXIII ISPRS Congress**. Prague, Czech Republic. v. 91-B8. 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE 1

PUBLICAÇÃO DE ARTIGO

“Using Direct and Indirect Methods to Assess the Influence of High-Energy Waves over Beach Sedimentary Balance (Brazilian Northeastern Region)”

Publicado em versão “*pre-print*” na revista *Journal of Coastal Research*, 21 julho/2021.

Using Direct and Indirect Methods to Assess the Influence of High-Energy Waves over Beach Sedimentary Balance (Brazilian Northeastern Region)

Letícia Mesquita Eduardo[†], Alexandre Medeiros de Carvalho[†], Sérgio Bezerra Lima Júnior[†], Vanda Claudino-Sales^{‡*}, Francisco Gleidson da Costa Gastão[†], Jonathan L. Castelo Branco[†], and Lidriana de Souza Pinheiro[†]

[†]Marine Sciences Institute (LABOMAR)
Federal University of Ceará, UFC, Brazil

[‡]Department of Geography
Federal University of Ceará, UFC, Brazil



www.cerf-jcr.org



www.JCRonline.org

ABSTRACT

Eduardo, L.M.; Carvalho, A.M.; Lima, S.B.; Claudino-Sales, V.; Costa Gastão, F.G.; Castelo Branco, J.L., and Souza Pinheiro, L., 0000. Using direct and indirect methods to assess the influence of high-energy waves over beach sedimentary balance (Brazilian Northeastern region). *Journal of Coastal Research*, 00(0), 000-000. Coconut Creek (Florida), ISSN 0749-0208.

Because of the high dynamicity of atmospheric and oceanographic variables in coastal processes, local sedimentary balance is a matter of great interest for Integrated Coastal Zone Management. The diversity of environmental factors associated with the history of anthropic interventions, in addition to detailed topographic changes related to storm surge events, is assessed in this research for a stretch of the northeastern Brazilian coast. For this purpose, an association of conventional and improved digital methods was applied for data acquisition and processing. Remote sensing techniques with unmanned aerial vehicles (UAVs), three-dimensional modeling, and sedimentary analysis were performed, as well as detailed monitoring of meteorological and oceanographic variables with *in situ* sources and environmental modeling. The results of 1-year monitoring revealed a sedimentary balance with different variations in response to high-energy events associated with extratropical cyclones in the North Atlantic. The sedimentary balance showed an erosional rate of 25.5%, reflected in a 17.4% diminution in average topographic level of the area. Beach erosion was correlated to long period waves and great variability of wave types. Positive volumetric changes were correlated to mild weather environmental conditions. Swell waves presented a significant role in both beach erosion and following consequential topographic recovery. There was an asymmetric susceptibility to volume losses in different beach sectors.

ADDITIONAL INDEX WORDS: Storm surge, sedimentary balance, coastal management, UAV.

INTRODUCTION

The interhemispheric dynamic that controls Southern Hemisphere high-energy waves incidence, in response to the formation of synoptic scale atmospheric systems in the Northern Hemisphere, has been continually documented around the world (Alves, 2006; Chen *et al.*, 2002; Hamilton, 1992; Innocentini *et al.*, 2000; Semedo *et al.*, 2011; Vassie, Woodworth, and Holt, 2004) and, especially, in the Northeastern Brazilian coast (NEB) (Farias, 2012; Silva *et al.*, 2011; Vianna, 2000).

Long period wave generation occurs in response to wind speeds greater than 18 m s^{-1} over areas of approximately 1000 km (Munk *et al.*, 1963). This wind and fetch area pattern are usually associated with low-pressure storm centers, where swell waves originate (Barré and Ursell, 1948). From this point on, swell waves propagate across the ocean with low dissipation coefficient (Drennan *et al.*, 2003), dispersing throughout long distances on a global scale (Munk *et al.*, 1963).

Details concerning the origin, occurrence pattern, and morphodynamic impacts of swell waves are of great interest for Integrated Coastal Zone Management (ICZM) (Casella *et*

al., 2014; Guerra, 2014). Intense swell activity is particularly important in coastal dynamics when it coincides with maximum periods of spring tide, resulting in storm surge events. The evaluation of these factors in coastal areas faces challenges as the process of nearshore urbanization increases, where anthropic intervention background is already significant. On the Northeastern Brazilian coast, storm surges are frequently associated with the destruction over coastal protection and urbanization structures (Paula *et al.*, 2015a).

Low-pressure cyclonic systems are frequent over the North Atlantic Ocean, particularly from January to July, when the region becomes one of the primary cyclogenesis zones (Mendes and Mendes, 2004; Trigo, Davies, and Bigg, 1999). The formation of such atmospheric systems, especially between 35°N and 65°N latitudes, generates swell wave packets that arrive at Ceará coast, in Northeast Brazil, with an average response time of 3 days (Farias, 2012).

Local storm surge events are characterized by the incidence of waves up to 2.8 m of significant height (H_s), peak periods (T) of 11.2 to 20 seconds, and NW to NE peak direction (D_p), which, when added to spring tide maximums, can reach resultant heights (H_r) up to 5 m (Fisch, 2008). The high energy associated with these events provides them with the capacity for rapid and intense changing of coastal landscape, through insertion or removal of sediments in different sectors of beach topography.

DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-21-00024.1 received 18 February 2020; accepted in revision 15 May 2020; corrected proofs received XX Month XXXX; published pre-print online XX Month XXXX.

*Corresponding author: vcs@ufc.br

©Coastal Education and Research Foundation, Inc. 2021

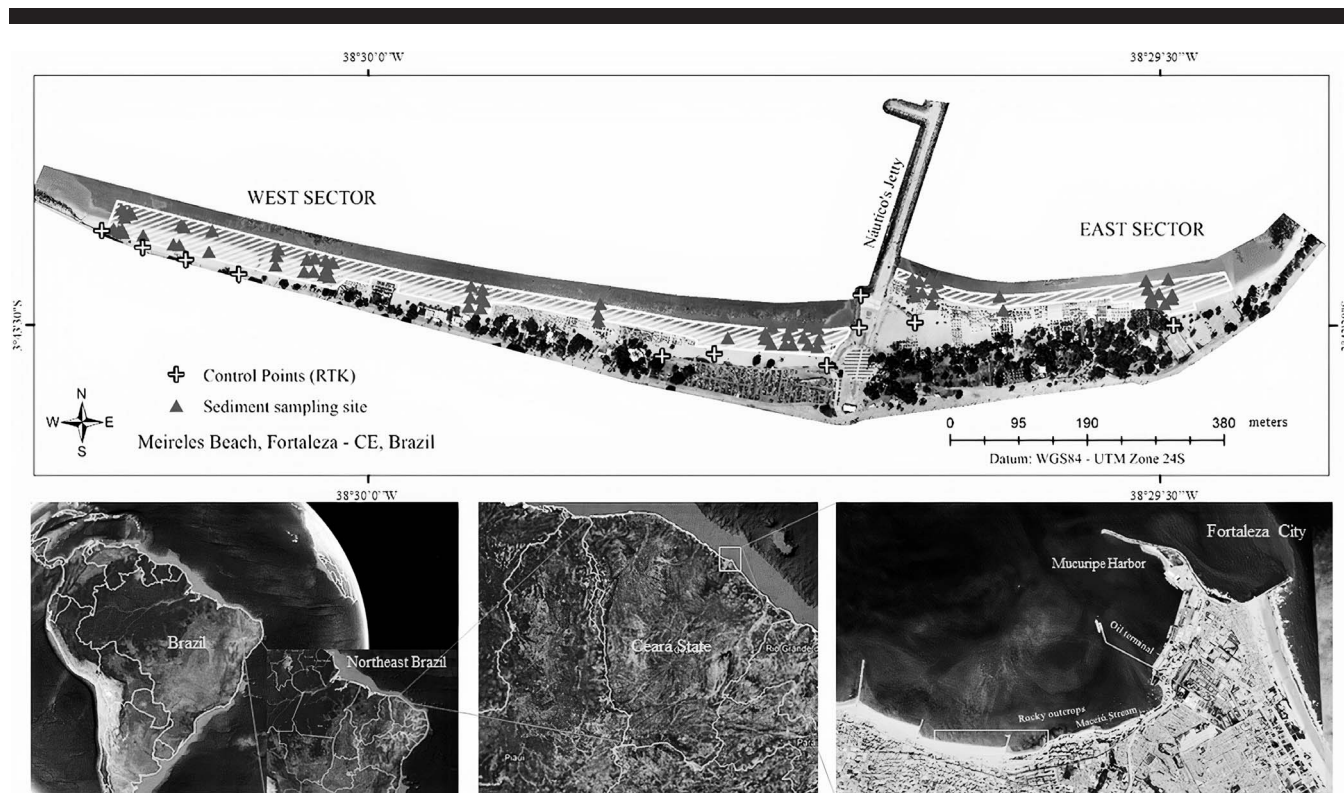


Figure 1. Location maps of the study site, showing (a) the survey area and its (b) global, (c) regional, and (d) local context. Figure 1a also shows the location of standardized polygons, RTK control points and sediment sampling sites. Figure 1d highlights important morphodynamic features, such as rocky Barreiras Formation outcrops, Maceió Stream, and port structures. Geographic coordinate system: Universal Transverse of Mercator (UTM); Datum: WGS84/Zone 24S.

