



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

CAIO ERICK BRAGA COSTA

**ANÁLISE DESCRITIVA DO PADRÃO DE ONDAS NO LITORAL DO CEARÁ ATRAVÉS
DE DADOS OBSERVADOS**

FORTALEZA

2019

CAIO ERICK BRAGA COSTA

ANÁLISE DESCRITIVA DO PADRÃO DE ONDAS NO LITORAL DO CEARÁ ATRAVÉS DE
DADOS OBSERVADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Física.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres
Teixeira

Coorientador: Prof. Dra. Ana Paula Morais
Krelling

FORTALEZA

2019

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)

C871a Costa, Caio Erick Braga.
ANÁLISE DESCRITIVA DO PADRÃO DE ONDAS NO LITORAL DO CEARÁ ATRAVÉS DE
DADOS OBSERVADOS / Caio Erick Braga Costa. – 2019.
76 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do
Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

Coorientação: Profa. Dra. Ana Paula de Moraes Krelling.

1. Regime de Ondas. 2. Ondas swell. 3. WAVEWATCH III. 4. Oceanografia Física. I. Título.

CDD 551.46

CAIO ERICK BRAGA COSTA

ANÁLISE DESCRITIVA DO PADRÃO DE ONDAS NO LITORAL DO CEARÁ ATRAVÉS DE
DADOS OBSERVADOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Oceanografia do Instituto de Ciências do Mar da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Oceanografia. Área de concentração: Oceanografia Física.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Ana Paula Morais Krelling (Coorientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Msc. Izabel Christina Martins Nogueira
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Aos meus pais, Marcos e Maria.

Amo vocês!

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), pelo apoio financeiro dado através da bolsa de Iniciação Científica, sem a qual este trabalho não seria possível.

À minha querida Prof. Dra. Ana Paula, que foi uma das maiores educadoras que passou em minha vida. Obrigado por toda a preocupação, palavras otimistas, e por sua excelente orientação.

Ao Prof. Dr. Carlos Teixeira, por aceitar ser meu orientador oficial, por ter contribuído intensamente para meu processo de formação em sala de aula e no Laboratório de Oceanografia Física.

À Izabel Nogueira, por ter aceitado participar da minha banca e enriquecer este trabalho com diversas considerações.

À Marinha do Brasil pela disponibilidade de dados tão importantes para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, que por toda a minha vida, que sempre procuraram me proporcionar o melhor, sempre investindo em minha educação e possibilitando ser uma pessoa melhor.

À minha querida companheira, amiga e namorada, Nayara Simões, por todo o carinho, cuidado e compreensão ao longo dessa jornada, por sempre me apoiar e me ajudar a tomar as melhores decisões. Você é luz e fonte de inspiração para mim. Obrigado por tudo!

Aos meus amigos Levi Magalhães e Hailla Krulicoski, por demonstrar sempre preocupação com minhas noites de sono mal dormidas e pela adorável companhia.

Aos meus amigos do LOF, Bárbara, Rafael, Vitória, Gustavo, Ivo, Tiffany por todo o apoio ao longo do ano.

Ao Maracatu Solar e ao Grupo Casa Caiada, por toda a musicalidade, a vivência, os afetos, os aprendizados e descobertas que me permitiram também encontrar ótimos momentos de descanso e distração em dias difíceis.

À todas/os as/os professores e funcionários do Labomar que de alguma forma passaram pela minha formação e fizeram parte desse período de intenso aprendizado.

À todas/os minhas/meus amigas/os que fiz na graduação ao longo desses quatro anos. Todos vocês são e foram especiais.

Ao Prof. Fera, por acreditar no surf como ferramenta de educação e transformação social.

Ao Fênix, grande guerreiro, trabalhou duro durante horas inclusive nos finais de semana.

Ao querido Pandas, meu muito obrigado! Sem você este trabalho não teria sido possível em tão curto tempo.

Por último, gostaria de agradecer a mim, por não ter desistido quando pensei em desistir, pela persistência mesmo com todas as dificuldades e as noites não dormidas. Parabéns Caio, você fez o seu melhor e merece isso! (Risos)

*“A cantar, na maré que vai
E na maré que vem
Do fim, mais do fim, do mar
Bem mais além
Bem mais além do que o fim do mar
Bem mais além”*

Vinicius de Moraes e Baden Powell

RESUMO

Ondas são perturbações causadas na interface entre fluidos de diferentes densidades causadas pelo movimento de energia proveniente de uma fonte geradora, existindo uma variedade de ondas diferentes no oceano. As ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento são ondas que se propagam na interface entre a atmosfera e o oceano e possuem papel fundamental, sendo um dos principais agentes oceanográficos atuantes na zona costeira. Assim, o conhecimento sobre o regime de ondas atuante no estado do Ceará é determinante para um melhor conhecimento sobre eventos de alta energia associados à ressaca do mar. Para a realização do presente trabalho, foi realizado um levantamento de dados observados de uma bóia situada próxima do litoral do Ceará (3° 43' S e 38° 32' W), sendo caracterizado o regime de ondas *sea* e *swell* atuantes em um período de um ano de coleta, correspondendo de dezembro de 2016 a novembro de 2017. Foi realizado um estudo comparativo com resultados provenientes do modelo de ondas WAVEWATCH III no intuito de aferir sua eficiência quanto à representação do regime de ondas na região. Para todos os parâmetros de onda e vento, foram observados variações sazonais, corroborando com informações já conhecidas. Foram observados variações na direção e intensidade do vento nos meses em que a ZCIT encontrou-se em sua posição mais ao sul. Variações de Hs e Hmax foram observadas ao longo do ano, indicando maiores alturas de onda no período de intensificação dos ventos alísios. Variações de pequena escala temporal na intensidade e direção de vento relacionada à brisas marítimas e terrestres foram observadas ao longo da série, influenciando diretamente sobre o padrão de incidência de ondas na região. As ondas tipo *swell* foram observadas em praticamente toda a série, com maiores ocorrências entre dezembro e abril, sendo observadas uma maior ocorrência de ondas de Norte para períodos superiores a 15 segundos. Em relação a anos anteriores, foi constatado um aumento de ondas do tipo *swell* e maiores períodos de pico foram observados ao longo da série. Para os resultados do WAVEWATCH III, as direções de onda e direções e intensidades do vento não foram bem representadas pelo modelo, sendo melhor correlacionados com os dados observados no segundo semestre do ano. Já o período de pico e altura significativa de onda foram melhor representados pelo modelo numérico durante o primeiro semestre de 2017.

Palavras-chave: Regime de Ondas, Ondas *swell*, Ceará, WAVEWATCH III, Oceanografia Física

ABSTRACT

Waves are disturbances caused at the interface between fluids of different densities caused by the movement of energy from a generating source, with a variety of different waves in the ocean. Wind-generated waves are waves that propagate at the interface between the atmosphere and the ocean and play a fundamental role, being one of the main oceanographic agents acting in the coastal zone. Thus, knowledge about the wave regime acting in the state of Ceará is crucial for a better knowledge about high energy events associated with storm wave action. To carry out this work, a data survey was conducted observed from a nearby situated buoy Ceará coast (3 43's and 38 32 'W), being characterized in that the system of bone and *swell* waves acting in a period of a year of collection, corresponding December 2016 to November 2017. A comparative study was carried out with results from the WAVEWATCH III wave model in order to gauge its efficiency regarding the representation of the wave regime in the region. For all wave and wind parameters, seasonal variations were observed, corroborating with known information. Variations in wind direction and intensity were observed in the months when ITCZ was in its southernmost position. Variations of Hs and Hmax were observed throughout the year, indicating higher wave heights in the trade wind intensification period. Small temporal scale variations in wind intensity and direction related to sea and land breezes were observed throughout the series, directly influencing the wave incidence pattern in the region. The *swell* waves were observed in practically the whole series, with higher occurrences between December and April, with a higher occurrence of North waves with larger peak periods up to 15 seconds. Compared to previous years, an increase of *swell* waves was observed and larger peak periods were observed throughout the series. For the WAVEWATCH III results, the wave directions and wind directions and intensities were not well represented by the model, being better correlated with the data observed in the second half of the year. The peak period and significant wave height were better represented by the numerical model during the first half of 2017.

Keywords: Wave Regime, *Swell* waves, Ceará, WAVEWATCH III, Physical Oceanography

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Transferência de energia na superfície do mar provocada pelo vento.	19
Figura 2	Bóia da fabricante <i>Axys Technologies Inc.</i> localizada na quebra da plataforma continental do Ceará.	27
Figura 3	Mapa da área de estudo com localização da bóia do PNBOIA (em laranja) e dos pontos da grade mais próximos do WAVEWATCH III (pontos pretos), juntamente com o ponto de grade mais próximo escolhido para realização das comparações (ponto verde).....	30
Figura 4	Série temporal de Velocidade de Vento entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017, onde a linha preta representa os valores médios encontrado em cada mês.	33
Figura 5	Histograma de distribuição de Velocidade do Vento entre (a) fevereiro, março e abril e (b) agosto, setembro e outubro de 2017.	33
Figura 6	Série temporal de Direção de Vento entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017.	35
Figura 7	Direção e Velocidade do Vento no período de (a) fevereiro, março e abril e (b) agosto, setembro e outubro de 2017.	35
Figura 8	Série temporal de Direção de Vento durante os meses de (a) fevereiro a abril e (b) agosto a outubro de 2017.	36
Figura 9	Variação horária média de Direção e Velocidade do Vento nos meses de agosto, setembro e outubro de 2017. (a) Variação horária média da direção de incidência dos ventos. (b) Variação horária média de intensidade do vento. A linha preta indica a média mensal de direção e intensidade de vento encontrada nos respectivos meses.	37
Figura 10	Série temporal de Período de Pico (T_p) entre dezembro de 2016 e novembro de 2017. A linha preta representa a média de T_p encontrada em cada mês.	39
Figura 11	Histograma de Período de Pico para os meses de dezembro a maio (amarelo) e junho a novembro (azul) de 2017.	40
Figura 12	Série temporal de Direção de Onda entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017.	42
Figura 13	Série temporal de Direção de Vento entre dezembro de 2016 e novembro de 2017 (cor cinza) e Direção de Onda (cor azul), com destaque para o período com maior ocorrência de ondas tipo sea.	42

Figura 14	Gráfico de variação diária com médias horárias de Direção de Vento (a) e direção de onda (b) nos meses de agosto, setembro e outubro de 2017. A linha preta indica a média mensal de direção de vento e onda encontrada nos respectivos meses.	44
Figura 15	Esquema representativo de Direção de Onda e vento médio mensal entre dezembro de 2016 e novembro de 2017. Ondas formadas pelo vento local ocorrem com maior predominância entre julho e outubro.	44
Figura 16	Direção de onda e Período de Pico entre ondas do tipo (a) sea e (b) swell entre dezembro de 2016 e novembro de 2017.	45
Figura 17	Direção de Ondas tipo swell com (a) período de pico abaixo de 15 segundos e (b) período de pico superiores a 15 segundos.	46
Figura 18	Direção de Ondas em diferentes épocas do ano relacionadas com Tp (lado esquerdo) e Hs (lado direito). Lado esquerdo: direções de onda relacionadas com período de pico, onde as cores azuis representam ondas sea e as cores vermelhas indicam ondas swell. Lado direito: direções de ondas relacionadas com altura significativa (Hs).	47
Figura 19	Série temporal com médias mensais de Altura Máxima (azul escuro) e Altura Significativa (azul claro) entre dezembro de 2016 e novembro de 2017.	49
Figura 20	Série temporal de Altura Significativa observada entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017 com destaque para as ondas tipo <i>swell</i> (preto). As ondas do tipo <i>sea</i> estão em azul. Médias mensais são encontradas em linha contínua (azul).	50
Figura 21	Altura Significativa de onda entre dezembro de 2016 e maio de 2017. As ondas tipo <i>swell</i> estão representadas por pontos pretos, e as tipo <i>sea</i> por pontos azuis. As ondas com direções entre 340° e 40° estão destacadas em cor rosa.	51
Figura 22	Série temporal de Período de Pico (painel superior), Altura Significativa e Altura Máxima (painel central) e Direção de Onda (painel inferior) para o mês de janeiro de 2017. A linha vermelha no gráfico de período de pico marca o limite entre ondas <i>sea</i> e ondas <i>swell</i>	53
Figura 23	Matéria do Jornal O Povo intitulada “Marinha do Brasil emite alerta para risco de ressaca no litoral cearense” no dia 30 de março de 2017.	54
Figura 24	Série temporal de Período de Pico (painel superior), Altura Significativa e Altura Máxima (painel central) e Direção de Onda (painel inferior) para o mês de abril de 2017. A linha vermelha no gráfico de período de pico marca o limite entre ondas <i>sea</i> e ondas <i>swell</i>	54

Figura 25	Matéria do Jornal O Povo intitulada “Marinha do Brasil emite alerta para risco de ressaca no litoral cearense” no dia 06 de outubro de 2017.	56
Figura 26	Representação do plano cartesiano, onde o eixo X corresponde à componente U (intensidade e direção leste-oeste), e o eixo Y representa a componente V (intensidade e direção norte-sul).	57
Figura 27	Série temporal da Componente U do Vento e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (pontos azul) e dos resultados do WW3 (pontos preto) entre janeiro e dezembro de 2017.	59
Figura 28	Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados da Componente U do Vento do WW3 e os dados do PNBOIA entre janeiro e dezembro de 2017. Para o painel superior, valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação. Para o painel inferior, valores acima da linha preta indicam subestimação do modelo.	59
Figura 29	Médias mensais da Componente U do Vento dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e dezembro.	60
Figura 30	Série temporal da Componente V do Vento dos dados observados (pontos azul) e dos resultados do WW3 (pontos preto) entre janeiro e dezembro de 2017.	61
Figura 31	Médias mensais da Componente V do Vento dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e dezembro de 2017.	61
Figura 32	Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados da Componente V do Vento do WW3 e os dados do PNBOIA. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação.	62
Figura 33	Série temporal de Período de Pico e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (linha azul) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e novembro de 2017.	63
Figura 34	Série temporal de Período de Pico dos dados observados (linha azul) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e maio, período de maior concordância entre o WW3 e os dados observados para período de pico entre janeiro e maio de 2017.	64

Figura 35	Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados de Período de Pico do WW3 e os dados do PNBOIA entre janeiro e novembro de 2017. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação.	64
Figura 36	Médias mensais de Período de Pico dos dados observados (linha azul) e dos dados provenientes do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.	65
Figura 37	Relação entre Direção de Onda e Período de Pico. Os gráficos do lado esquerdo (a) são resultados dos dados observados, enquanto os gráficos do lado direito (b) são resultados do WAVEWATCH III entre janeiro e novembro de 2017.	66
Figura 38	Série temporal de Direção de Ondas do tipo swell dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.	67
Figura 39	Série temporal de Direção de Onda e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e novembro de 2017.	67
Figura 40	Médias mensais de Direção de Onda dos dados observados (linha azul) e dos resultados do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.	68
Figura 41	Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados de direção de onda do WW3 e os dados do PNBOIA. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação.	68
Figura 42	Série temporal de Altura Significativa e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (pontos azul) e dos dados provenientes do WW3 (pontos preto) entre janeiro e novembro de 2017.	70
Figura 43	Médias mensais de Altura Significativa dos dados observados (linha azul) e dos dados provenientes do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.	71