In light of this highly dynamic scenario, an effective strategy, given by the association of direct and indirect methods, was required to match both the spatial and temporal scale necessary to show rapid and medium-term changes in coastal sedimentary balance. To address this, a broad assessment of environmental variables is proposed in response to cyclonic events in the North Atlantic, related to the topographic changes on the emerged sector of a coastal stretch in the Brazilian semiarid region.

Study Area

The study area is situated in the Brazilian northeastern region and is characterized in the following paragraphs:

General Location

The Brazilian northeastern region is composed of nine coastal states, with a coastline extension of nearly 3400 km and great geomorphologic variety (Pinheiro *et al.*, 2008; Pinheiro, Morais, and Maia, 2016). Ceará State, located between intertropical latitudes of 2.5°S and 8°S and 37°W to 42°W longitudes, is in a tropical semiarid climate domain (Köppen, 1936) and has nearly 573 km of coastline extension. Fortaleza City, the state capital with nearly 2.7 million inhabitants (IPECE, 2018), exhibits a remarkably urbanized and anthropically modified coastline (Fechine, 2007).

The study site represents a 1 km portion (Figure 1a) from Fortaleza's 80 km coastline, which is characterized, according to Maia (1998), as a current sandy coastal system with

punctual manifestation of Tertiary/Quaternary Barreiras Formation lithified deposits. Abrasion platforms develop over these deposits, eventually allowing beachrock formation. It is a coastal landscape historically artificialized by protection and recovery interventions, such as jetties and beach nourishment (Figure 1a,d).

Climatology and Environmental Variables

Fortaleza city's coastline is under the influence of a sub-humid tropical climate in which two distinct periods are identified: a rainy season (January–May) and a dry season throughout the rest of the year. Pluviometry rates, which in the rainy seasons concentrate up to 90% of the total, can reach nearly 1,400 mm/y, associated with a mean temperature of 27°C with low variation amplitude (IPECE, 2018).

Wind regime varies seasonally in an inversely proportional relation to rainfall pattern (Carvalho, 2003; Claudino-Sales, 1993; Claudino-Sales, Wang, and Carvalho, 2018), reaching minimum speed values in the first semester (2.0 m/s, average) and maximum values in the second half of the year (4.0 m/s, average). Wind directions are predominantly of E and ESE quadrants, under the primary influence of southeasterly trade winds (Chung, 1982; Utida *et al.*, 2019).

The tidal regime is characterized by a semidiurnal and mesotidal system, subjected to a tidal variation range of 2 to 3 m—on neap tide and spring tide, respectively. Astronomic tides can reach maximum value of 3 m and minimum of -0.2 m.

Table 1. Labels, dates, associated tide height, number of images and number of sedimentary samples collected in each mission.

Labels	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Date	17 Apr 2018	18 May 2018	27 Jul 2018	26 Sep 2018	26 Nov 2018	23 Jan 2019	20 Mar 2019
Tide (m)	0.1	0.1	0.4	0.3	0.4	0.1	0.0
Number of images	194	192	198	247	204	191	255
Number of sediment samples	—	—	19	18	16	12	13

Ceará State's coast, as described by Fisch (2008), has essentially the four most common sea states. These are: (1) sea state associated with local winds, with maximum waves heights ($H_{s_{max}}$) of 1.1 m ($T(s) = 2$ to 5s, $Dp = NW$ to E/SE); (2) sea state associated with northeasterly trade winds, with waves of $H_{s_{max}} = 1.1$ m ($T(s) = 8$ to 11, $Dp = N$ to NE); (3) sea state associated with southeasterly trade winds, with $H_{s_{max}} = 2$ m ($T(s) = 5$ to 11, $Dp = E$ to SE); and, finally, (4) dispersive arrivals from the northern hemisphere (NH), with $H_{s_{max}} = 2.8$ m ($T(s) = 11$ to 20, $Dp = NW$ to NE).

Still, according to the observations of Fisch (2008), the dispersive arrival state is more frequently identified between January and March. Under the influence of southeast trade winds, sea states of greater energy can occur between September and November—when the withdrawal of the intertropical convergence zone (ITCZ) from the area allows the development of more intense winds.

Coastal Morphodynamic and History of Interventions

According to Maia (1998), the longshore sediment transport by wave action and wind are the most important processes for balance and evolution of Fortaleza's coastline. In this region, local morphodynamic aspects, as well as the interaction of multiple natural variables, were heavily affected by human interventions—expressed by preexistent and ongoing harboring structures, jetties, piers, beach nourishment projects, and coastline artificialization for urbanistic purposes (Fechine, 2007; Morais *et al.*, 2018; Paula *et al.*, 2015b). In this scenario, the Mucuripe Harbor (Figure 1d), since its construction, has acted as the most important feature of general impact on Fortaleza's coastline. As a result of its construction on the Mucuripe Headland without a detailed consideration of local hydrodynamic aspects, the structure promoted relevant impacts on wave propagation and sediment transportation patterns (Bezerra, Pinheiro, and Morais, 2007; Maia *et al.*, 1996, 1998; Morais, 1980, 1981). The harbor's jetty construction interrupted the headland bypass process with sediments coming from east to west, propelling an erosive tendency along the coastline west to the structure.

From photographic historical records, before and during the port construction in the 1950s, the downstream Mucuripe promontory used to receive aeolian sediments from the updrift sector, which were directly deposited on the inside portion of the harbor, until being blocked after harbor construction. In response to the successive jetty installation and consequent retention of sediments transported by longshore current—always resulting in down-current erosion processes—effects of anthropic intervention extended beyond the limits of Fortaleza's western coast, remodeling the coastal landscape of

Fortaleza itself and adjacent municipalities (Maia *et al.*, 1998; Moura, 2012).

A close analysis of the survey area shows that Náutico's Jetty (Figure 1a) represents the most important artificial structure to be considered on wave incidence and sediment deposition dynamics. Secondly, the presence of culverts and punctual areas of rocky outcrops is highlighted (Figure 1d). Updrift of the study site shows where the Maceió Stream (Figure 1d) is located, which was related to a contribution of fine granulometry sediments into the internal platform with an estimated flow rate of 0.02 m³/s (Lima Filho, Castelo Branco, and Pinheiro, 2019).

METHODS

An ensemble of different methods were used in order to conduct the research:

Photogrammetry

The acquisition of aerial images was performed by the alternate application of two unmanned aerial vehicle (UAV) models: Phantom 4 (DJI Technology Co), associated with a DJI FC330 camera, as well as a Phantom 4 Advanced with an FC6310 camera. A flight plan was previously designed with DroneDeploy v.2.7.6.0, which guided the survey over an area of 48,700 m².

Monitoring the periodicity of activities followed bimonthly intervals from April 2018 to March 2019, resulting in seven flight missions—specified in Table 1.

Immediately before flight missions, the delimitation phase of Control Point (CP) was executed. The exact geographic location was obtained through a Geodesic GPS system with real time kinematic (RTK), using a Trimble R10 GNSS equipment. After in situ data acquisition, CPs were adjusted to ellipsoidal height and corrected by triangulation based on information gathered by two altimetric stations of the Brazilian network of continuous monitoring (RBMC). Finally, using MAPGEO 2015 (Brazilian Institute of Geography and Statistics—IBGE) software, altitude and geoid undulation verification and geometric to orthometric data corrections were executed. Aerial imagery was processed using OpenDroneMap v.0.4 for the final generation of digital elevation models (DEMs). A final report from OpenDroneMap provided the errors related to the delimitation of control points during DEM generation, which are shown in Table 2.