Figura 44 Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os dados de Altura Significativa do WW3 e os dados do PNBOIA entre janeiro e novembro de 2017. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indica superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Padronização dos quadrantes de direção de incidência de vento e onda.	31
Tabela 2	Síntese das principais frações de T_p observadas no presente trabalho (anos analisados: dezembro de 2016 a novembro de 2017) e em Vieira <i>et al.</i> (2007) (anos analisados: 1997, 2000 e 2001).	40
Tabela 3	Comparação entre direção de onda do presente trabalho e de Vieira <i>et al.</i> (2007).	48
Tabela 4	Medidas estatísticas para os resultados do WAVEWATCH III(a) e do PNBOIA (b).	73
Tabela 5	Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Coeficiente de Correlação de Pearson (r).	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CHM	Centro de Hidrografia da Marinha
Dp	Direção de Onda
GFS	<i>Global Forecast System</i>
Hs	Altura Significativa de Onda
Hmax	Altura Máxima de Onda
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NE	Nordeste
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NW	Noroeste
Tp	Período de Pico
PNBOIA	Programa Nacional de Bóias
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
SE	Sudeste
SW	Sudoeste
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
WW3	<i>WAVEWATCH III</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	ÁREA DE ESTUDO	23
3	OBJETIVOS	25
3.1	Geral	25
3.2	Específicos	25
4	METODOLOGIA	26
4.1	Dados observacionais	26
4.2	Resultados de modelagem numérica	28
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	ANÁLISE DOS DADOS OBSERVACIONAIS	32
5.1.1	<i>Velocidade do Vento</i>	32
5.1.2	<i>Direção do Vento</i>	34
5.1.3	<i>Período de Pico</i>	38
5.1.4	<i>Direção de Onda</i>	41
5.1.5	<i>Altura Significativa e Altura Máxima</i>	49
5.1.6	<i>Identificação de Ondas Swell</i>	52
5.1.6.1	<i>Primeiro Evento (Janeiro de 2017)</i>	52
5.1.6.2	<i>Segundo Evento (Março/Abril de 2017)</i>	53
5.1.6.3	<i>Terceiro Evento (Outubro de 2017)</i>	55
5.2.	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DO WAVEWATCH III	57
5.2.1	<i>Análise do Vento</i>	57
5.2.1.1	<i>Componente U do Vento</i>	58
5.2.1.2	<i>Componente V do Vento</i>	60
5.2.2	<i>Período de Pico</i>	63
5.2.3	<i>Direção de Onda</i>	66
5.2.4	<i>Altura Significativa</i>	70
6	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Ondas são perturbações causadas na interface entre dois fluidos de diferentes densidades causadas pelo movimento de energia proveniente de uma fonte geradora. Nos oceanos existem diversos tipos, como por exemplo, as ondas superficiais que se propagam na superfície do mar, as ondas sonoras, as ondas internas formadas entre diferentes densidades na coluna d'água, ondas formadas por atividade tectônica conhecidas como "tsunamis", ou as ondas de maré formadas pela atração gravitacional dos astros. Assim, diferentes fontes de energia podem formar diferentes tipos de ondas no oceano.

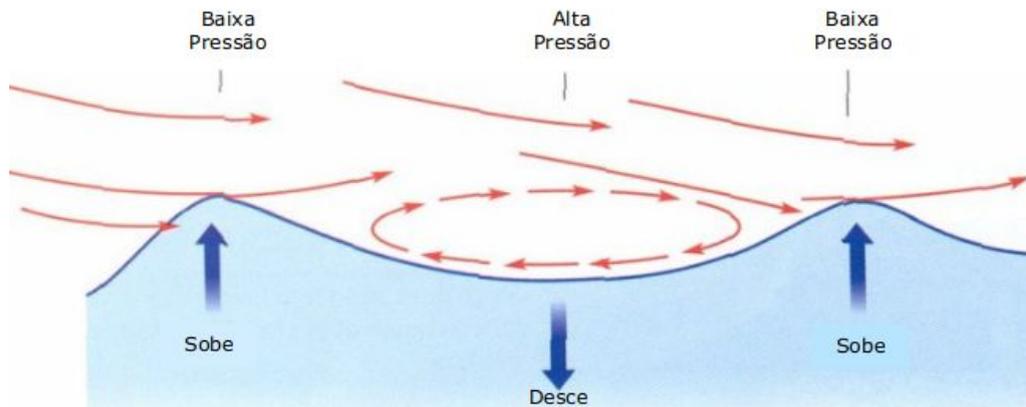
As ondas oceânicas podem ser classificadas de acordo com sua força perturbadora, pela força restauradora e pelo seu comprimento de onda (GARRISON, 2016). A força perturbadora é responsável por fornecer energia para formar a onda, enquanto as forças restauradoras atuam reduzindo sua energia, achatando a superfície da água depois de sua formação e propagação e restaurando seu equilíbrio.

O objeto de estudo do presente trabalho são as ondas superficiais de gravidade, que se propagam na interface entre o oceano e a atmosfera. Essas ondas possuem como força perturbadora a ação dos ventos que atuam sobre a superfície oceânica, onde a gravidade atua como sua principal força restauradora. Um fator importante para o desenvolvimento de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento é (1) a intensidade do vento sobre a superfície; 2) duração do período de tempo em que o vento atua; e 3) pista (ou *fetch*), ou extensão da área de atuação do vento (VIEIRA *et al.*, 2007).

As ondas superficiais de gravidade são formadas pelo atrito do vento que atua transferindo energia para a superfície do mar. O vento, ao soprar sobre a superfície oceânica, transfere quantidade de movimento para o mar e atua pressionando e deformando a superfície da água formando uma ondulação (RICARTE, 2007) (Figura 1).

As principais características de uma onda são crista, cavado ou vale, altura, comprimento, período e frequência. A crista é a parte mais alta da onda acima do nível do mar, e o vale é a parte mais baixa da onda abaixo do nível do mar. A altura de onda é considerada como a distância vertical entre uma crista de onda e um vale. O comprimento de onda é dado pela distância horizontal entre dois vales, ou duas cristas consecutivas. O período é considerado como o tempo necessário para uma onda se deslocar por uma distância equivalente ao seu comprimento de onda, enquanto a frequência considera o número de ondas que passam por segundo por um ponto fixo (GARRISON, 2016).

Figura 1: Transferência de energia na superfície do mar provocada pelo vento.



Fonte: Thurman, H.V. & Trujilo, A. P. *apud* RICARTE (2007)

As principais características de uma onda são crista, cavado ou vale, altura, comprimento, período e frequência. A crista é a parte mais alta da onda acima do nível do mar, e o vale é a parte mais baixa da onda abaixo do nível do mar. A altura de onda é considerada como a distância vertical entre uma crista de onda e um vale. O comprimento de onda é dado pela distância horizontal entre dois vales, ou duas cristas consecutivas. O período é considerado como o tempo necessário para uma onda se deslocar por uma distância equivalente ao seu comprimento de onda, enquanto a frequência considera o número de ondas que passam por segundo por um ponto fixo (GARRISON, 2016).

A propagação de ondas sobre a superfície oceânica possui diferentes comportamentos dependendo da região, quando boa parte de suas características dependem da relação entre seu comprimento e a profundidade da coluna d'água. A altura de onda varia de acordo com a profundidade, obstáculos ou mesmo pela interferência com outras ondas. Dessa forma, as ondas oceânicas podem assumir características diferentes de acordo com a profundidade da coluna d'água.

Sobre a sua formação, as ondas superficiais que são geradas por influência do vento local são denominadas de vaga ou *wind sea*, ou apenas ondas tipo *sea*, sendo caracterizadas por períodos de pico inferiores a 9 segundos, enquanto as ondas do tipo marulho, também conhecidas como ondas do tipo *swell*, são caracterizadas por períodos superiores à 9 segundos (POND & PICKARD, 2005), propagando-se para fora de sua zona de geração, não recebendo mais energia do vento. A propagação de ondulações com diferentes períodos e comprimentos de onda permite que as ondas viagem com diferentes velocidades. Desta forma, campos de ondas gerados por um mesmo evento gerador podem

atingir a costa em tempos distintos, em decorrência dos seus diferentes comprimentos, onde as ondas com maiores períodos propagam-se com maiores velocidades. Este fenômeno é conhecido como chegada dispersiva de onda (MELO, 1995).

A localização e espacialidade da costa do Nordeste influencia diretamente no padrão de ondas geradas tanto localmente (ondas *sea*) como remotamente (ondas *swell*). As ondas do tipo *sea* são predominantemente formadas pela ação dos ventos alísios influenciados pela sazonalidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), enquanto as ondas tipo *swell*, são originadas remotamente por consequência de eventos meteorológicos distantes.

Um importante mecanismo de geração das ondas superficiais de gravidade é a ocorrência de sistemas meteorológicos distantes, como ciclones extratropicais no Atlântico Norte, que atuam remotamente na formação das ondas do tipo *swell* que alcançam o litoral do Ceará. Melo et al. (1995), identificou condições atmosféricas propícias para a geração de chegadas dispersivas de ondas *swell* na costa do Ceará formadas no Atlântico Norte. Análises indicaram possíveis áreas de formação de ondas *swell* próximo da região próximo à região dos Açores, em latitudes de até 60° N durante o verão do Hemisfério Sul (MELO et al., 1995). Segundo Innocentini (2005), ciclones extratropicais formados no Hemisfério Norte durante o inverno boreal são capazes de gerar ondas que chegam no litoral norte do Nordeste, nos meses de dezembro e março. Em trabalho de Vieira (2016), regiões no Atlântico Norte a mais de 5000 km de distância da costa cearense, entre 35 N e 65 N, são identificadas como áreas formadores de campos de onda *swell* que chegam na costa cearense, corroborando com o estudo de Melo et al. (1995).

Na costa do Ceará, ondas do tipo *swell* são frequentemente causadoras de eventos extremos associados à ressacas do mar. Segundo Bitencourt et al. (2002), o fenômeno de ressaca diz respeito ao aumento do nível do mar provocado pela elevação da maré astronômica e/ou maré meteorológica, acompanhado por ondas com amplitude maior que o normal. (PAULA et al., 2011), refere-se à ressacas no litoral do Ceará como a entrada de ondas de longo período que provocam elevação do nível do mar e erosão costeira associada à inundações gerada pela ação de tempestades.

Desta forma, pode-se entender que as ressacas no litoral do cearense estão associadas à elevação do nível do mar relacionada às variações de maré, juntamente com a entrada de ondas de longo período ou ondas com alturas maiores que o normal, induzindo inundações na costa, eventos erosivos em praias e dunas ou destruição de estruturas costeiras. Assim, o conhecimento sobre o

regime de ondas atuante no estado do Ceará é determinante para um melhor conhecimento sobre eventos de alta energia associados à ressaca do mar.

Isto posto, o regime de ondas contribui diretamente para os processos costeiros, onde juntamente com o regime de marés e influência dos ventos, atua na formação de um ambiente altamente dinâmico. As ondas podem contribuir de maneira significativa na mobilização de sedimentos, circulação costeira e transporte de sedimentos na zona costeira (Almeida, et al. 2015).

Além disso, em consequência da intensa atividade petrolífera na costa brasileira e em certas regiões do litoral do Ceará (em menor intensidade), a determinação das principais características das ondas é de suma importância para a engenharia oceânica e costeira, exercendo grande influência sobre estruturas marinhas como plataformas de petróleo, portos, molhes, espigões, quebra-mares, entre outros.

A ausência de um planejamento da ocupação e estruturação urbana na zona costeira devido à ausência do conhecimento sobre o regime de ondas em uma região costeira pode significar impactos negativos sobre o litoral, causando perda de estruturas urbanas ou danos físicos provocados por ressacas do mar, como é o caso do litoral do Ceará. Além disso, inúmeras atividades econômicas na região, como atividade portuária, turismo, pesca, navegação e lazer, são diretamente influenciadas por condições costeiras e oceânicas associadas às ondas superficiais (FISCH, 2008).

Portanto, o conhecimento dos processos costeiros e oceanográficos é essencial para auxiliar não só atividades marinhas, como obras de engenharia costeira, exploração de recursos naturais, navegação marítima e outras atividades aquáticas, mas também pode contribuir no entendimento da dinâmica litorânea para um melhor planejamento da ocupação urbana em áreas litorâneas. Conhecer as principais características de onda, como altura, direção e período de pico, são fundamentais para a compreensão sobre os processos hidrodinâmicos atuantes no litoral, sobretudo para contribuir para um melhor embasamento e tomada de decisão sobre atividades relacionadas à zona costeira.

Apesar dos avanços e do grande esforço por parte da comunidade científica, trabalhos sobre o regime de ondas ainda são escassos em todo o litoral brasileiro principalmente devido à ausência de dados observacionais de longo período. Tal fato leva à utilização da modelagem numérica de ondas para a caracterização do clima de ondas em diversas regiões do país, como nos trabalhos de

Candella (1997), Alves (2006), Alves, *et al.* (2008), Pianca, *et al.* (2010), Nogueira (2014), entre outros.

No intuito de conduzir melhores entendimentos sobre características associadas à ocorrências de ondas no litoral cearense a partir de dados observados, diversos autores como Pitombeira (1976), Melo *et al.* (1995), Vieira *et al.* (2007), Ricarte (2007), Fisch (2008), Silva *et al.* (2011) e Farias (2012), foram hábeis na contribuição de um melhor entendimento sobre a temática. Através dos registros entre 1997 e 2001 de um ondógrafo do tipo Waverider instalado ao largo do Porto do Pecém, os trabalhos de Vieira *et al.* (2007), Ricarte (2007), Fisch (2008) e Silva *et al.* (2011), por exemplo, caracterizam o clima de ondas encontradas no litoral do Ceará através de uma série temporal de dados obtida há quase 20 anos.

Como visto, a costa cearense ainda carece de estudos utilizando dados observacionais de ondas provenientes de um longo período de medição e coleta de dados, o que contribui para um desconhecimento sobre diversos aspectos oceanográficos determinantes para a região. Desta forma, escassez de dados sobre ondas no estado do Ceará, leva a realização de estudos relacionados à ondas e dinâmica costeira à partir de dados provenientes de modelagem numérica, como é o caso de Sampaio (2014), Aquino (2016) e Vieira (2016).

A ausência de informações sobre ondas de dados observacionais, juntamente com o avanço computacional cada vez mais acessível, tem tornado modelos numéricos uma alternativa à escassez de dados medidos *in-situ*. Vieira (2016), por exemplo, realiza um estudo utilizando saídas do modelo global WAVEWATCH III, no intuito de identificar áreas geradoras de ondas do tipo *swell* incidentes sobre a costa do estado do Ceará. Apesar dos avanços, a dificuldade de representação das principais características do regime de ondas através da modelagem numérica ainda é um desafio para os modelos de geração e propagação de ondas, onde a escassez de dados observados contribui para a dificuldade de verificação da confiabilidade dos resultados gerados. Assim, pretende-se também realizar uma comparação das saídas de um modelo numérico global de geração de ondas com os dados observacionais caracterizados neste trabalho.

Dito isto, este trabalho tem como finalidade contribuir para o preenchimento desta lacuna de conhecimento sobre o regime de ondas no Ceará, de maneira ainda preliminar, trazendo uma análise descritiva de dados observados em um período de um ano obtidos através de observações realizadas entre 2016 e 2017, sendo os últimos dados medidos por um longo período de coleta suficiente para observar sazonalidades no padrão de ondas na costa do Ceará.

2 **ÁREA DE ESTUDO**

A presente área de estudo está localizada na região Nordeste (NE) do Brasil, e corresponde ao litoral do estado do Ceará. No respectivo litoral, está presente a capital de Fortaleza, situada em 3° 43' S e 38° 32' W, caracterizada como uma município costeiro com forte ocupação urbana, com 366,69 quilômetros quadrados (km²) e uma densidade demográfica de 7.786,44 habitantes/km² (IBGE), com intensa ocupação na zona costeira e diversas atividades econômicas em seu litoral.

A região submersa do litoral cearense é caracterizada por apresentar uma plataforma continental com baixa declividade, típica de uma margem continental do tipo passiva, com profundidades elevadas em regiões mais distantes da costa (VIEIRA, 2016).

Na região Nordeste, um dos principais mecanismos atmosféricos atuantes que influenciam diretamente na formação das ondas incidentes no litoral, diz respeito à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que pode ser definida como uma região de nuvens presente na região equatorial, influenciada principalmente pela confluência dos ventos alísios do hemisfério sul em baixos níveis, formando uma zona de baixa pressão atmosférica com intensa atividade convectiva e precipitação (FERREIRA, 2005).

Segundo Xavier et. al (2000), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) encontra-se em sua posição mais ao norte entre os meses de setembro e novembro, em alguns anos podendo chegar a latitude de 14° N. Esse deslocamento da ZCIT mais ao norte aumenta a pista dos ventos e contribui com uma maior intensificação dos ventos alísios de Sudeste, levando a um aumento das velocidades observadas entre os meses de agosto e outubro.

Estudos sugerem que, em geral, há uma interação entre a ZCIT com outros sistemas meteorológicos atuantes no Nordeste durante o verão no Hemisfério Sul, correspondendo aos meses chuvosos, como os Distúrbios Ondulatórios de Leste e formação de Linhas de Instabilidade na costa norte brasileira (MELO, et al., 2002). Além desses mecanismos, Complexos Convectivos de Mesoescala podem ser observados durante os primeiros meses da primavera e do verão no hemisfério sul (FERREIRA, 2005), interagindo com a ZCIT quando localizada em sua posição mais ao sul.

Melo et al. (2002) ressaltam que estudos observacionais têm apontado a interação da ZCIT com outros sistemas meteorológicos que atuam na região do Nordeste durante o este período, como Distúrbios Ondulatórios de Leste e a formação de Linhas de Instabilidade. Melo et al. (2002) destaca ainda a interação da ZCIT com sistemas meteorológicos atuantes em altos níveis, como Cavados e Vórtices Ciclônicos.

3 OBJETIVOS

3.1 Geral

Descrever o padrão de ondas no litoral do estado do Ceará para o período dezembro de 2016 a novembro de 2017 através de dados observados, e analisar a confiabilidade de um modelo global de ondas.

3.2 Específicos

1. Analisar a variabilidade sazonal dos principais aspectos do regime de ondas na região
2. Identificar e caracterizar a chegada dispersiva de ondas do tipo *swell*
3. Realizar uma comparação qualitativa com trabalhos pretéritos
4. Comparar os dados observados com resultados do modelo global WAVEWATCH III para a região costeira do estado do Ceará

4 METODOLOGIA

Para o presente trabalho, serão utilizados dois conjuntos de informações, um proveniente de dados observacionais, e outro proveniente de resultados de modelagem numérica. Adiante, será discutido com mais detalhes sobre as bases de dados utilizadas neste estudo.

4.1 Dados Observacionais

O Programa Nacional de Bóias (PNBOIA) tem como objetivo disponibilizar dados meteorológicos e oceanográficos do oceano Atlântico através de uma rede composta por bóias fundeadas e bóias de deriva rastreadas por satélite ao longo do litoral brasileiro. Tendo em vista a carência de dados e informações sobre a região oceânica do Oceano Atlântico Sul, o PNBOIA se torna a primeira iniciativa brasileira com a proposta de monitoramento operacional de diversas variáveis meteoceanográficas.

O projeto, que é mantido pela Marinha do Brasil juntamente com outras instituições de pesquisa, conta com uma rede com o total de 14 bóias fundeadas ao longo do litoral brasileiro, sendo 3 localizadas na região Nordeste, 7 na região Sudeste e 4 na região Sul do país. Até a redação deste trabalho, apenas 2 bóias se encontravam em operação.

Para a realização do presente trabalho, foi realizado um levantamento de dados observados de uma bóia do PNBOIA para uma análise e caracterização do padrão de ondas no litoral do estado do Ceará, a partir de uma série de dados correspondendo ao período de dezembro de 2016 a novembro de 2017, compreendendo um ano de dados. Também foi realizado uma comparação com trabalhos anteriores que utilizaram registros históricos de ondas na região do Terminal Portuário do Pecém. A bóia de Fortaleza, escolhida para a realização deste trabalho, se encontra em manutenção, estando disponíveis dados históricos de 18/11/2016 a 04/12/2017.

A bóia da fabricante *Axys Technologis Inc.* é do modelo *3-Meters (3M)*, pesa 1500 kg, e conta com sensores para medição de pressão atmosférica, vento, temperatura, umidade, radiação solar, correntes oceânicas e ondas (Figura 2). A bóia realiza a medição de diversas variáveis oceanográficas e meteorológicas durante 20 minutos a cada hora do dia. Posteriormente, há o processamento dos dados e o envio via satélite, totalizando 24 medições por dia.

Figura 2: Bóia da fabricante *Axys Technologies Inc.* localizada na quebra da plataforma continental do Ceará



Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha (CHM)

A respectiva boia se encontra próxima à cidade de Fortaleza, a uma distância de 55 km do litoral cearense, nas coordenadas $3^{\circ} 12' S$ de latitude e $38^{\circ} 25' W$ de longitude, fundeada na quebra da plataforma continental do estado do Ceará em uma profundidade de aproximadamente 200 m. A série temporal foi obtida através do *site* do CHM (Centro de Hidrografia da Marinha), contendo dados de direção e velocidade do vento a 10 m de altura da superfície do mar; altura máxima e significativa, direção e período de ondas.

A partir das análises dos dados provenientes da bóia do PNBOIA, foi realizado um estudo comparativo com dados provenientes do modelo de ondas WAVEWATCH III, no intuito de aferir sobre sua eficácia quanto a representação dos principais parâmetros do clima de ondas incidente sobre o estado do Ceará. Para a comparação com os resultados provenientes do modelo numérico, foram extraídos dos dados *in-situ* medidos pela bóia registros com intervalos de 3 em 3 horas de dados, totalizando 8 registros diários dos principais parâmetros de ondas, com o objetivo de corresponder ao mesmo intervalo dos dados da série temporal obtida pelo modelo numérico.

4.2 Resultados de Modelagem Numérica

O modelo numérico escolhido para a comparação dos resultados com os dados observados foi o WAVEWATCH III, desenvolvido pela *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), e pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). O WAVEWATCH III é um modelo de geração e propagação de ondas de terceira geração (TOLMAN et al., 2002), governado por equações físicas que incluem fenômenos como refração, dissipação, espalhamento, fricção com o fundo, entre outros.

Os cálculos realizados pelo WAVEWATCH III levam em consideração variações espaciais e temporais da altura média do nível do mar e interações com o fundo oceânico, e suas parametrizações de processos físicos incluem o decaimento e crescimento de ondas pela ação do vento. Outra característica desse modelo é a possibilidade de aninhamento com outras grades de diferentes resoluções espaciais, sendo útil para implementações com menor resolução espacial, como por exemplo regiões mais costeiras.

O modelo utiliza como *inputs* os campos de vento e gelo provenientes de reanálise do *Global Forecast System* (GFS/NCEP) e utiliza dados do ETOPO-1 em sua grade. As saídas globais do WAVEWATCH III utilizadas neste trabalho correspondem à versão *Multigrid Hindcast*, referente à uma reanálise do clima de ondas global com uso de assimilação de dados de vento de longo prazo, sem assimilação com dados de ondas (NOAA). possuem resolução espacial de $1/2^\circ$ de grau, com resolução temporal de 3h, correspondendo a medições instantâneas dos principais parâmetros de onda e vento em cada intervalo de tempo, em 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h e 21h.

Este estudo preliminar consiste numa determinação do quão semelhantes os resultados provenientes do modelo numérico estão dos dados observados. Assim, foram obtidos saídas globais do WAVEWATCH III correspondentes ao período de dezembro de 2016 a dezembro de 2017, dos quais foi possível extrair os campos de velocidade e direção de vento, assim como altura significativa, período de pico e direção de ondas do ponto de grade do modelo mais próximo das coordenadas da bóia (Figura 3), obtendo uma série temporal semelhante ao período observado pelos dados *in-situ*. Os dados do WAVEWATCH III foram primeiramente obtidos em formato .grib2, sendo convertidos posteriormente para NetCDF.

Para a comparação com os dados observados, para cada parâmetro dos resultados do WAVEWATCH III e os dados do PNBOIA, foram calculados o Erro Quadrático Médio (*Root Mean*

Square Error, RMSE), o Coeficiente de Correlação de Pearson (r), a Razão e o Erro bruto entre os dois conjuntos de dados, da seguinte maneira:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (1)$$

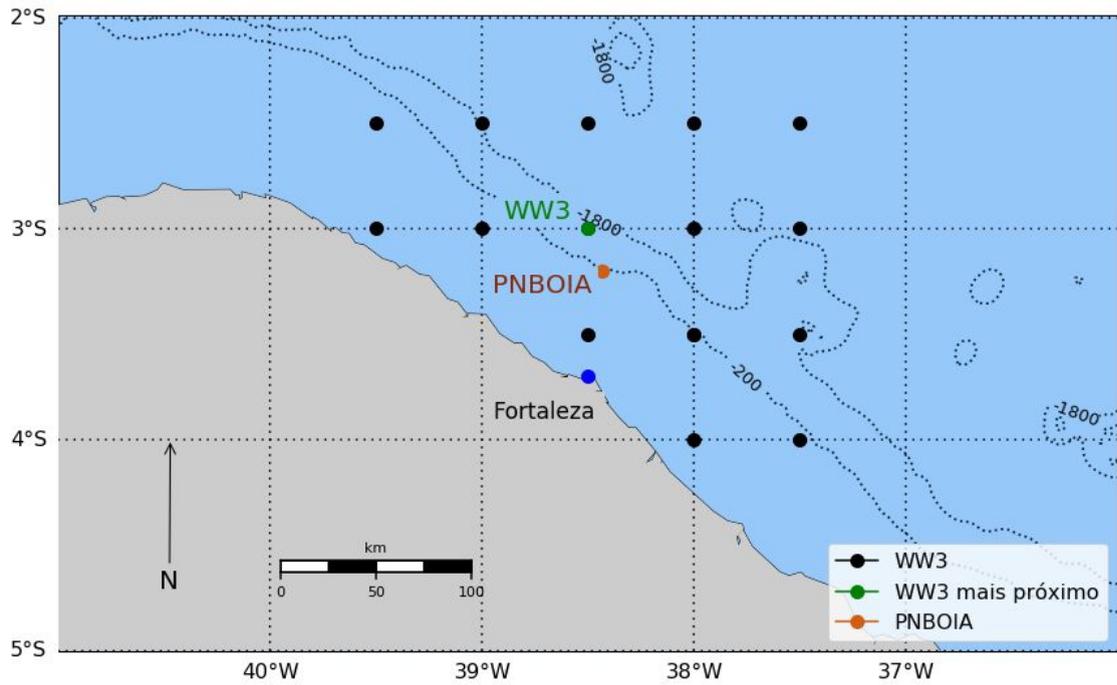
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (2)$$

$$Raz\tilde{a}o = \frac{x_i}{y_i} \quad (3)$$

$$Erro\ bruto = x_i - y_i \quad (4)$$

onde x e y são os valores dos dados observados do PNBOIA e os resultados obtidos pelo WW3, as médias são representadas por \bar{x} e \bar{y} e n é o número de medições.

Figura 3: Mapa da área de estudo com localização da bóia do PNBOIA (em laranja) e dos pontos da grade mais próximos do WAVEWATCH III (pontos pretos), juntamente com o ponto de grade mais próximo escolhido para realização das comparações (ponto verde).



Fonte: O Autor (2019)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em um primeiro momento, será analisado a direção e velocidade do vento, período de pico, direção de onda, altura significativa e altura máxima de onda a partir dos dados observacionais. Após a melhor compreensão das principais características do regime de ondas da região, procura-se investigar as principais ocorrências de ondas *swell* no estado do Ceará. Em seguida, será realizada uma comparação preliminar entre os resultados provenientes do modelo global de ondas WAVEWATCH III e os dados observados pelo PNBOIA.

As direções de onda e vento tanto para os dados da bóia como para os resultados do modelo numérico, se encontram referenciadas com o norte geográfico correspondendo a 0°. Para análise das direções de vento e onda, foram divididos os ângulos de incidência em Norte (338° a 22°), Nordeste (23° a 67°), Leste (68° a 112°), Sudeste (113° a 157°) e Sul (158° a 202°), Sudoeste (203° a 247°), Oeste (248° a 292°) e Noroeste (293° a 337°), conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Padronização dos quadrantes de direção de incidência de vento e onda.