Comparative Analysis

In order to establish an equitable criterion of data analysis for all models, two standardized polygons were set for eastern and western sectors, taking as reference their positioning in relation to Náutico's rocky jetty. Fixing area and perimeter proportions made it possible to compare DEMs regardless of

Table 2. Errors related to control points (CPs) delimitation during DEM generation, per survey and mean values.

	Error (m)	Error (pix)	Z error (m)
C1	0.04336	0.630	0.00925
C2	0.04339	0.418	0.00561
C3	0.04109	0.279	0.01959
C4	0.03912	0.339	0.01015
C5	0.03076	0.429	0.00135
C6	0.04303	0.393	0.00362
C7	0.03532	0.270	0.00745
Mean error	0.03943	0.394	0.00814

limitations due to reflectance on the intertidal zone and allowed a more detailed visualization over areas under special morphodynamic circumstances. The standard polygon for the east sector covered an area of 6791 m² and 858 m perimeter, while the west sector covered 21,265 m² and 1855 m (Figure 2). Consequently, the east sector was expected to have smaller relative volumetric rates when compared to the west sector.

Quantitative comparisons between models involved the volume above custom level and mean level parameters, provided with calculations made by the software itself in DEM processing. The first one provides total volume measures in cubic meters over a suitable altimetric value, while the second describes the average altimetric level for the defined area.

Sedimentological Characterization

Throughout the aerial scanning missions, sedimentary sample collection occurred based on topographic and textural discrepancies visually identified among foreshore and back-shore zones, but considering the same zone around the sampling point. A mean value of 18 samples per mission was gathered from July 2018 to March 2019, resulting in 78 sampling points (Figure 1).

Granulometric analysis followed the routine in Suguio (1973), using Wentworth's Sedimentary Scale (Wentworth, 1922) as reference. Dimensional, faciologic, and degree of selection were determined with Folk and Ward's classification (Folk and Ward, 1957). Grain size data were processed using SysGran v.3.1 software (Camargo, 2006).

Meteorological and Oceanographic Factors

The majority of oceanographic data was obtained using the WaveWatch III model application. Fortaleza's buoy data, from the National Buoy Program (PNBOIA, 2021), and official warnings from the Brazilian Navy were used as complementary information. Tide records were acquired through the platform of the Hydrography and Navigation Board (DNH, 2021).

A characterization of cyclonic systems in the NH, associated with the monitoring of the arrival of dispersive waves, was made with the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Global Forecast System (GFS, 2020). Meteorological data, such as daily precipitation rates, wind speed, and direction were obtained from an *in situ* sensor from Fortaleza's Meteorological Station, monitored by the National Institute of Meteorology (INMET, 2020).

Environmental variables analysis was performed based on a monthly mean classification for the period available on Wave-

Watch III model database (2016 to 2020) and a daily classification for the surveyed period. For wave climate description, the classification of Fisch (2008) was applied to identify the arrival of dispersive swell waves from the northern hemisphere. Wave typology was conventionally made considering wave period, whether it was below (sea waves) or above (swell waves) 10 seconds. The characterization of high-energy events was based in not only wave height and period, but also on their association to spring tide conditions—which is represented by the “resultant height” (*Hr*) variable.

The correlation ratio between environmental parameters and the volumetric/topographic variation was established by applying Pearson's Correlation Coefficient (ρ) (Equation 1). ρ interpretation followed the general rule defined by Hinkle, Wiersma, and Jurs (2003), according to which (a) 0.90 to 1.0 indicates very strong correlation; (b) 0.70 to 0.90 indicates strong correlation; (c) 0.50 to 0.70 indicates moderate correlation; (d) 0.30 to 0.50 indicates weak correlation; and (e) 0.0 to 0.30 indicates negligible correlation.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} = \frac{\text{cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{var}(X) \cdot \text{var}(Y)}} \quad (1)$$

Equation 1 shows Pearson's correlation coefficient definition.

RESULTS

The obtained results are shown below, in terms of atmospheric systems, associated high-energy events, local wave regime, sedimentary volume, and granulometry.

Atmospheric Systems, High-Energy Events, and Local Wave Regime

During the survey period, three high-energy event seasons were described (Table 3 and Figure 3c). These events had an average duration of 8 days, concentrated along the months of January to April of both 2018 and 2019—with the exception of Season 2, which happened in November 2018. Mean response time between storm apexes (minimum atmospheric pressure) and the arrival of the first swell waves was approximately 4 days.

The events with greater intensity reached 4.5 to 5.8 m in maximum resultant height (*Hr*), which refers to the summation of both wave and tide heights (Figure 3c). The coastline of the area was also stricken by a less intense storm surge event in November 2018, with maximum *Hr* of 4.5 m and 4 days of average duration. In all cases, the events were preceded by the development of multiple low atmospheric pressure systems (extratropical cyclones), with average duration of 6 days, between 40°N and 70°N latitude (Figure 4).

An extended analysis of local wave regime showed a clear distinction in terms of significant height (*Hs*) (Figure 3a) and wave type proportion (Figure 3b)—which refers to the percentage of sea and swell waves. The season of smaller waves (0.300.70 m) was distributed between June to October (2017) and May to October (2018). In this scenario, the presence of sea waves started to manifest significantly in June 2017 and May 2018, reaching common predominance in both years (56100%) around July–August.

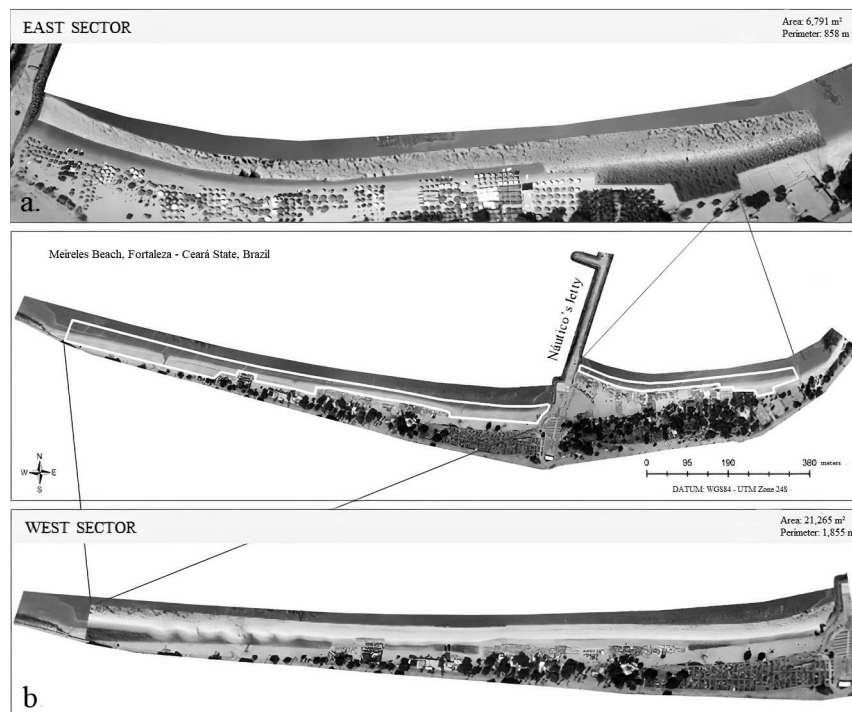


Figure 2. Delimitation of standardized polygons of the (a) east and (b) west sectors.

Bigger waves (0.90–1.20 m) were registered, in general, between December and April—with the exception of 2018, in which a distinct mean H_s elevation occurred in November, simultaneously to the second high-energy event season monitored. The predominance (up to 77%) of swell waves with $H_s > 1$ m occurred between February and April.

Sedimentary Volume

The total volume of sand in the area varied as illustrated in Figure 5. Initial rates, which accounted for 63,907 m³ in volume above custom level (V_{ACL}) and 2.3 m in mean level (ML) in April 2018, suffered a diminution of 25%, resulting in 47,961 m³ and 2.0 m by the end of May 2018. The greatest volume rate, 74,006 m³, was recorded in July 2018—after 54.3% relative volume increase—with associated ML of 2.76 m. The value decreases in 14.2% by the end of September 2018, registering $V_{ACL} = 63,534$ m³ and ML = 2.4 m.