Quadrante	Graus (°)
Norte	337° a 0° e 0° a 22°
NE	23° a 67°
Leste	68° a 112°
SE	113° a 157°
Sul	158° a 202°
SW	203° a 247°
Oeste	248° a 292°
NW	293° a 337°

Fonte: O Autor (2019)

5.1 ANÁLISE DOS DADOS OBSERVACIONAIS

5.1.1 Velocidade do Vento

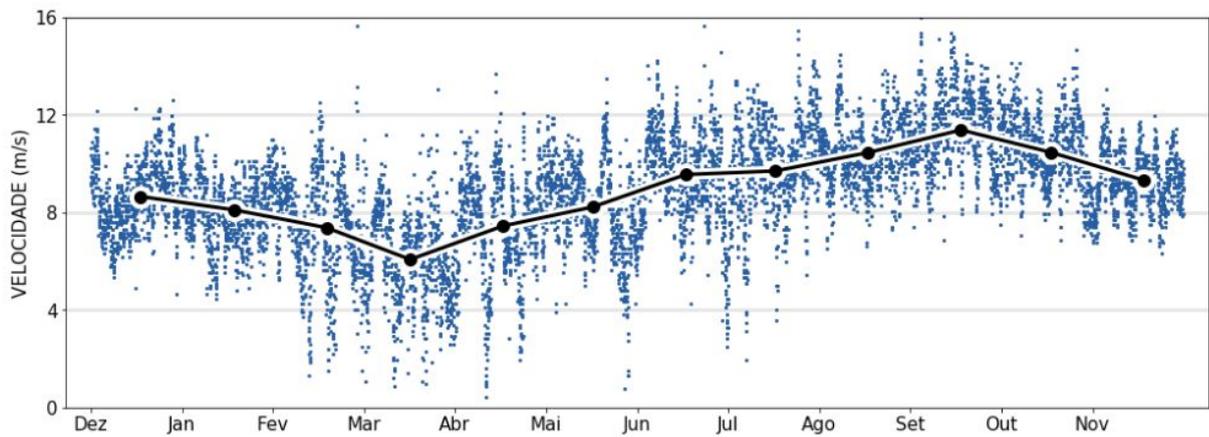
Para as análises de velocidade do vento obtidas pela bóia, constatou-se uma variação ao longo do ano, com uma sazonalidade observada entre os dois períodos do ano, com ventos mais intensos entre agosto e outubro, e ventos menos intensos entre fevereiro e abril. A velocidade média do vento registrado pelo ondógrafo foi de 8,8 m/s, com mínimo de 0,4 m/s e máximo de 15,9 m/s, encontrados no mês de abril e setembro, respectivamente. Apesar de abril ter apresentando o menor registro pontual de velocidade de vento, as menores velocidades foram encontradas durante o mês de março, com velocidade média de aproximadamente 6 m/s (Figura 4).

O mês de março obteve a menor média mensal de velocidade de vento, com 6 m/s, quando 86,7% dos registros neste mês encontraram-se abaixo de 8 m/s. Enquanto isso, o mês de setembro concentrou as maiores velocidades encontradas na série temporal, associadas à maior intensificação dos ventos alísios de Sudeste que ocorre nessa época, sendo encontrado uma média de 11,3 m/s, com 76% dos registros desse mês no intervalo de 10 m/s a 14 m/s, superando as velocidades encontradas em março em até 6 m/s.

Os meses de fevereiro, março e abril concentraram as menores velocidades de vento, com médias mensais que variaram de 6 m/s a 7,4 m/s, com 68,4% dos registros desse trimestre encontrados velocidades inferiores à 8 m/s, correspondendo as velocidades mais baixas da série de dados. Por outro lado, os meses de agosto, setembro e outubro registraram as maiores velocidades, com médias mensais entre 10,4 m/s e 11,3 m/s, com 67% dos registros no intervalo de 9 m/s a 12 m/s, conforme pode ser observado na Figura 5.

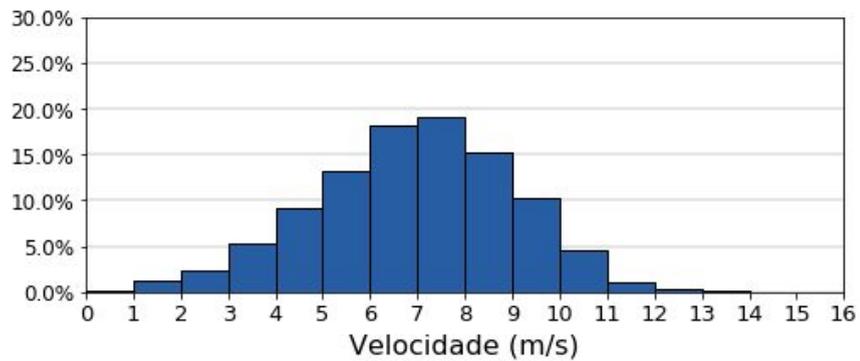
Durante toda a série de dados, variações até 6 m/s entre as velocidades do vento são perceptíveis quando comparado o trimestre de fevereiro-março-abril com trimestre agosto-setembro-outubro. No primeiro período (fevereiro-março-abril), as velocidades variaram de 2 m/s a 11 m/s, enquanto que no segundo período (agosto-setembro-outubro) foram encontradas menores variações de intensidade de vento, com flutuações entre 8 m/s e 14m/s. Essas variações de velocidades, associadas à flutuação latitudinal da ZCIT na região equatorial, também se refletem em perceptíveis mudanças no padrão de direção do campo de ventos incidentes no litoral do Ceará entre esses dois períodos do ano.

Figura 4: Série temporal de Velocidade de Vento entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017, onde a linha preta representa os valores médios encontrado em cada mês.

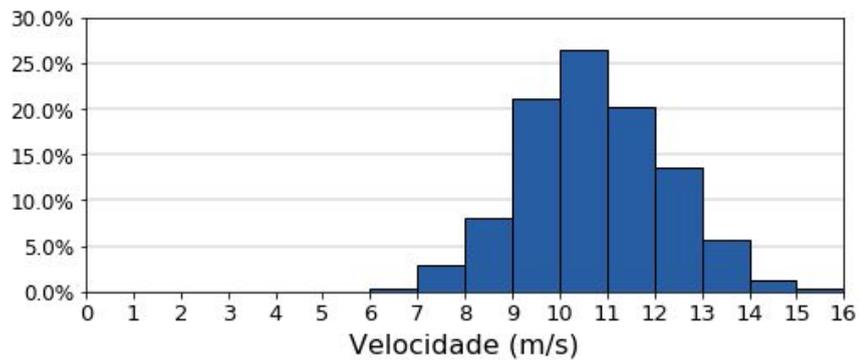


Fonte: O Autor (2019)

Figura 5: Histograma de distribuição de Velocidade do Vento entre (a) fevereiro, março e abril e (b) agosto, setembro e outubro de 2017.



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2019)

5.1.2 Direção do Vento

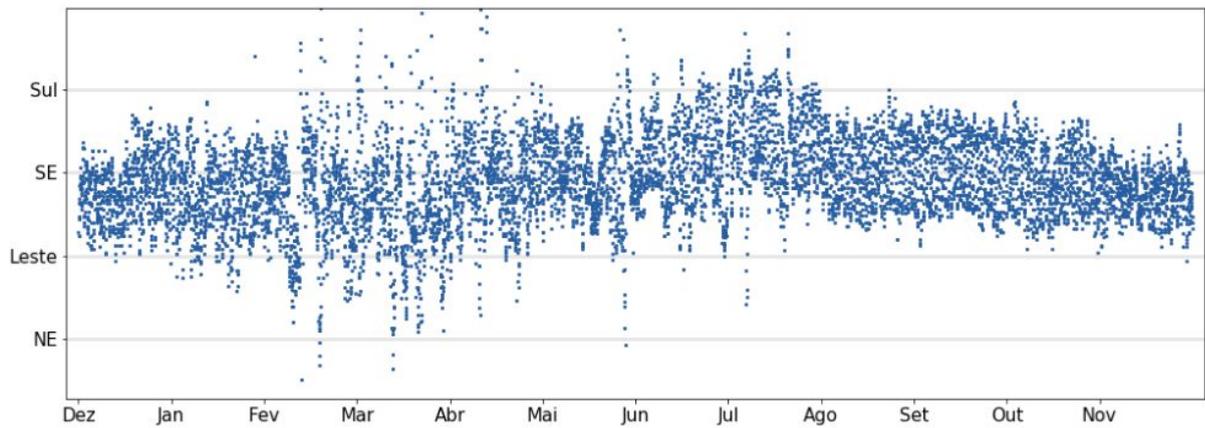
Com relação ao padrão de direção de ventos, foi possível identificar uma variação sazonal semelhante à encontrada nas velocidades ao longo da série temporal. Assim como as variações de velocidade, as direções de vento incidente sobre a costa cearense também foi encontrado um padrão de variação bem característico ao longo da série.

Nos meses de fevereiro, março e abril, quando a ZCIT se encontra em sua posição mais a sul, as direções de incidência de vento encontraram-se dispersas em um intervalo de 0° a 351° , com incidências nos quadrantes Nordeste, Leste e Sudeste, e alguns registros no quadrante Norte, indicando uma vasta direção de incidência de ventos na região (Figura 6). É possível que a ZCIT em sua posição mais a sul, juntamente com a formação de outros sistemas meteorológicos não investigados neste trabalho, possam ter favorecido a formação de condições propícias a uma maior variação na intensidade e direção do vento atuante na costa cearense neste período, como pode ser observado nos meses de fevereiro, março e abril na série temporal de direção de vento (Figura 6) e na série temporal de velocidade do vento (Figura 4).

Diferentemente do primeiro período, nos meses de agosto, setembro e outubro, período em que a ZCIT se encontra em sua posição mais a norte de sua média climatológica, foi observado uma maior uniformidade nos dados de direção de vento, apresentando um quadrante bem definido entre 90° e 140° correspondendo a 87% das ocorrências, indicando a predominância de ventos do quadrante Leste-Sudeste, como pode ser observado na Figura 7.

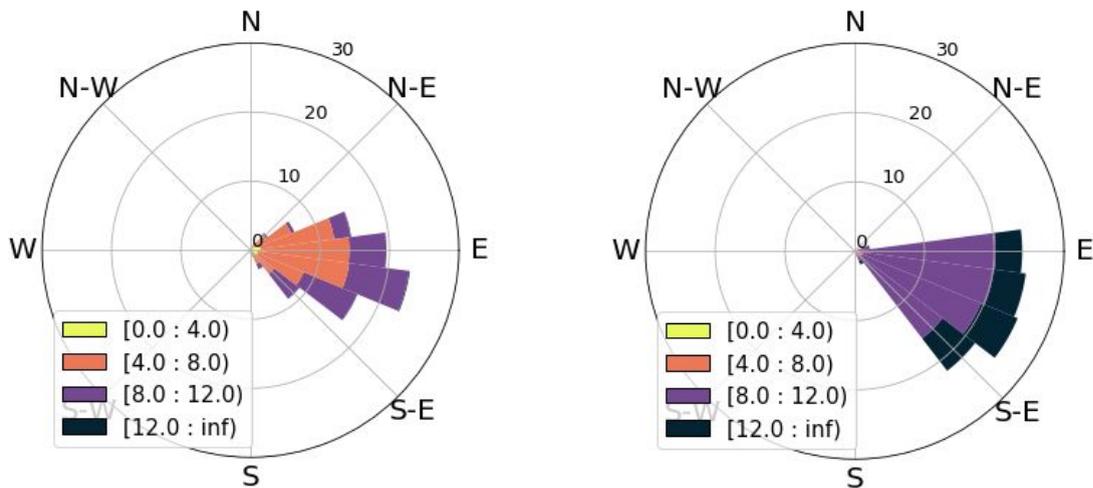
De forma geral, os meses de fevereiro, março e abril se caracterizam por menores velocidades e maiores variações de direção de incidência de ventos na região. Por outro lado, nos meses de agosto, setembro e outubro encontraram-se maiores velocidades e direções de vento mais bem definidas no quadrante Leste-SE, como pode ser visto na Figura 8. Sugere-se que este padrão na velocidade e direção de vento apresentado no segundo período (ago-set-out) possa estar relacionado com o deslocamento da ZCIT mais para norte, permitindo que haja uma formação de um campo de ventos mais bem definidos, com velocidades superiores a 10 m/s que favorecem a maior uniformidade sobre a direção dos ventos alísios de Sudeste.

Figura 6: Série temporal de Direção de Vento entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017.



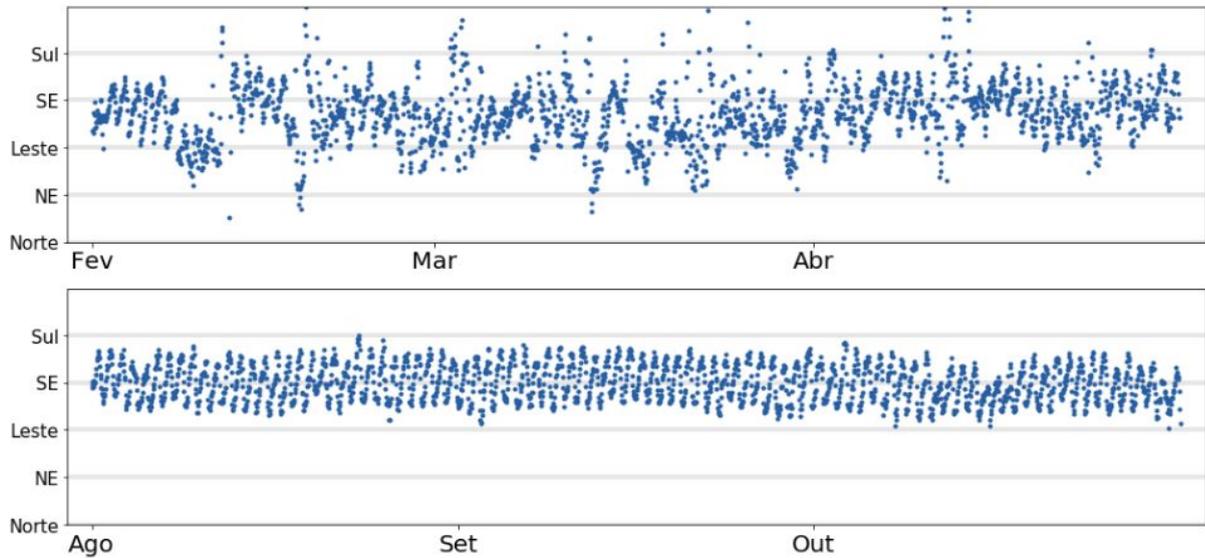
Fonte: O Autor (2019)

Figura 7: Direção e Velocidade do Vento no período de (a) fevereiro, março e abril e (b) agosto, setembro e outubro de 2017.



Fonte: O Autor (2019)

Figura 8: Série temporal de direção de vento durante os meses de (a) fevereiro a abril e (b) agosto a outubro de 2017.

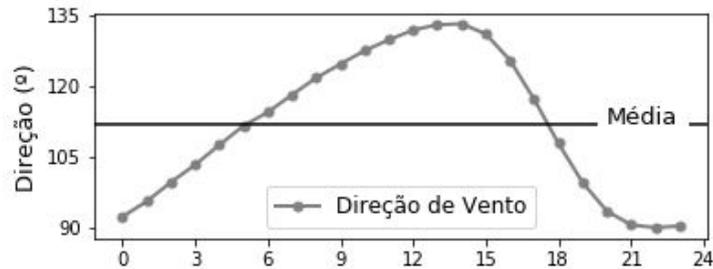


Fonte: O Autor (2019)

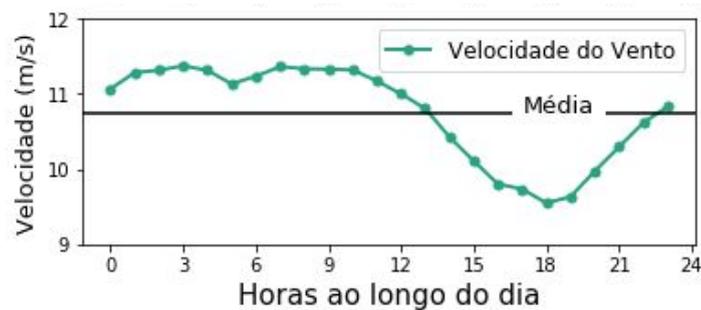
Variações de pequena escala temporal ao longo de um período de 24h, na intensidade e direção de vento incidente sobre o litoral também foram observadas em praticamente toda a série de dados. Os padrões de variação diária podem ser observados ao longo de toda a série temporal, ocorrendo com maiores intensidades entre agosto, setembro e outubro, conforme observa-se na Figura 8. Durante as primeiras horas do dia, mais precisamente durante a madrugada (0h local), a direção do vento inicia um processo de reorientação que se estende até aproximadamente o período da tarde (15h local). Durante esse período, a direção do vento varia aproximadamente 45° , saindo de um quadrante Leste nas primeiras horas do dia para um quadrante Sudeste. Este acontecimento dura aproximadamente 14 horas. O contrário pode ser observado do meio da tarde para a noite, quando as direções de incidência começam a variar novamente, saindo do quadrante Sudeste retornando ao quadrante Leste no fim do dia (23h local), levando cerca de 8 horas. (Figura 9a).

Além disso, é possível observar ainda um padrão de variação da velocidade do vento com flutuações de aproximadamente 24 horas, possivelmente influenciados por esta reorientação de direção de incidência do vento. Ao analisar as velocidades médias horárias (Figura 9b), é possível observar que os máximos e mínimos de velocidade do vento ocorrem durante as reorientações da direção do vento, não coincidindo com as máximas e mínimas dos valores de direção encontradas. A velocidade do vento inicia um aumento gradativo a partir das 18h, saindo de aproximadamente 8 m/s e alcançando velocidades máximas nas primeiras horas do dia, com máximo de 9,5 m/s às 9h (horário local).

Figura 9: Variação horária média de Direção e Velocidade do Vento nos meses de agosto, setembro e outubro de 2017. (a) Variação horária média da direção de incidência dos ventos. (b) Variação horária média de intensidade do vento. A linha preta indica a média mensal de direção e intensidade de vento encontrada nos respectivos meses.



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2019)

Os padrões de variação diária observadas na direção e velocidade do vento parecem estar associados com a influência de um sistema de brisas local, já que as brisas terrestres podem penetrar até 100 km para dentro do mar (FERREIRA, 2005). Segundo Ferreira (2005), as brisas terrestres e marítimas nem sempre podem ser percebidas no Nordeste, onde os ventos alísios são constantes e intensos o ano todo, onde quase sempre as brisas atuam contribuindo em poucas mudanças na direção e velocidade dos ventos locais, conforme verificado nos dados obtidos pela bóia.

Ao longo das análises de direção e altura de onda, será estudado como essas modificações horárias de direção e intensidade dos ventos ao longo do dia podem influenciar em variações de curto período no regime de ondas.

5.1.3 Período de Pico

As análises de Período de Pico (T_p) para a série temporal dos dados observados, constataram um padrão sazonal bem definido, marcado pela dominância de ondas *swell* nos meses de dezembro a abril, enquanto os meses de maio a outubro foram dominados por ondas do tipo *sea*. Vale lembrar que, para as análises dos valores de T_p , considera-se como ondas do tipo *sea* aquelas cujo período de pico é inferior à 9 segundos, enquanto as ondas do tipo *swell* caracterizam-se por períodos de pico superiores à 9 segundos (POND & PICKARD, 2005). No intuito de comparação com dados de ondas pretéritos, será utilizado os trabalhos de Vieira *et al.* (2007) e Silva *et al.* (2011).

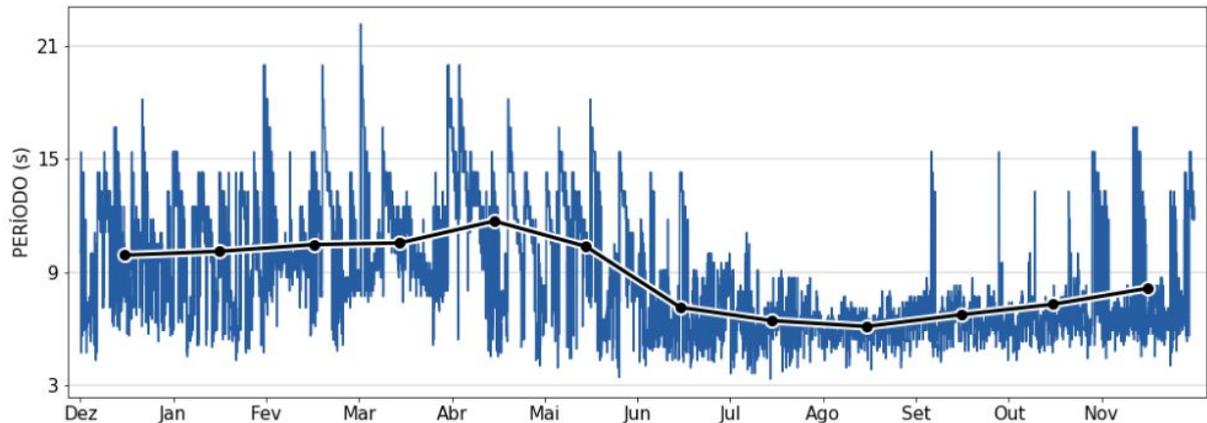
Para toda a série, os valores observados de Período de Pico (T_p) tiveram uma média de 8,7 s, com valor médio de 10,5 s para os meses de dezembro a abril, e 7,4 segundos nos meses de maio a novembro (Figura 10). Os menores valores de T_p foram encontrados em julho e agosto, com valores inferiores a 5 segundos, enquanto que os maiores valores de T_p encontraram-se nos meses de fevereiro, março e abril, com variações entre 11 e 17 segundos. O maior valor de T_p foi observado no mês de março com 22,2 segundos, como pode ser observado na Figura 10.

Ao todo, foi encontrado 62,3% de ocorrências de ondas do tipo *sea*, com períodos de pico que variaram de 3,3 segundos a 8,7 segundos. Esse tipo de onda ocorreu em todos os meses do ano, apresentando maiores concentrações principalmente nos meses de julho, agosto, setembro e outubro de 2017. Vieira *et al.* (2007), ao analisar as principais frequências de T_p dos anos 1997, 2000 e 2001, encontrou que 74,7% dos registros corresponderam em ondas de 3 a 9 segundos, o que indica maiores ocorrências de ondas tipo *sea* em 1997, 2000 e 2001 em relação ao intervalo de tempo aqui estudado (Tabela 2). Isso é corroborado ao verificar os resultados de Silva *et al.* (2011), que indicaram a ocorrência de 80% de ondas com período de pico entre 4 e 9 segundos, e aproximadamente 20% com períodos acima de 10 segundos. No presente trabalho, a ocorrência de períodos de pico entre 4 e 9 segundos foi de 62%, enquanto as ocorrências acima de 10 segundos correspondeu a 32%, indicando que a série de dados aqui estudada apresentou, proporcionalmente, maiores ocorrências de *swell*.

Para as ondas do tipo *swell*, foi encontrada uma ocorrência de 37,6%, registradas do total, com T_p mínimo de 9 segundos e máximo de 22,2 segundos, indicando um aumento da ocorrência desse tipo de onda em relação aos anos de 1997, 2000 e 2001 analisados por Vieira *et al.* (2007), que apresentou uma ocorrência de apenas 25,2% (Tabela 2). Assim como as ondas tipo *sea*, as ondas do tipo *swell* também foram encontradas em praticamente todos os meses da série aqui analisada, com

exceção de agosto. Os maiores valores de T_p foram observados entre os meses de dezembro e junho, com maiores valores encontrados nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril (Figura 10).

Figura 10: Série temporal de Período de Pico (T_p) entre dezembro de 2016 e novembro de 2017. A linha preta representa a média de T_p encontrada em cada mês.



Fonte: O Autor (2019)

A dominância de ondas do tipo *sea* ocorre entre os meses de junho e novembro, com maiores ocorrências em agosto, setembro e outubro, formadas pelos ventos alísios de quadrante Leste-Sudeste, intensificados neste período do ano, conforme observado nas análises anteriores de direção e velocidade do vento. Nessa época do ano, a maioria das ocorrências (87,5%) de ondas tipo *swell* encontraram-se nos meses de junho, outubro e novembro (Figura 11).

Para as ondas do tipo *swell*, foi observada uma maior predominância de ondas com T_p abaixo de 15 segundos, correspondendo a aproximadamente 88% do total de registros. Apenas 12% das ondas tipo *swell* foram encontradas com T_p superiores a 15 segundos. No entanto, a maioria dos meses da série temporal indicaram pelo menos uma ocorrência pontual de T_p superiores a 15 segundos, com exceção os meses de junho, julho e agosto.

As séries temporais analisadas por Silva *et al.* (2011) também indicaram poucas ocorrências de ondas com T_p superiores à 15 segundos, com apenas 2 registros pontuais em março de 1997, janeiro e novembro de 2000. No ano de 2001, houve um aumento nos registros de ondas com período acima de 15 segundos em relação aos meses anteriores, ocorrendo nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro e novembro. É importante lembrar que, apesar dos dados de Silva *et al.* (2011) serem provenientes de um ondógrafo mais próximo da costa onde as ondas se comportam como

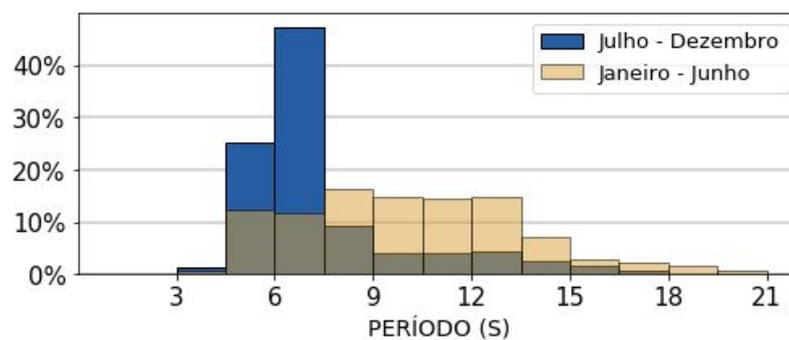
ondas de águas rasas, característica como o período de onda permanece inalterada ou pouco é influenciada com a profundidade de propagação de onda, preservando seu período quando chegam no litoral.

Tabela 2 - Síntese das principais frações de T_p observadas no presente trabalho (anos analisados: dezembro de 2016 a novembro de 2017) e em Vieira *et al.* (2007) (anos analisados: 1997, 2000 e 2001)

Período (T_p)	Presente trabalho	Vieira et al. (2007)
3 a 6	19,98%	28,91%
6 a 9	42,39%	45,87%
9 a 12	18,77%	11,8%
12 a 15	14,21%	9,32%
15 a 18	3,6%	3,42%
acima de 18 segundos	1,06%	0,67%

Fonte: O Autor (2019)

Figura 11: Histograma de Período de Pico para os meses de dezembro a maio (amarelo) e junho a novembro (azul) de 2017.



Fonte: O Autor (2019)

5.1.4 Direção de Onda

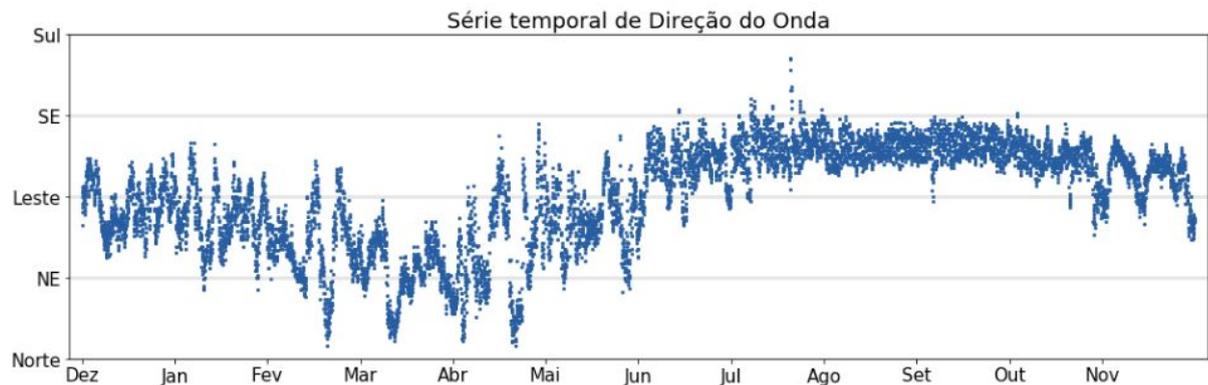
Durante toda a série, é possível encontrar incidências de ondas de diversas direções, variando desde o quadrante Norte nos primeiros meses ao quadrante Leste nos últimos meses do ano, sendo encontrados principalmente ondas com direções dos quadrantes Nordeste e Leste, com 36,2% e 55,6% de ocorrências, respectivamente (Figura 12).

Entre os meses de janeiro e junho, a incidência de ondas se deu relativamente bem distribuída nos quadrantes Norte, Nordeste e Leste, com ocorrências de 14,8%, 59,1% e 25,9% em cada um destes intervalos, respectivamente. Nos meses de julho a dezembro, foi observada uma forte ocorrência de ondas em um único quadrante, com 85% dos registros desses meses no quadrante Leste e 14,2% no quadrante Nordeste. As ocorrências do quadrante Norte se deram principalmente nos meses de fevereiro, março e abril, com 29% das ocorrências desse período. Ainda nesses meses, 93% dessas ocorrências foram de ondas do tipo *swell* (Figura 12).

Enquanto os primeiros meses da série apresentam uma maior dissociação entre as direções de onda e direções de incidência de ventos, fica evidente que uma maior relação entre as direções de onda e vento ocorrem, principalmente, nos meses de agosto, setembro e outubro, como pode ser observado na Figura 13.