Up next, minimum recorded values, 46,430 m³ (–27%, ML = 1.7 m) in November 2018 and 43,014 m³ (–7.4%, ML = 1.7 m) in January 2019, were succeeded by a subtle recover of 10.7% in

March 2019, reaching $V_{ACL} = 47,602$ m³ and ML = 1.9 m. The final balance reveals a 16,305 m³ loss (–25.5%) in terms of volume and 0.4 m in terms of mean level (–17.4%) between the first and last survey.

The rate of change of the eastern and western sectors was similar to the overall volumetric change (Figures 5 and 6). However, the east sector ($\Delta V_{ACLmax} = +59.3\%$ and $\Delta V_{ACLmin} = -34.5\%$) showed a tendency for intensification of volumetric changes when compared to the west sector ($\Delta V_{ACLmax} = +53.1\%$ and $\Delta V_{ACLmin} = -25.2\%$). This pattern indicates the dominance of cross-shore sediment transport, as expected for a relatively sheltered coastal area in which the effect of coastal drift is practically nonexistent.

Although quantitative volumetric changes were more significant for the east sector, topographic beach profile modifications became clearer on the west sector (Figure 7). For example, in response to the high-energy events of November 2018, a pronounced beach scarp was formed, mobilizing sand to the lower part of the coast. On the other hand, in the eastern sector this volumetric variation occurs in a way that the movement of

Table 3. Nomenclature and general information of atmospheric systems development and associated wave response. Dates, Duration (in days) and Minimum Pressure (in hPa), refer to atmospheric systems. H_{smax} , in meters, refers to maximum significant wave height registered in the study area after cyclonic formation. Response time refers to the interval between storms apexes (minimum atmospheric pressure) and the arrival of the first swell waves.

	Dates	Duration (days)	Minimum pressure (hPa)	H_{smax} (m)	Response time
First season (Feb–Apr 2018)	21–28 Feb 2018	7	943	2.63	4
	14–18 Apr 2018	4	951	1.78	3
Second season (Nov 2018)	13–17 Nov 2018	5	953	2.32	3
Third season (Feb 2019)	03–10 Feb 2019	7	960	1.75	4
	20–26 Feb 2019	6	937	1.54	4

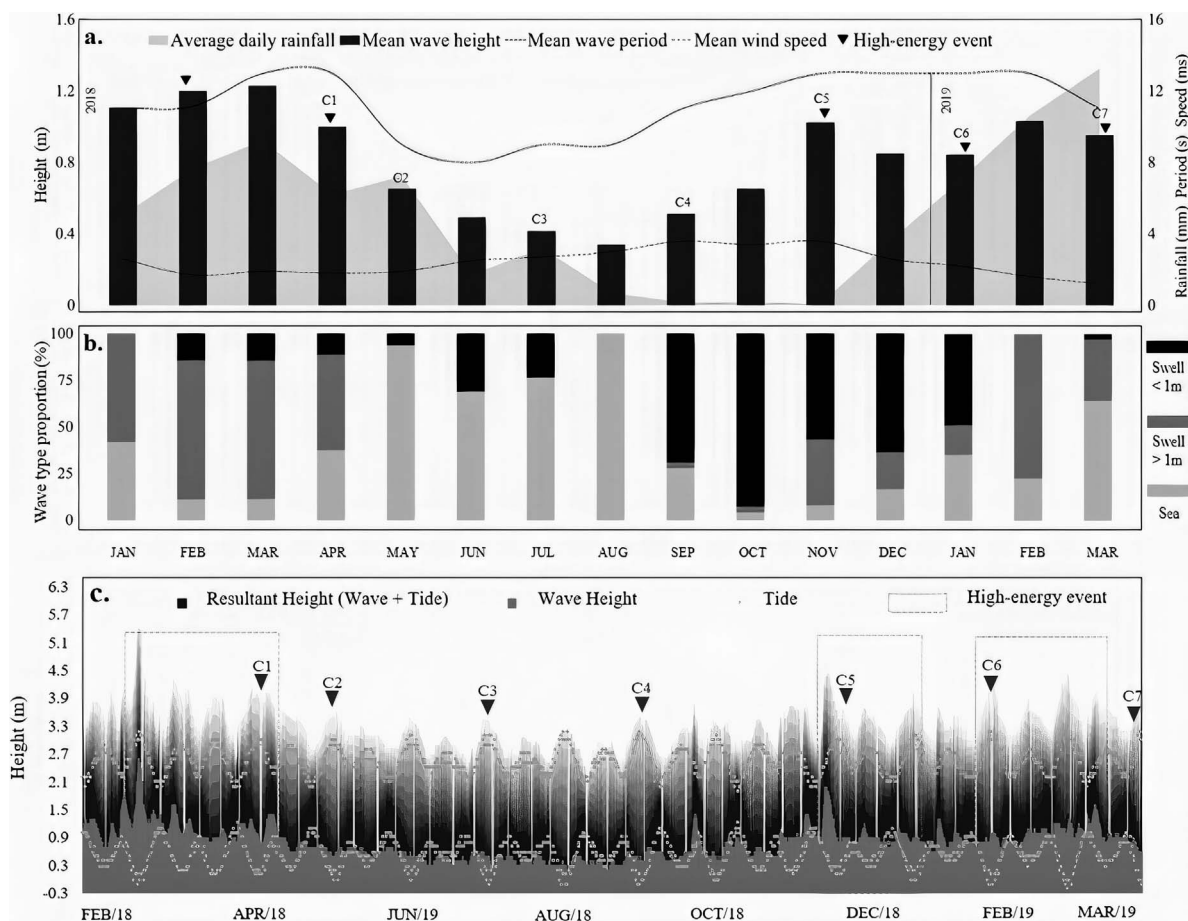


Figure 3. Monthly characterization of (a) environmental variables, (b) wave type proportion and distribution of tides, significant wave height (H_s), and resultant wave height (H_r) for the (c) survey period, with high-energy season's and survey date delimitation.

sediments does not cause great morphological variations in the beach profile.

Granulometry

The analysis of 78 sampling points along the foreshore (FS) and backshore (BS) sectors revealed a faciologic composition slightly variable from fine to medium lithoclastic sand, mainly well sorted (Table 4). On the backshore zone, throughout the survey period, there was a predominance of medium sand in proportions of 57% to 89%. The foreshore zone, however, experienced more expressive variations between fine sand (14 to 75%) and medium sand (25% to 86%), especially from September to November 2018.

The kurtosis parameter (K_G) was predominantly mesokurtic for both sectors, with punctual expression of platykurtic patterns for the samples collected in surveys C4 and C7, for foreshore and backshore sectors, respectively.

Greater discrepancies in granulometric parameters were observed between September and November 2018, revealing the abrupt change potential of the second high-energy event. An inversion of granulometric classification occurred on the

foreshore as medium sand replaced fine sand facies previously predominant (75%), in an 86% proportion. Selection degree (σ), previously 92% well selected, showed a relevant moderate selection sediments insertion (43%), with an accentuation of the symmetry of the Gaussian curve (42% to 86%) and transition from platykurtic to mesokurtic character. A similar variation pattern was noted on the backshore for each of the parameters, however with a subtle numeric discrepancy (Table 4).

In relation to east and west sector, a distinction between facies was noted—which was disturbed, more significantly, by the events prior to the C5 survey (Table 5). On the east sector, under lower energy conditions established by the presence of rocky outcrops and the influence of Mucuripe Harbor, well-selected fine sand was predominant, with approximately symmetric and meso/leptokurtic Gaussian curves. On the west sector, well-selected medium sand facies predominated (except in C7), with approximately symmetric mesokurtic curves. In both sectors, a variation pattern compatible with that observed in Table 4 was expressed—showing similar response behaviors for the whole system of the survey area.