Essa maior desconformidade em relação às direções de onda e vento ocorre principalmente nos meses de fevereiro, março e abril, quando a ZCIT encontra-se seu posicionamento máximo ao sul, interagindo com outros sistemas meteorológicos. Além disso, a maior ocorrência de ondas do tipo *swell* que encontram o litoral do Ceará neste primeiro período do ano, apresentando ocorrências de ondas do quadrante Norte e Nordeste, contribui substancialmente para as divergências entre direções de onda e vento. Para melhor visualização entre as relações entre incidência de ondas e direção de ventos, foi elaborado um esquema representativo das direções médias mensais de onda e vento, que pode ser observado na Figura 15.

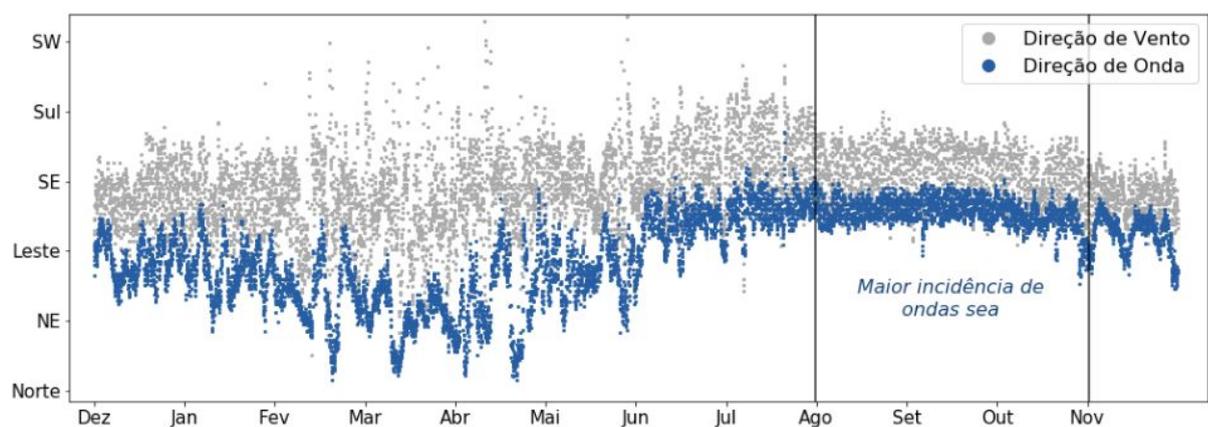
Figura 12: Série temporal de Direção de Onda entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017.

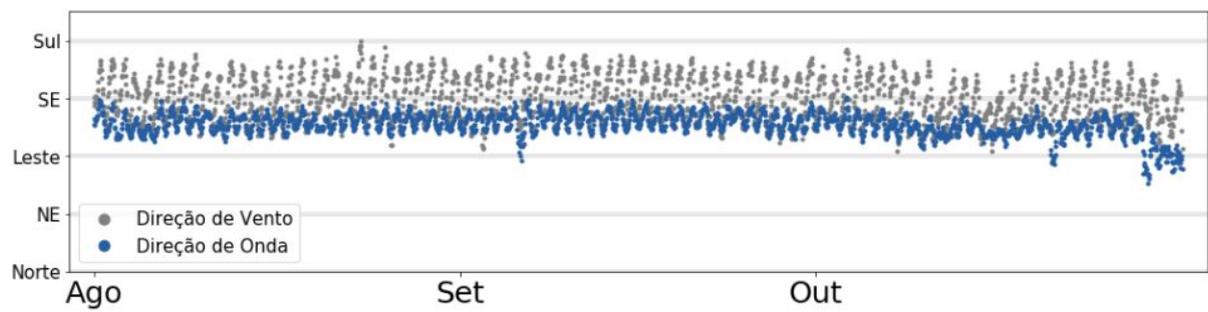


Fonte: O Autor (2019)

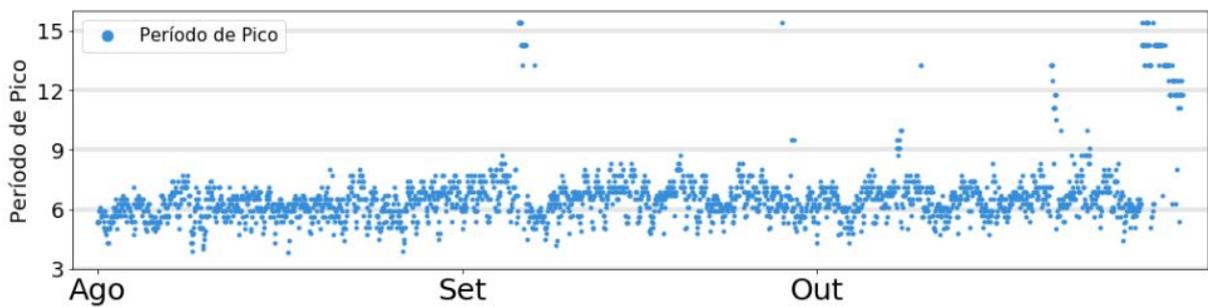
Nos meses de agosto, setembro e outubro, período em que a ZCIT se aproxima de sua posição climatológica mais ao norte, 98% das ondas incidiram no quadrante Leste. Vale destacar ainda que, 96% dos registros nesses foram de ondas do tipo *sea*. A maior correspondência entre a direção de incidência de ondas e direção de ventos nos meses de agosto, setembro e outubro indicou uma maior influência do campo de ventos locais na formação das ondas na região nos respectivos meses, ficando evidente a maior formação de ondas *sea* neste período do ano (Figura 13a).

Figura 13: Série temporal de Direção de Vento entre dezembro de 2016 e novembro de 2017 (cor cinza) e Direção de Onda (cor azul), com destaque para o período com maior ocorrência de ondas tipo *sea*.





(b)



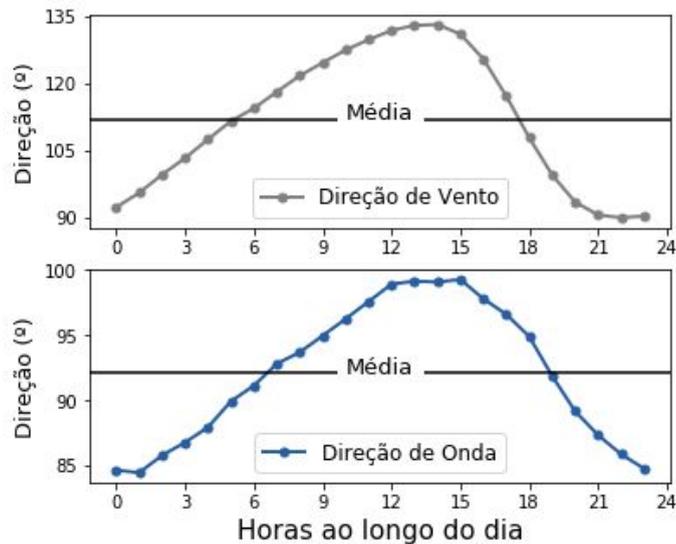
(c)

Fonte: O Autor (2019)

Ao investigar o período do ano com maior ocorrência de ondas do tipo *sea* (agosto, setembro e outubro), foi constatado a presença de uma variação na direção de incidência de ondas em uma pequena escala temporal (Figura 13b). Como já mencionado anteriormente nas análises das características de vento, variações horárias ao longo do dia são perceptíveis na direção de incidência de ventos, refletindo-se em modificações nas direções de ondas formadas principalmente no período de intensificação dos ventos, provocando uma maior formação de ondas do tipo *sea*.

Durante as primeiras horas do dia, as direções dos ventos sofrem oscilações do quadrante Leste para Sudeste, as variações de direção de onda acompanham estes padrões de modificação do vento, mas com uma angulação menor ($85 - 100^\circ$) que a encontrada no vento ($90 - 135^\circ$). As direções de onda variam de 60° nas primeiras horas do dia, alcançando seu máximo de 75° entre 12h e 15h (horário local) (Figura 14). Tal padrão indica a influência direta do sistema de ventos locais na formação das ondas nesse período do ano, inclusive em escalas de tempo inferiores à 24 horas.

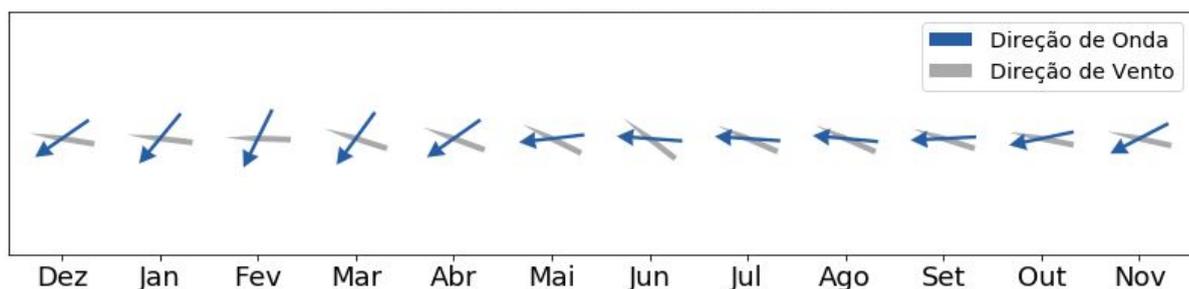
Figura 14: Gráfico de variação diária com médias horárias de Direção de Vento (a) e direção de onda (b) nos meses de agosto, setembro e outubro de 2017. A linha preta indica a média mensal de direção de vento e onda encontrada nos respectivos meses.



Fonte: O Autor (2019)

Tal influência de curto período sugere que o sistema de brisas local, ao mesmo tempo que provoca um deslocamento na angulação de incidência dos ventos alísios, também influencia diretamente no padrão de direção de ondas encontradas no litoral do Ceará. Vale destacar que tal relação deve ser melhor observada em regiões oceânicas de maiores profundidades e não tão próximo da costa, onde fenômenos associados à refração e difração não interfiram de maneira considerável nas modificações de direção de onda.

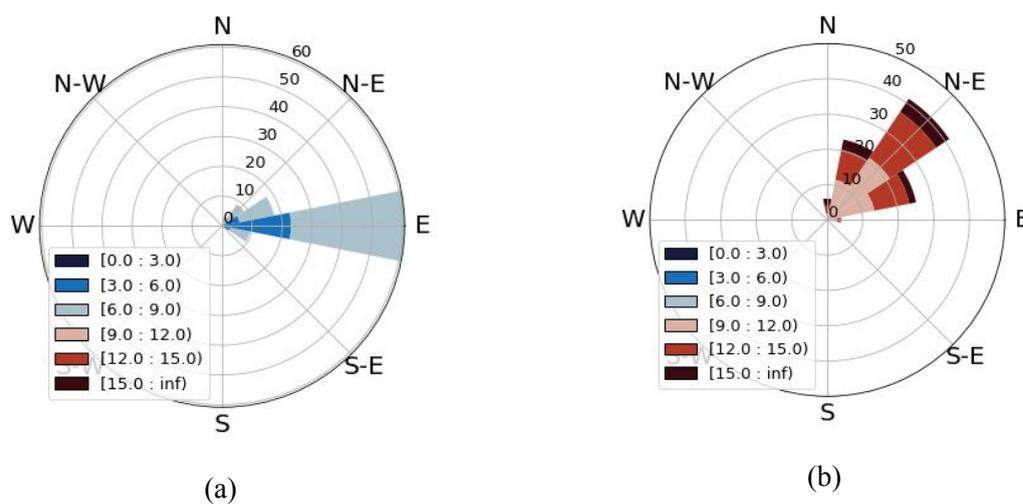
Figura 15: Esquema representativo de Direção de Onda e vento médio mensal entre dezembro de 2016 e novembro de 2017. Ondas formadas pelo vento local ocorrem com maior predominância entre julho e outubro.



Fonte: O Autor (2019)

A direção média de incidência de ondas *sea* foi de 82°, com mais de 80% de registros correspondendo ao quadrante Leste e apenas 17,3% de quadrante Nordeste e menos de 1% de registros de direção Norte ou Sudeste. Já as ondas do tipo *swell* ocorreram numa angulação média de 42°, com 68,5% de ocorrência de ondas do quadrante Nordeste, 18,3% do quadrante Norte e 13,1% de Leste. Em resumo, aproximadamente 80% das ondas *swell* incidiram entre 10° e 70°, enquanto aproximadamente 80% das ondas *sea* incidiram entre 70° e 120° (Figura 16).

Figura 16: Direção de onda e Período de Pico entre ondas do tipo (a) *sea* e (b) *swell* entre dezembro de 2016 e novembro de 2017.



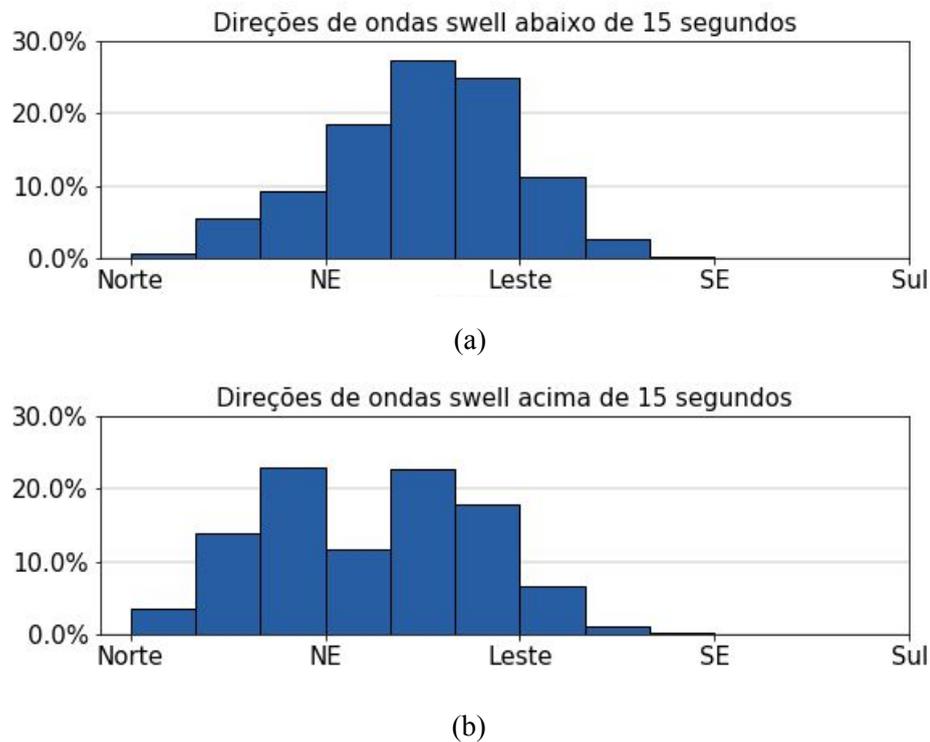
Fonte: O Autor (2019)

No presente trabalho, será analisada as ocorrências de direções dos campos de ondas do tipo *swell* dividindo-as em dois intervalos diferentes, tendo em vista as diferenças de incidência de ondas observadas em diferentes faixas de T_p . Desta forma, será analisada a direção comparando ondas *swell* com T_p abaixo de 15 segundos, e T_p acima de 15 segundos.

Para o primeiro tipo de onda *swell* (abaixo 15 segundos), foi verificado que 17% da ocorrência dessa onda atingiu o estado do Ceará do quadrante Norte, 67,7% com direção de Nordeste e 14% de ocorrências do quadrante Leste. Ao analisar as direções de ondas do tipo *swell* com períodos superiores a 15 segundos, foi observado uma ocorrência de 40,4% dessas ondas sendo provenientes do quadrante Norte, 52,4% do quadrante Nordeste, e apenas 7,8% do quadrante Leste (Figura 17). Além disso, ao analisar a direção de ondas do tipo *swell*, foi encontrado uma maior ocorrência desse tipo de onda incidente do quadrante Norte com períodos superiores a 15 segundos. Já para as ondas *swell* com

menores períodos (inferiores a 15 segundos), foi encontrada ocorrências principalmente no quadrante Nordeste com poucas ocorrências de quadrante Norte (Figura 18 - lado esquerdo).

Figura 17: Direção de Ondas tipo *swell* com (a) período de pico abaixo de 15 segundos e (b) período de pico superiores a 15 segundos.



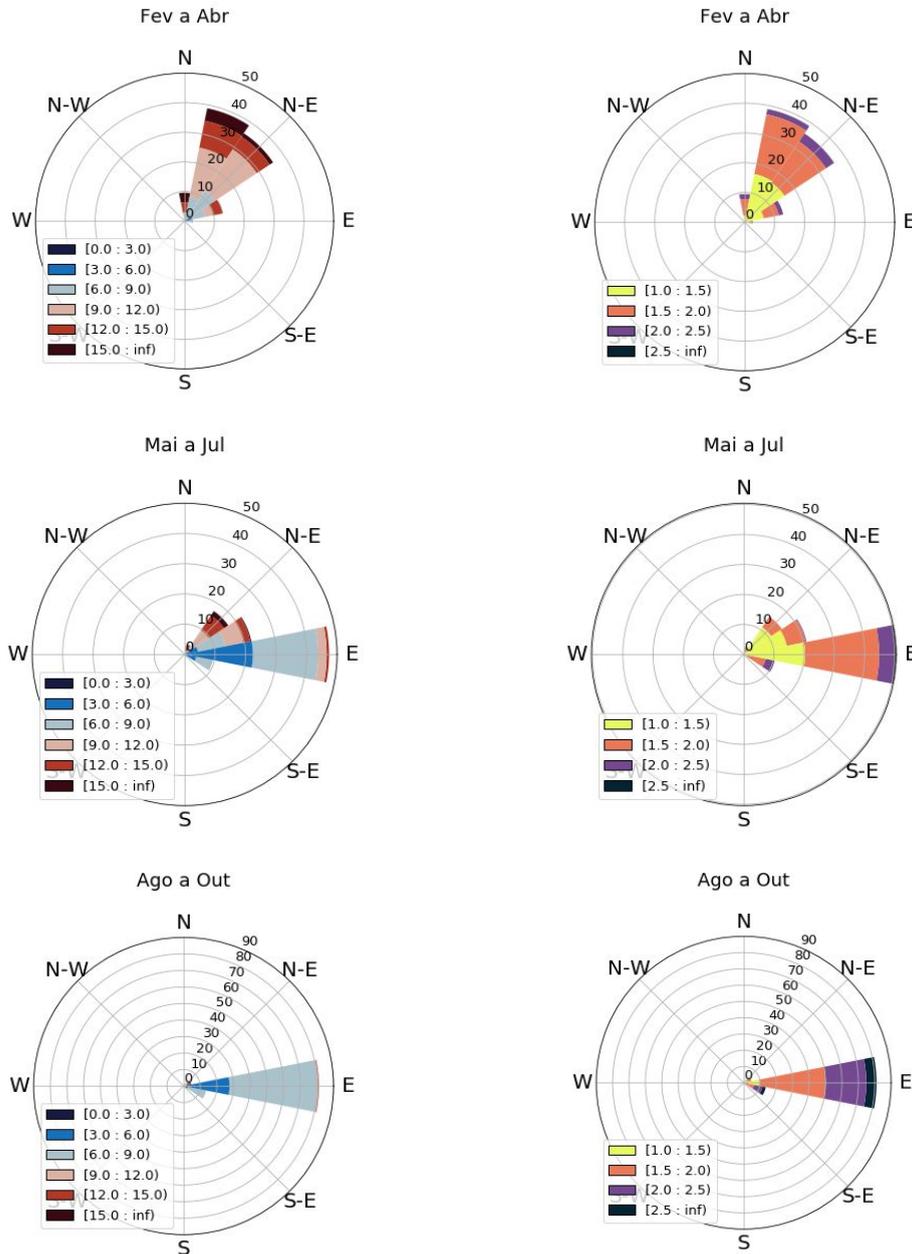
Fonte: O Autor (2019)

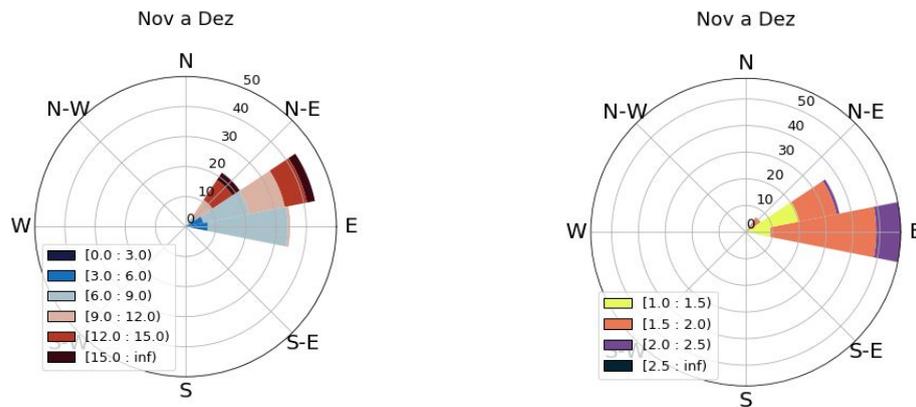
Assim como ocorre com T_p , pode-se observar relações também entre direções de onda e altura significativa (H_s), onde as ondas incidentes de quadrante Norte e Nordeste, no geral, possuem H_s menores que 2 m, enquanto as ondas incidentes do quadrante Leste e Sudeste possuem uma maior ocorrência de ondas com maiores alturas associadas a intensificação dos alísios (Figura 18 - lado direito).

Em trabalho de Vieira *et al.* (2007), foi encontrado que 10,86% das ondas ocorreram entre 0 e 40°, 23,98% de ondas ocorreram entre 40 e 80°, 64,72% ocorreram entre 80 e 120°, e apenas 0,45% de ondas acima de 120°. Contudo, no presente trabalho foi encontrada uma ocorrência maior de ondas nos quadrantes de 0 a 40° e de 40 a 80°, com 16,69% e 37,33%, respectivamente, apresentando maiores ocorrências de ondas do quadrante Norte e Nordeste (Tabela 3). Vale ressaltar que processos de refração de onda podem influenciar em diferentes direções de onda entre o atual trabalho e trabalhos anteriores de Vieira *et al.* (2007) e Silva (2011). Deve-se considerar, assim, que as análises

individuais comparativas com cada ano devem ser levadas em consideração para uma melhor aferição sobre os resultados encontrados para melhores conclusões.

Figura 18: Direção de Ondas em diferentes épocas do ano relacionadas com Tp (lado esquerdo) e Hs (lado direito). Lado esquerdo: direções de onda relacionadas com período de pico, onde as cores azuis representam ondas *sea* e as cores vermelhas indicam ondas *swell*. Lado direito: direções de ondas relacionadas com altura significativa (Hs).





Fonte: O Autor (2019)

Tabela 3: Comparação entre direção de onda do presente trabalho e de Vieira *et al.* (2007).

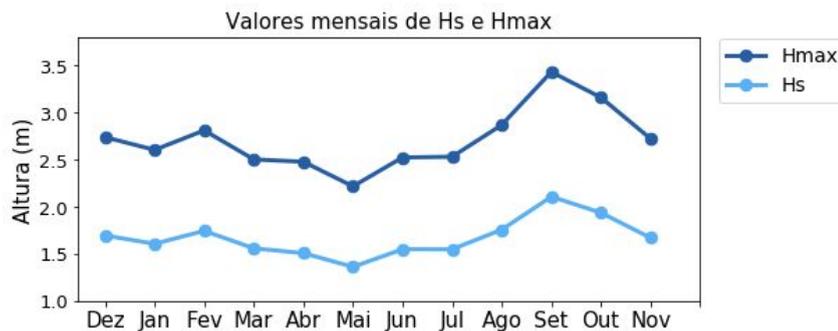
Direções	Neste trabalho	Vieira et al. (2007)
0 a 40°	16,69 %	10,86%
40 a 80°	37,33 %	23,98%
80 a 120°	44,26 %	64,72%
120° ou mais	0,11 %	0,45%

Fonte: O Autor (2019)

5.1.5 Altura Significativa e Altura Máxima

Para melhor compreender sobre as alturas de onda, será dado um maior foco nas análises da Altura Significativa (Hs), levando em consideração que os registros de Altura Máxima (Hmax) apresentam uma tendência similar e corroboram com as tendências registradas de Hs, como pode ser observado na Figura 19. Vale ressaltar que não deve ser descartada a importância de entender as maiores incidências de ondas na região representadas nos valores de Hmax, principalmente na aplicabilidade dos conhecimentos do padrão de ondas para o auxílio das atividades costeiras já mencionadas. Assim, será estudado as variabilidades de Hs ao longo da série estudada, bem como sua relação com outros parâmetros de onda, como período de pico e direção de onda e vento já analisados anteriormente neste trabalho.

Figura 19: Série temporal com médias mensais de Altura Máxima (azul escuro) e Altura Significativa (azul claro) entre dezembro de 2016 e novembro de 2017.



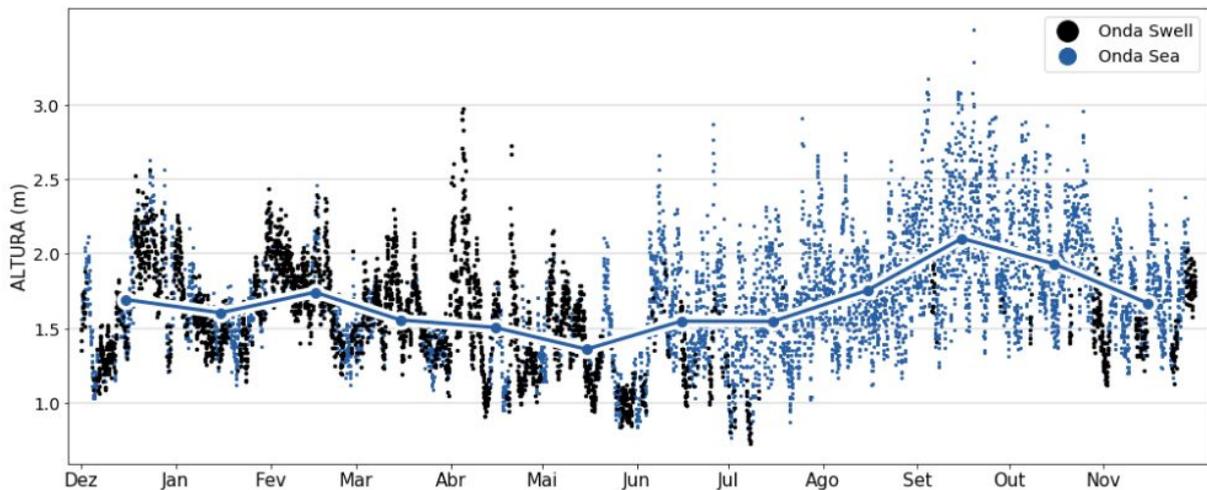
Fonte: O Autor (2019)

No intuito de facilitar o entendimento sobre a variação de Hs ao longo de um ano, a série temporal foi dividida em dois intervalos, entre os meses de dezembro e maio, e os meses de junho a novembro, tendo em vista variações sazonais observadas nas alturas de onda entre os dois períodos. Menores alturas foram observadas no primeiro período, no qual apenas 10% das ocorrências foram de Hs superiores a 2 m, sendo mais de 70% destas ocorrendo principalmente associadas à ondas do tipo *swell*. Enquanto isso, no segundo período foi registrado maiores ocorrências de ondas, com 24,2% de ocorrências de ondas com Hs acima de 2 m.

Durante toda a série observada, a média de Hs foi de 1,66 m, com média 1,57 m no período entre dezembro e maio, e média 1,75 m para o período de junho a novembro. As maiores médias mensais foram encontradas nos meses de setembro e outubro, registrando Hs de 2,1 m e 1,9 m, respectivamente, e Hmax de 3,4 m e 3,1 m. Por outro lado, a menores médias mensais se deram no

mês de abril e maio, com médias de Hs de 1,5 e 1,35 m, respectivamente, e médias de Hmax de 2,47 e 2,2 m, respectivamente, indicando maiores alturas no segundo período do ano (Figura 20).

Figura 20: Série temporal de Altura Significativa observada entre os meses de dezembro de 2016 e novembro de 2017 com destaque para as ondas tipo *swell* (preto). As ondas do tipo *sea* estão em azul. Médias mensais são encontradas em linha contínua (azul).



Fonte: O Autor (2019)

Como consequência do predomínio de ondas tipo *swell* entre os meses de dezembro e maio e aumento de ocorrências de ondas tipo *sea* nos meses de agosto a novembro, as análises também indicam maiores alturas de ondas tipo *sea* em relação às ondas tipo *swell*. Foi constatado que a média de Hs para ondas do tipo *sea* foi de 1,71 m, enquanto que as ondas do tipo *swell* registraram uma média de Hs de 1,58 m. A média de Hmax para ondas *sea* foi de 2,79 m e para as ondas *swell* foi de 2,56 m.