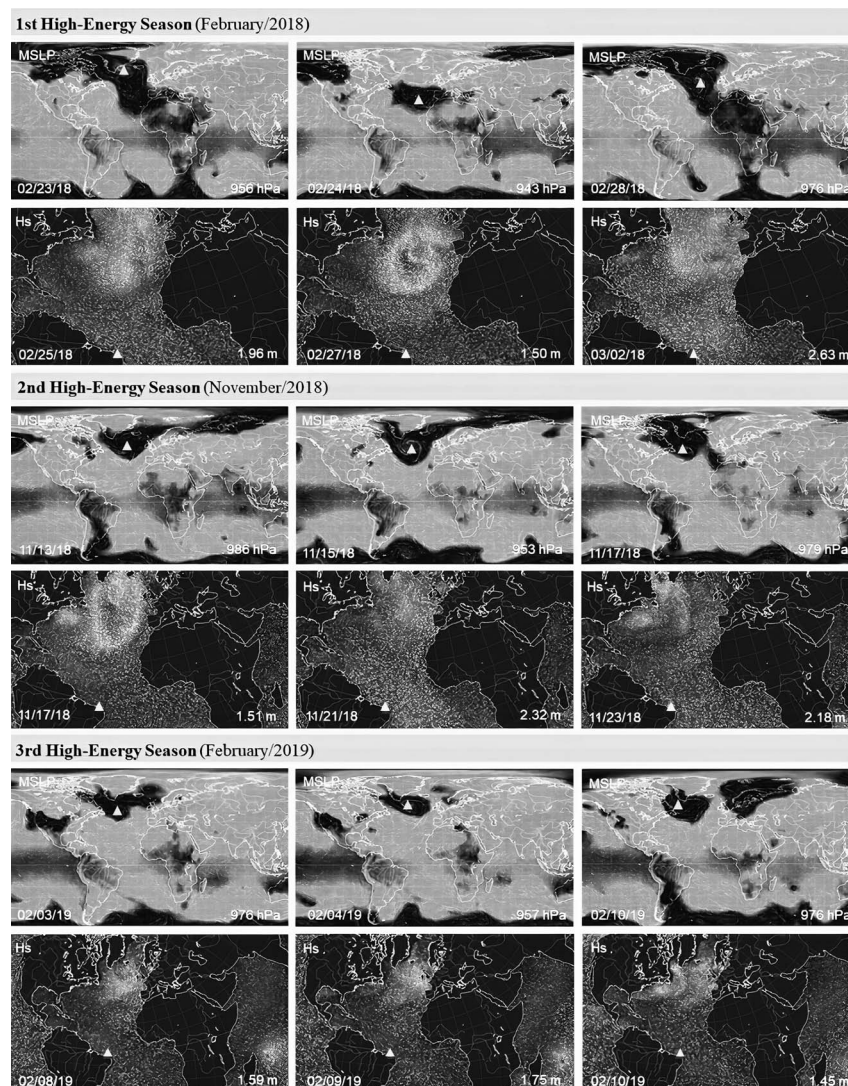


Figure 4. Mean sea level pressure (MSLP) and significant wave height (H_s) imagery, showing the development of atmospheric systems in North Atlantic and associated swell wave's arrival on the Northeastern Brazilian coast. A triangle marks the measurement sites in representative high-energy events of each season.

Interaction of Variables

The set of data illustrated in Figure 6 correlates numerically as indicated in Table 6. Total sedimentary volume (V_{ACL}) and mean level (ML) presented a moderate-to-strong correlation with incident wave type, in the proportions of ± 0.638 and ± 0.775 , respectively. As a result, wave period (T) correlated moderately at a rate of -0.504 with V_{ACL} and -0.625 with ML. Significant wave height (H_s) and resultant wave height (H_r) had negligible and moderate correlation, respectively. The least significant connections of V_{ACL} and ML were correlated to mean wave speed (Wspd), in proportions of 0.025 and -0.061 .

DISCUSSION

Beach face erosion and recovery phases often occur in cyclic events concomitant to seasonal climatic variations, delimitating characteristic volumetric profiles for summer and winter

seasons (Clarke and Eliot, 1983; Owens, 1977; Schwartz, 1967; Shepard, 1950; Short, 1980). At the study site, sedimentary balance over a 1-year period presented a cyclic variation tendency, moderately correlated to local wave climate, in which the atmospheric climatology of the Northern Hemisphere plays an important role.

The period of significant volumetric accretion was related to mild weather environmental conditions, especially in terms of wave period and height. Lower volumetric values were recorded during the predominance of swell waves smaller than 1 m and in periods of greater wave type variability; a similar response to the one described by Dubois (1988) in Delaware, USA. Total sedimentary balance resulted in an erosive tendency of about 25.5% of the beach profile. This rate might illustrate a representative and recurrent behavior of the area,

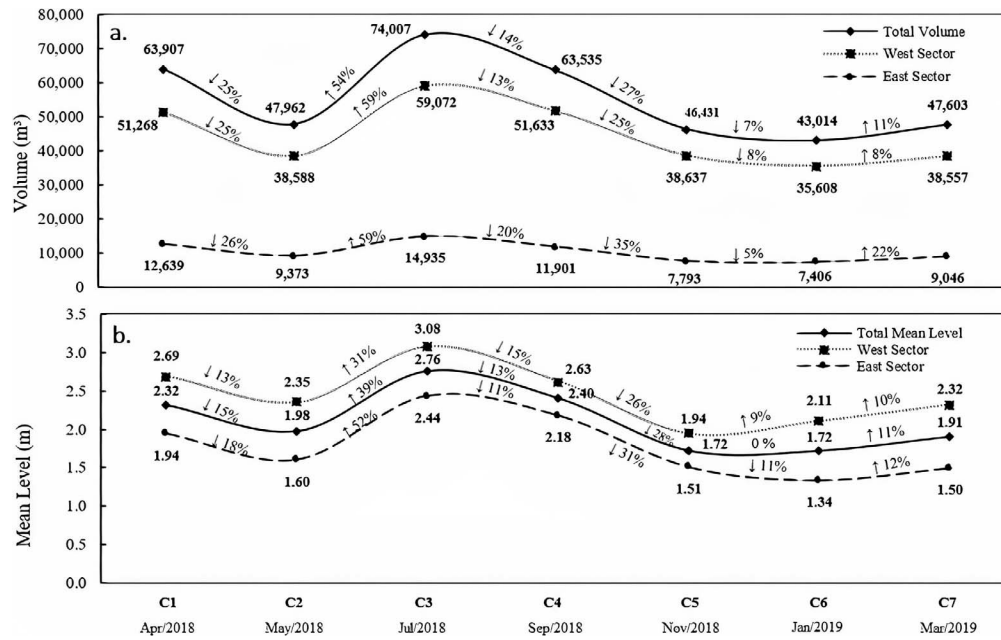


Figure 5. (a) Volume above custom level (V_{ACL}) curves and (b) mean level (ML) curves, with associated variation rate for the entire area and its sectors, through each survey interval.

considering its history of anthropic interventions aiming to prevent such phenomenon.

Despite cyclic variation, the distinction between summer and winter topography, as synthetically established by Bruun’s Rule (Bruun, 1962), for instance, must be applied with caution when considering the effect of swell waves. In two out of the three monitored cases, the occurrence of multiple storm surge events was related to positive volumetric changes within its bimonthly period of incidence on the coast. Similar processes were described by Dail, Merrifield, and Bevis (2000) and Dubois (1988) on sandy beaches in Delaware and Hawaii, in which storm wave incidence caused immediate berm erosion, followed

Table 4. Percentage distribution of granulometric parameter classification on foreshore (FS) and backshore (BS) sectors.

	C3 (%)		C4 (%)		C5 (%)		C6 (%)		C7 (%)	
	FS	BS	FS	BS	FS	BS	FS	BS	FS	BS
Folk and Ward (1957)										
Medium sand	33	57	25	83	86	89	67	83	50	67
Fine sand	67	43	75	17	14	11	33	17	50	33
Selection degree (σ)										
Good selection	92	86	92	83	57	56	100	50	88	100
Moderate selection	8	14	8	17	43	44	—	50	13	—
Symmetry (S_{ki})										
Approx. symmetric	67	43	42	33	86	89	100	83	86	50
Positive symmetry	33	29	16	33	—	—	—	—	14	50
Negative symmetry	—	29	42	33	14	11	—	17	—	—
Kurtosis (K_G)										
Mesokurtic	33	57	25	50	86	78	50	50	57	17
Platykurtic	33	29	42	33	14	11	17	33	29	66
Leptokurtic	25	—	33	17	—	11	33	17	14	17
Very leptokurtic	8	14	—	—	—	—	—	—	—	—

by a quick process of vertical—and later on, horizontal—accretion on the beach face. In addition, other authors highlight the effect of milder swell waves, subsequent to high-energy events, on the reconstruction of beach profile topography (Quartel, Kroon, and Ruessink, 2008; Shepard, 1950).

Furthermore, it is important to highlight the role of local morphodynamics on sedimentary balance based on the distinct responses of both sectors. Modification patterns of the east sector, for instance, with softer geomorphological variations in response to sediment movement, can be explained considering the presence of the jetty and rocky outcrops and their role in sediment retention, which characterizes a relatively more

Table 5. Percentage distribution of granulometric parameter classification on east (ES) and west (WS) sectors.

	C3 (%)		C4 (%)		C5 (%)		C6 (%)		C7 (%)	
	ES	WS	ES	WS	ES	WS	ES	WS	ES	WS
Folk and Ward										
Medium sand	—	57	17	58	50	100	25	100	—	73
Fine sand	100	43	83	42	50	—	75	—	100	27
Selection degree (σ)										
Good selection	100	86	100	75	25	50	100	62	100	9
Moderate selection	—	14	—	25	75	50	—	38	—	91
Symmetry (S_{ki})										
Approx. symmetric	40	64	66	25	100	83	75	100	50	73
Positive symmetry	40	29	17	25	—	—	—	—	50	27
Negative symmetry	20	7	17	50	—	17	25	—	—	—
Kurtosis (K_G)										
Mesokurtic	—	58	66	8	100	75	—	75	—	45
Platykurtic	40	21	17	50	—	17	25	25	—	55
Leptokurtic	—	21	17	42	—	8	75	—	100	—
Very leptokurtic	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—

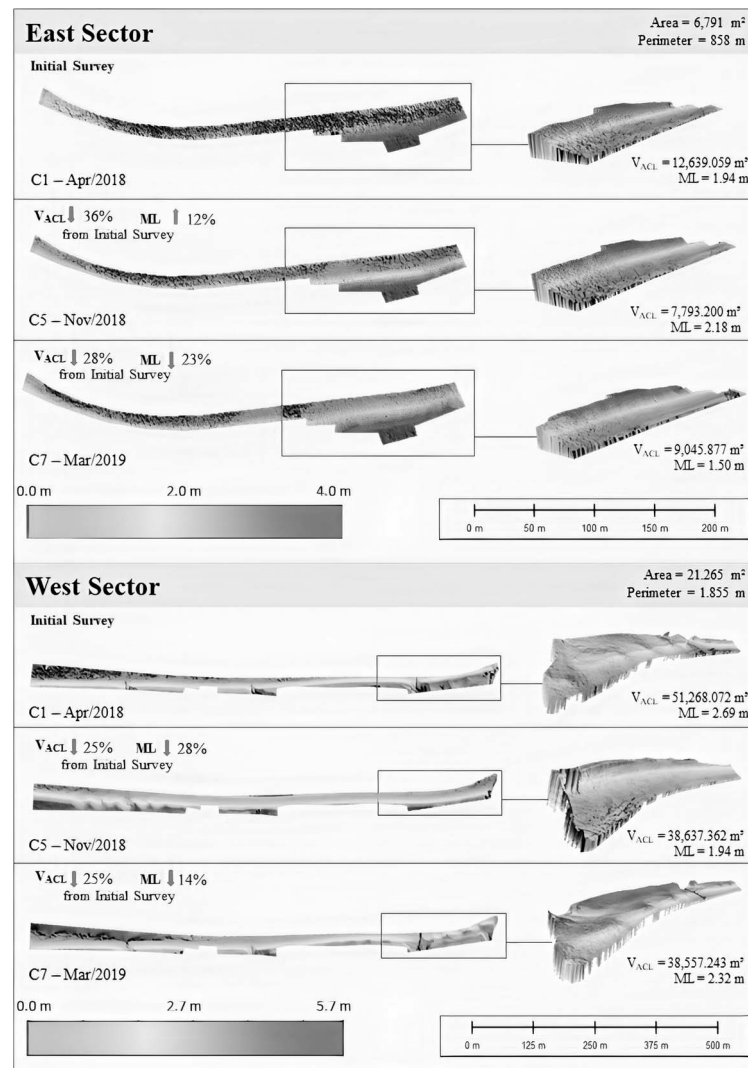


Figure 6. Digital elevation models (DEMs) of East and West sectors on missions C1 (first survey), C5 (greater beach profile variability survey), and C7 (final survey), highlighting areas with notable topographic profile changes.

sheltered zone than the west sector. Intense anthropic interference and a high degree of artificialization in coastal areas establish morphodynamic conditions in which the application of synthesized models, such as that of Bruun, become particularly limited (Cooper and Pilkey, 2004). To reach this conclusion, sedimentological characterization was a key aspect, reinforcing different patterns of energetic conditions and their variation in response to rapid forcing of high-energy waves, similar to the findings of Herrling and Winter (2014) and Miot da Silva, Mousavi, and Jose (2012).

Regarding correlations between environmental variables, sedimentary balance variations showed a predominant connection to wave–tide conditions. In general, all wave parameters presented moderate-to-strong relation to beach volume and mean level. However, an exception to this tendency was found in significant height (H_s), showing that wave height alone does not cause relevant variations in volume and level—

but its association with spring tide does have considerable effects.

In the multi-methodological approach, huge advantages were noted in using an association of direct and indirect methods. The UAV-based photogrammetric tool was confirmed to be very effective, especially in terms of accuracy and cost–benefit relation in the function of survey area cover and logistics, as previously highlighted in many current studies (Brunier *et al.*, 2016; Casella *et al.*, 2014; Cheng, Wang, and Guo, 2016; Gonçalves and Henriques, 2015; Papakonstantinou, Topouzelis, and Pavlogeorgatos, 2016; Yoo and Oh, 2016). However, the association of this tool with *in situ* and satellite derived data allowed better understanding of the variables and processes involved in sedimentary budget.

Although this study provides a valuable perspective over local and possible regional patterns of sedimentary balance, the need for further elucidation of the submerged sector with

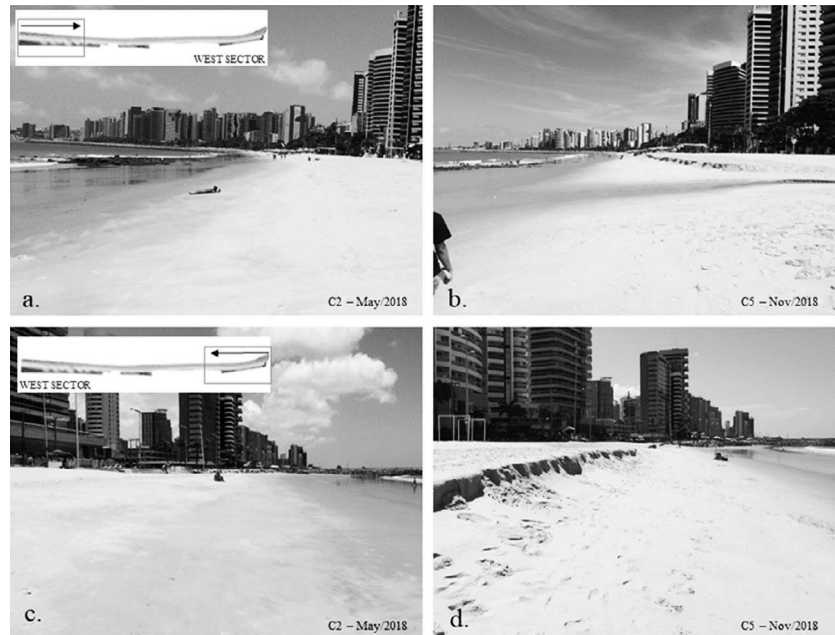


Figure 7. Visual topographic profile changes in two distinct portions of the West Sector during (a and c) C2, May 2018 and (b and d) C5, Nov 2018.

bathymetric surveys (Hallermeier, 1981), in order to fully understand sedimentary motion within the entire coastal system, is recognized.

CONCLUSIONS

Under the influence of Northeast Brazil's characteristic environmental conditions, the sedimentary balance of Fortaleza's foreshore and backshore is mainly affected by local wave regime variations. In this scenario, a strong correlation was identified between extratropical cyclone formation on the Northern Hemisphere and the incidence of high-energy waves on the northeastern Brazilian coast, with a mean response time of 4 days between apexes of mean sea level pressure (hPa) and H_s (m).

Local wave regimes presented a clear distinction throughout the year in terms of H_s (m) and T (s), in phase with factors of climatic seasonality and interhemispheric connection. The season of high-energy waves concentrated on the first semester, from January to April, with greater incidence of amplified swell waves and occurrence of more intense storm surges.

Between May and August, the predominance of sea waves and the action of characteristically strong winds revealed a decrease of interhemispheric connection influence, associated with maximum sedimentary accumulation rates.

The erosive tendency of the area during the survey period, represented by a sedimentary balance of 25.5% volumetric decrease, was mostly related to environmental conditions marked by longer wave periods and greater wave type variability. The immediate effect of storm surges in this context, despite the remarkable potential for abrupt modifications on local volumetric profile and granulometry, still requires more detailed elucidation—especially concerning the role of less intense swell waves in beach profile reconstruction.

Subtle granulometric variations indicate that the area is, most of the time, under a relative energetic balance. Disturbances in this system occur more intensively on the medium portion of superior backshore, highlighting the importance of monitoring this sector due to its relevance in the sedimentary mobilization process.

Table 6. Pearson's correlation coefficient (ρ) for significant height (H_s), resultant height (H_r), wave period (T), mean wind speed (W_{spd}), precipitation ($Prec$), total volume (V_{ACL}), mean level (ML), sea wave proportion (%sea) and swell wave proportion (%swell).

	H_s (m)	H_r (m)	T (s)	W_{spd} (m/s)	$Prec$ (mm)	V_{ACL} (m ³)	ML (m)	% sea	% swell
H_s (m)	1	0.875	0.764	-0.840	0.940	-0.239	-0.256	-0.509	0.509
H_r (m)		1	0.893	-0.615	0.744	-0.460	-0.516	-0.745	0.745
T (s)			1	-0.319	0.568	-0.504	-0.625	-0.935	0.935
W_{spd} (m/s)				1	-0.930	0.025	-0.061	0.001	-0.001
$Prec$ (mm)					1	-0.292	-0.239	-0.302	0.302
V_{ACL} (m ³)						1	0.977	0.638	-0.638
ML (m)							1	0.775	-0.775
% sea								1	-1
% swell									1

Correlation analysis showed that sedimentary variation occurs mainly as a function of wave–tide conditions. While wave period—and, consequently, its type—has strong influence, wave height alone does not follow the same tendency, which highlights the role of associated tide conditions.

To attend this objective and the general aim of this study, the application of direct and indirect methods was undoubtedly advantageous—highlighting changes in both large and local scale, in different chronological series.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the project “Study of coastal dynamics using a drone in 3D imaging associated with detailed monitoring of climatic variables—PIBIC UFC.” Moreover, we thank CNPq for the Research Productivity Fellowship (CNPq 309140/2018-8 Pinheiro L.), and FUNCAP for the DCR Fellowship (Claudino-Sales, V.) and Chief-Scientist Program and Science Initiation scholarship (Eduardo, L.M.).

LITERATURE CITED

- Alves, J.H.G.M., 2006. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling*, 11, 98–122.
- Barrar, N.F. and Ursell, F., 1948. The generation and propagation of ocean waves and swell—I. Wave periods and velocities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 240(824), 527–560.
- Bezerra, M.O.; Pinheiro, L.; and Morais, J.O., 2007. Shoreline Change of the Mucuripe Harbour Zones (Fortaleza-Ceará, Northeast Brazil) 1972–2003. In: Lemckert, C. (ed.), *ICS 2007 Proceedings (Gold Coast, Queensland, Australia) Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 50, pp. 1163–1167.
- Brunier, G.; Fleury, J.; Anthony, E.J.; Gardel, A. and Dussouillez, P., 2016. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology*, 261, 76–88.
- Bruun, P., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Waterways and Harbors Division*, 88, 117–130.
- Camargo, M.G., 2006. Sysgran: um sistema de código aberto para análise granulométrica do sedimento. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(2), 371–378.
- Carvalho, A.M., 2003. Dinâmica costeira entre Cumbuco e Matões-Costa NW do Estado do Ceará. Ênfase nos processos eólicos. Salvador, Brazil: Universidade Federal da Bahia, UFBA, Ph.D. dissertation, 188p.
- Casella, E.; Rovere, A.; Pedroncini, A.; Mucerino, L.; Casella, M.; Cusati, L.A.; Vacchi, M.; Ferrari, M., and Firpo, M., 2014. Study of wave run up using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 149, 160–167.
- Chen, G.; Chapron, B.; Ezraty, R., and Vandemark, D., 2002. A global view of swell and wind sea climate in the ocean by satellite altimeter and scatterometer. *American Meteorological Society*, 19, 1849–1859.
- Cheng, J.; Wang, P., and Guo, Q., 2016. Measuring beach profiles along a low-wave energy microtidal coast, west-central Florida, USA. *Geosciences*, 6(4), 44.
- Chung, J.C., 1982. Correlations between the tropical Atlantic trade winds and precipitation in northeastern Brazil. *Journal of Climatology*, 2(1), 35–46.
- Clarke, D.J. and Eliot, I.G., 1983. Mean sea-level and beach-width variation at Scarborough, Western Australia. *Marine Geology*, 51, 251–267.
- Claudino-Sales, V., 1993. Cenários litorâneos—Lagoa do Papicu, natureza e ambiente na cidade de Fortaleza, Ceará. São Paulo, Brazil: Universidade Federal de São Paulo, USP, Master’s thesis, 349p.
- Claudino-Sales, V.; Wang, P., and Carvalho, A.M., 2018. Interactions between various headlands, beaches and dunes along the coast of Ceara State, Northeast Brazil. *Journal of Coastal Research*, 34(2), 413–428.
- Cooper, J.A.G. and Pilkey, O.H., 2004. Sea level rise and shoreline retreat: Time to abandon the Bruun Rule. *Global and Planetary Change*, 43, 157–171.
- Dail, H.J.; Merrifield, M.A., and Bevis, M., 2000. Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing. *Marine Geology*, 162, 443–458.
- DNH. 2021. Centro de Hidrografia da Marinha. *Tabuas de Marê*. <https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>
- Drennan, W.M.; Graber, H.C.; Hauser, D., and Quentin, C., 2003. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. *Journal of Geophysical Research*, 30, 1–13.
- Dubois, R.N., 1988. Seasonal changes in beach topography and beach volume in Delaware. *Marine Geology*, 81, 79–96.
- Farias, E.G.G., 2012. Uso de dados obtidos por sensores orbitais ativos no estudo dos campos de ondas de superfície no Atlântico Norte Tropical. São José dos Campos, Brazil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Ph.D dissertation, 207p.
- Fechine, J.A.L., 2007. Alterações no perfil natural da zona costeira da cidade de Fortaleza, Ceará, ao longo do século XX. Fortaleza, Brazil: Universidade Federal do Ceará, Master’s thesis, 116p.
- Fisch, C.L., 2008. Caracterização do Clima de Ondas na Costa do Ceará. Rio de Janeiro, Brazil: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Master’s thesis, 231p.
- Folk, R.L. and Ward, W.C., 1957. Brazos River bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3–26.
- GFS. 2020. National Centers for Environmental Information. *Global Forecast System (GFS)*. <https://www.ndbc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
- Gonçalves, J.A. and Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal áreas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 101–111.
- Guerra, R.G.P., 2014. Vulnerabilidade costeira a eventos de alta energia no Litoral de Fortaleza, Ceará. Fortaleza, Ceará, Brazil: Universidade Federal do Ceará, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Master’s thesis, 103p.
- Hallermeier, R.J., 1981. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering*, 4, 253–257.
- Hamilton, G.D., 1992. Measurements of long-period, low-amplitude swell in the western North Atlantic. *American Meteorological Society*, 9, 645–658.
- Herrling, G. and Winter, C., 2014. Morphological and sedimentological response of a mixed-energy barrier island tidal inlet to storm and fair-weather conditions. *Earth Surface Dynamics*, 2, 363–382.
- Hinkle, D.E.; Wiersma, W., and Jurs, S.G., 2003. *Applied Statistics for the Behavioral Sciences*, 5th edition. Boston: Houghton Mifflin, 756p.
- INMET, 2020. INMET—*BDMEP* (Banco de Dados Meteorológicos do Instituto de Nacional de Meteorologia) <https://bdmep.inmet.gov.br/>
- Innocentini, V.; Cunha Prado, S.C.S.; Pereira, C.S.; Arantes, F.O., and Brandão, I.N., 2000. Marulhos no litoral norte do Brasil gerados por furacões: Caso de 24 de outubro de 1999. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 16(2), 177–186.
- IPECE, 2018. Perfil Municipal 2017. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará IPECE. Fortaleza. Ano I–janeiro de 2018.
- Köppen, W., 1936. Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W. and Geiger, R. (eds.), *Handbuch der Klimatologie*, Volume I, Part C. Berlin: Gerbrüder Borntraeger, 44p.
- Lima Filho, R.P.; Castelo Branco, M.P.N., and Pinheiro, L.S., 2019. Contribuição do rio Cocó e riacho Maceió na sedimentação da plataforma interna de Fortaleza-CE. *REGNE*, 5., 137–149.
- Maia, L.P., 1998. Procesos costeros y balance sedimentario a lo largo de Fortaleza (NE-Brasil): implicaciones para una gestión adecuada

- de la zona litoral. Barcelona: Universitat de Barcelona, Ph.D. dissertation.
- Maia, L.P.; Jimenez, J.A.; Serra, J., and Morais, J.O., 1998. The coastline of Fortaleza City. A product of environmental impacts caused by the Mucuripe Harbor. *Arquivos de Ciências do Mar*, 31, 93–100.
- Maia, L.P.; Jimenez, J.A.; Serra, J.; Morais, J.O., and Sanchez-Arcilla, A., 1996. The Fortaleza (NE Brazil) Waterfront: Port versus Coastal Management. *Journal of Coastal Research*, 14(4), 1284–1292.
- Mendes, D. and Mendes, M.D., 2004. Climatology of cyclones, anticyclones and storm tracks: Revision of concepts. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(2), 127–134.
- Miot da Silva, G.; Mousavi, S.M.S., and Jose, F., 2012. Wave-driven sediment transport and beach-dune dynamics in a headland bay beach. *Marine Geology*, 323–325, p.29–46.
- Morais, J.O., 1980. Aspectos do transporte de sedimentos no litoral do município de Fortaleza, Estado do Ceará, Brasil. *Arquivos de Ciências do Mar*, 20(1), 71–100.
- Morais, J.O., 1981. Evolução sedimentológica da enseada de Mucuripe (FortalezaCeará – Brasil). *Arquivos de Ciências do Mar*, 21(1), 19–46.
- Morais, J.O.; Pinheiro, L.; Pessoa, P.R.S.; Freire, G.S.; Carvalho, A.M.; Guerra, R.G.P.; Barros, E.L., and Moura, F.J.M., 2018. Ceará. In: Dieter Muehe. (Org.). *Panorama da Erosão Costeira no Brasil*. Volume 1, 1st edition. Brasília: MMA, pp. 261–289.
- Moura, M.R., 2012. Dinâmica costeira e vulnerabilidade à erosão do litoral dos municípios de Caucaia e Aquiraz, Ceará. Fortaleza, Brazil: Universidade Federal do Ceará, Master's thesis, 210p.
- Munk, W.H.; Miller, G.R.; Snodgrass, F.E., and Barber, N.F., 1963. Directional recording of swell from distant storms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 255, 505–584.
- Owens, E.H., 1977. Temporal variations in beach and nearshore dynamics. *Journal of Sedimentary Petrology*, 47, 168–190.
- Papakonstantinou, A.; Topouzelis, K., and Pavlogeorgatos, G., 2016. Coastline zones identification and 3D coastal mapping using UAV spatial data. *International Journal of Geo-Information*, 5(75).
- Paula, D.P.; Morais, J.O.; Ferreira, O., and Dias, J., 2015a. Análise histórica das ressacas do mar no litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. *Ressacas do Mar, Temporais e Gestão Costeira*. Fortaleza, Brazil: Editora Premium, pp. 173–201.
- Paula, D.P.; Morais, J.O.; Ferreira, O., and Dias, J., 2015b. De um simples porto a uma cidade convertida para o turismo: artificialização do litoral de Fortaleza-CE, Brasil. *O Homem e as Zonas Costeiras*, Tomo IV. Rio de Janeiro, Brazil: Rede BrasPor, Faperj.
- Pinheiro, L.S.; Coriolano, L.N.; Costa, M.F., and Dias, J.A., 2008. O Nordeste Brasileiro e a Gestão Costeira. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 8(2), 5–10.
- Pinheiro, L.S.; Morais, J.O., and Maia, L.P., 2016. The beaches of Ceará. In: Short, A.D. and Henrique da F. Klein, A. (eds.), *Brazilian Beaches System*. Coastal Research Library. Volume 1, 1st edition: Springer International Publishing, pp. 175–199.
- PNBOIA, 2021. Centro de Hidrografia da Marinha. *Dados PNBOIA*. <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia-mapa>
- Quartel, S.; Kroon, A., and Ruessink, B.G., 2008. Seasonal accretion and erosion patterns of a microtidal sandy beach. *Marine Geology*, 250, 19–33.
- Schwartz, M.L., 1967. The Bruun theory of sea-level rise as a cause of shore erosion. *The Journal of Geology*, 75(1), 76–92.
- Semedo, A.; Suselj, K.; Rutgersson, A., and Sterl, A., 2011. A global view on the wind sea and swell climate and variability from ERA-40. *American Meteorological Society*, 24, 1461–1479.
- Shepard, F.P., 1950. Beach cycles in southern California. *United States Beach Erosion Board*, Tech. Memo. No. 20, 26p.
- Short, A.D., 1980. Beach response to variations in breaker height. *Proceedings of Coastal Engineering Conference* (Sydney, Australia, 7th American Society of Civil Engineers), pp. 1016–1035.
- Silva, A.C.; Facanha, P.; Bezerra, C.; Araujo, A. and Pitombeiras, E., 2011. Características das ondas “sea” e “swell” observadas no litoral do Ceará-Brasil: variabilidade anual e inter-anual. *Tropical Oceanography*, 39(2), 123–132. Recife.
- Suguo, K., 1973. *Introdução a Sedimentologia*. São Paulo, Brazil: Edgard Blucher/EDUSP, 317p.
- Trigo, I.F.; Davies, T.D., and Bigg, G.R., 1999. Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. *Journal of Climate*, 12, 1685–1696.
- Utida, G.; Cruz, F.W.; Etourneau, J.; Bouloubassi, I.; Schefub, E.; Vuille, M.; Novello, V.F.; Prado, L.F.; Sifeddine, A.; Klein, V.; Zular, A.; Viana, J.C.C., and Turcq, B., 2019. Tropical South Atlantic influence on Northeastern Brazil precipitation and ITCZ displacement during the past 2300 years. *Scientific Reports*, 9(1), 1698.
- Vassie, J.M.; Woodworth, P.L., and Holt, M.W., 2004. An example of North Atlantic deep-ocean swell impacting ascension and St. Helena Islands in the central South Atlantic. *American Meteorological Society*, 21, 1095–1103.
- Vianna, M.L., 2000. Ressacas na costa norte do nordeste causadas por furacões extratropicais. In: IX Congresso Brasileiro de Meteorologia. Rio de Janeiro-RJ, pp. 2613–2619.
- Wentworth, C.K., 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *The Journal of Geology*, 30(5), 377–392.
- Yoo, C.I. and Oh, T.S., 2016. Beach volume change using UAV photogrammetry in Songjung Beach, Korea. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences—XXIII ISPRS Congress*, XLI-B8, 1201–1205.

Queries for coas-37-06-06

This article has been typeset from the submitted materials. Check proofs carefully for conversion or other inadvertent errors. Please follow the [Allen Press Guide to PDF Annotation](#) when marking revisions. Do not edit the PDF directly.

If present, queries will be listed below with corresponding numbers in the margins or may appear as PDF comments addressed to the author or editor. If a correction is desired in response to a query, mark the necessary changes directly in the proof using the appropriate annotation tool. If no change is desired, no action is necessary in response.