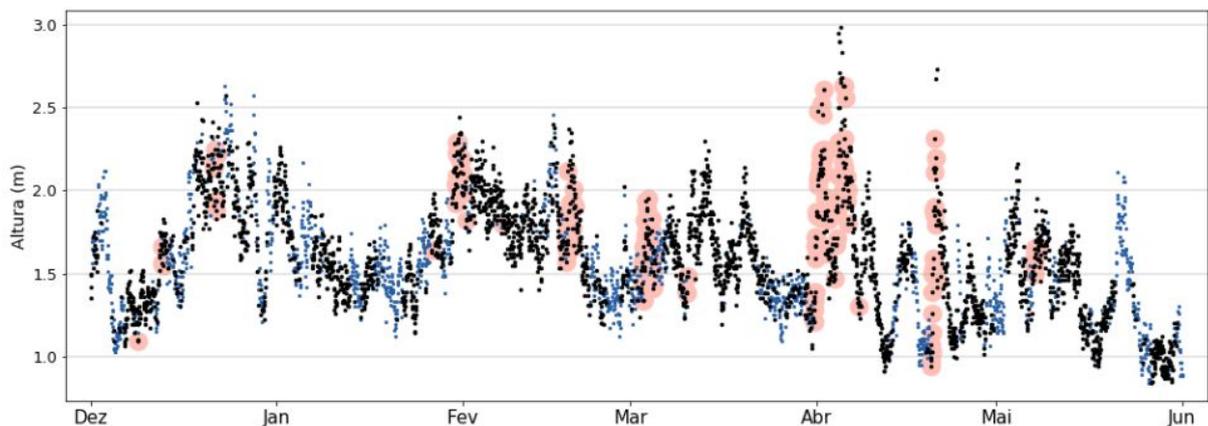
Os maiores picos de Hs ocorreram no mês de abril, agosto, setembro e outubro, com alturas entre 2,9 m e 3,51 m. No mês de abril, os maiores picos de Hs se deram associados a valores de período de pico superiores à 17 segundos, com direções de onda provenientes do quadrante Norte. Em agosto, setembro e outubro, conforme mencionado anteriormente, a intensificação dos ventos alísios influenciou nos maiores registros de Hs encontrados (Figura 20).

Durante toda a série temporal, a maioria das ocorrências de Hs foram de 1,2 a 1,8 m, com 57,9% dos registros, 29,8% de ocorrências entre 1,8 m e 2,4 m e apenas 3,9% de registros foram verificados entre 2,4 m e 3,5 m. Em análises de Vieira *et al.* (2007), foi registrada uma menor ocorrência de ondas com maiores alturas, com 14,4% dos registros entre 1,8 e 2,4 m e menos de 0,1%

para ondas acima de 2,4 m. Assim, em comparação com trabalho realizado por Vieira *et al.* (2007), os resultados encontrados no presente trabalho evidenciam maiores ocorrências de ondas com H_s maiores que 2,4 m. Deve-se, contudo, lembrar das diferenças de profundidade dos registros dos dados observados neste estudo com os analisados por Vieira *et al.* (2007), onde o atrito com o fundo mais raso encontrado pelas ondas contribui para a dissipação de sua energia e a diminuição de suas alturas, conforme explicado anteriormente.

Entre os meses dezembro e maio, é possível verificar diversas ocorrências de H_s acima da média para o período, com registros que ultrapassaram 2m. Ao relacionar estas alturas de onda superiores a 2m, relacionando com as informações de período de pico (T_p) e suas direções (D_p) de incidência de onda, foi possível verificar que boa parte dessas ocorrências se deram com direções entre 340° e 40° , com T_p superiores a 15 segundos (Figura 21).

Figura 21: Altura Significativa de onda entre dezembro de 2016 e maio de 2017. As ondas tipo *swell* estão representadas por pontos pretos, e as tipo *sea* por pontos azuis. As ondas com direções entre 340° e 40° estão destacadas em cor rosa.



Fonte: O Autor (2019)

As análises das variações sazonais de H_s entre os dois períodos da série temporal indicam que maiores alturas de onda ocorridas entre os meses dezembro e maio estão associadas à entrada de campos de ondas do tipo *swell* no litoral do Ceará. Por outro lado, os maiores valores de H_s encontrados nos meses de agosto, setembro e outubro estão relacionados à intensificação dos ventos alísios, conforme mencionado anteriormente (Figura 20). Mesmo com períodos de pico elevados nos meses de dezembro a maio, as ondas do tipo *swell* na maioria das vezes não chegaram a ultrapassar as alturas médias das ondas tipo *sea* formadas entre os meses de julho e outubro. Em média, as ondas tipo *sea* tiveram H_s cerca de 10 a 20 cm maiores que as ondas tipo *swell*.

5.1.6 Identificação de Ondas *Swell*

Para o melhor entendimento da ocorrência de ondas *swell* entre dezembro de 2016 e novembro de 2017, foram investigados os principais eventos de chegadas dispersivas de ondas *swell*, através de uma análise sobre suas principais características (períodos de pico, alturas significativas e direções de incidência de onda). Para isso, foram escolhidos 3 (três) eventos de alta energia associados à ressaca do mar ou alertas de grandes ondas no litoral que foram noticiados nos veículos de imprensa local ou nacional. O primeiro evento diz respeito a uma ressaca que provocou danos à estruturas costeiras mas que não foram identificadas ocorrências de grandes ondas nos dados observados. O segundo evento refere-se à uma série de duas ocorrências consecutivas de ondulações com alto período de pico e grandes alturas de ondas que foi previsto com alguns dias de antecedência. Já o terceiro tem relação com um ocorrência de um evento ocorrido com grandes alturas de onda no segundo semestre do ano não associado com chegadas dispersivas de ondas *swell*.

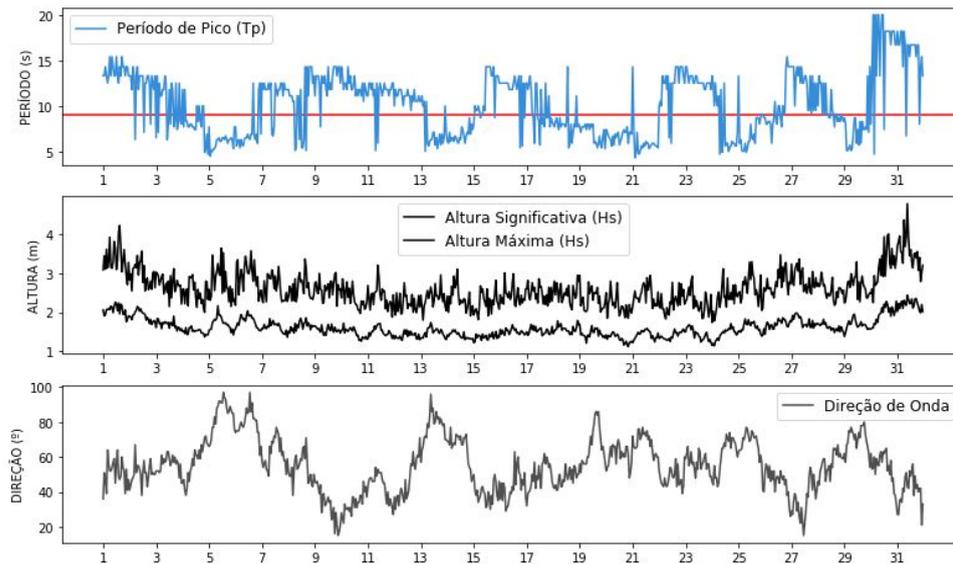
Vale ressaltar que eventos associados à entradas de ondas do tipo *swell* foram encontrados em praticamente todos os meses na série de dados aqui estudados. Entretanto, escolheu-se por relatar apenas ocorrências noticiadas em veículos de imprensa local.

5.1.6.1 Primeiro Evento (Janeiro de 2017)

No mês de janeiro de 2017, o jornal local CETV/Rede Globo noticiou um registro de ressaca do mar, que provocou destruição de uma obra de engenharia costeira em uma praia no município de Caucaia, região metropolitana de Fortaleza. Na situação, o jornal veiculou vídeos com registros do evento ocorrido entre os dias 15 e 16 de janeiro.

Através dos dados observados, foi possível encontrar um possível evento de chegada dispersiva de ondas *swell* que originou a ressaca veiculada pelo jornal local. Entre os dias 15 e 17 de março, foi encontrado um valor máximo de T_p de 14,3 segundos, registrado no primeiro dia de chegada do campo de ondas (Figura 22). Durante esta ocorrência, as ondas incidiram do quadrante Nordeste, com direções entre 30° e 60° . Contudo, em relação aos valores de H_s e H_{max} encontrados ao longo do mês de janeiro, não foi possível observar aumentos consideráveis nas alturas de onda entre esses dias, indicando um leve aumento de H_s de 1,4 m para máximo de 1,7 m encontrado no dia 16 de janeiro.

Figura 22: Série temporal de Período de Pico (painel superior), Altura Significativa e Altura Máxima (painel central) e Direção de Onda (painel inferior) para o mês de janeiro de 2017. A linha vermelha no gráfico de período de pico marca o limite entre ondas *sea* e ondas *swell*.



Fonte: O Autor (2019)

5.1.6.2 Segundo Evento (Março/Abril de 2017)

No dia 30 de março, o Jornal O Povo divulgou uma matéria em seu portal alertando sobre o risco de ressaca no litoral do Ceará (Figura 23). A matéria veiculava um aviso de mau tempo da Marinha do Brasil sobre uma ressaca que poderia ocorrer às 9h do dia 31 de março, e às 21h do dia 1º de abril, com previsão de ondas de 2,5 m entre Maranhão e Rio Grande do Norte, com ondas do quadrante NE/N. No final do mês de março e início de abril, um evento de chegada de ondas *swell* marcou o último dia de março, com duração de 3 dias adentrando no mês de abril. O evento teve início em 31 de março e terminou com a chegada de um novo evento de *swell* no dia 4 de abril, ocorrendo assim, dois eventos consecutivos.

O primeiro *swell* alcançou a costa do Ceará com Tp de 20 segundos, com Hs variando de 1 m a 2,6 m e Hmax alcançando até 4,4 m com direções de ondas do quadrante Norte. O segundo evento ocorreu consecutivamente ao primeiro, iniciando em 4 de abril e teve duração de 4 dias, com Tp de 20 segundos e alturas maiores que o primeiro evento, com Hs alcançando até 3 m e Hmax atingindo valores superiores a 5,7 m. Este segundo evento encontrou variações de direção de onda de 347° a 0° e 0° a 45° (Figura 24).

Figura 23: Matéria do Jornal O Povo intitulada “Marinha do Brasil emite alerta para risco de ressaca no litoral cearense” no dia 30 de março de 2017.

OPOVO online Notícias Esportes Divirta-se Vida & Arte ASSINE Q

Notícias

Marinha do Brasil emite alerta para risco de ressaca no litoral cearense

As ondas poderão chegar até 2,5 metros
20:20 | 30/03/2017



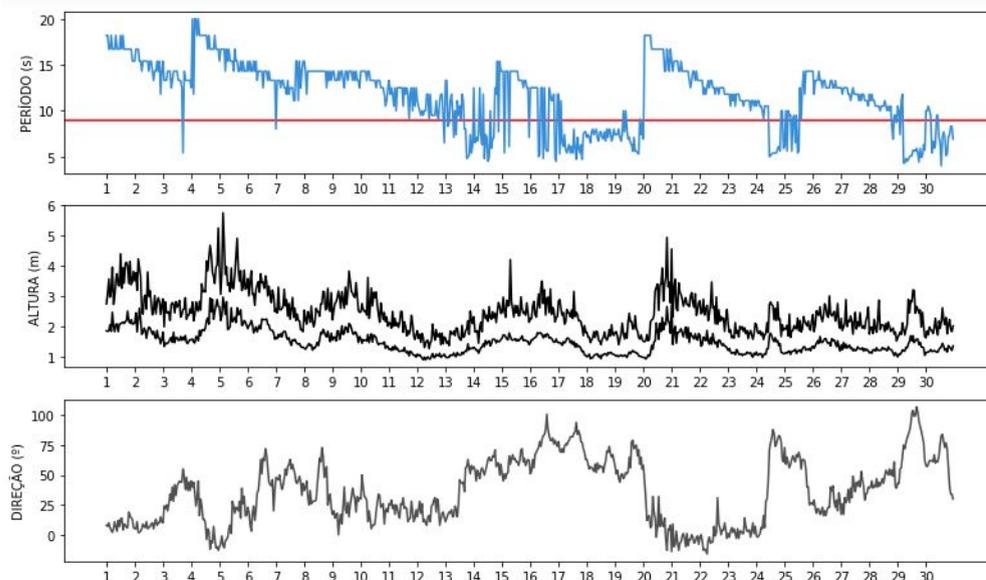
A Marinha do Brasil informa aos navegantes do litoral cearense sobre aviso de ressaca que poderá acontecer às 9h desta sexta-feira, 31, e às 21h de sábado, 1º.

O órgão ressalta que a atenção seja redobrada para as demais embarcações quanto ao material de salvatagem, estado geral dos motores e casco, bomba de esgoto do porão, equipamentos de rádio e outros itens de segurança.

A previsão é de que venham ondas NE/N, de 2,5 metros, entre as Ilhas de Santana (MA) e Touros (RN).

Fonte: Jornal O Povo (2017)

Figura 24: Série temporal de Período de Pico (painel superior), Altura Significativa e Altura Máxima (painel central) e Direção de Onda (painel inferior) para o mês de abril de 2017. A linha vermelha no gráfico de período de pico marca o limite entre ondas *sea* e ondas *swell*.



Fonte: O Autor (2019)

5.1.6.3. Terceiro Evento (Outubro de 2017)

No início de outubro, o jornal CETV/Rede Globo noticiou em TV aberta a previsão de uma ocorrência de ressacas sob o título “Ressaca do mar ocasiona ondas de até três metros no litoral de Fortaleza”. A matéria veiculava um alerta da Capitania dos Portos sobre a ocorrência de ondas que poderiam chegar até 3 metros de altura entre os dias 6 e 8 de outubro (Figura 25).

As análises dos dados coletados pela bóia indicaram ocorrência de ondas com Hs de 2,9 m e Hmax 5,05 m encontradas no dia 6 de outubro, e Hs de 2,8 m e Hmax de 4,96 m no dia 7 de outubro. Entretanto, ao investigar os valores de período de pico entre os dias 6 e 8 de outubro, não foram observadas ocorrências de chegadas dispersivas de ondas do tipo *swell*, indicando que o evento de ressaca tenha sido ocasionado por ondas do tipo *sea*, sendo observada a ocorrência de ondas do quadrante Leste.

Possivelmente a causa para esse evento de ondas com maiores alturas nessa região está relacionada com as maiores velocidades de vento encontradas no mês de outubro, influenciadas pelo deslocamento da ZCIT para norte de sua posição climatológica. Neste período as velocidades do vento podem alcançar até 16 m/s, conforme estudadas anteriormente no item 4.1 deste trabalho, associadas às direções mais bem definidas de incidência de vento na região contribuem para a ampliação das alturas de onda.

As ondas do tipo *swell* foram encontradas em praticamente toda a série observada, com exceção de alguns meses. Contudo, nem todas as ocorrências de onda com altos períodos de pico necessariamente apresentaram alterações consideráveis nas condições de altura de onda (Hs ou Hmax) ou mesmo foram reportadas com maior atenção nos veículos de imprensa local. Além disso, foram identificadas ocorrências de ondas com baixos períodos de pico mas que apresentaram elevadas alturas que foram objeto de atenção nos veículos de imprensa local.

Figura 25: Matéria do Jornal O Povo intitulada “Marinha do Brasil emite alerta para risco de ressaca no litoral cearense” no dia 06 de outubro de 2017.



Fonte: Portal G1 (2017)

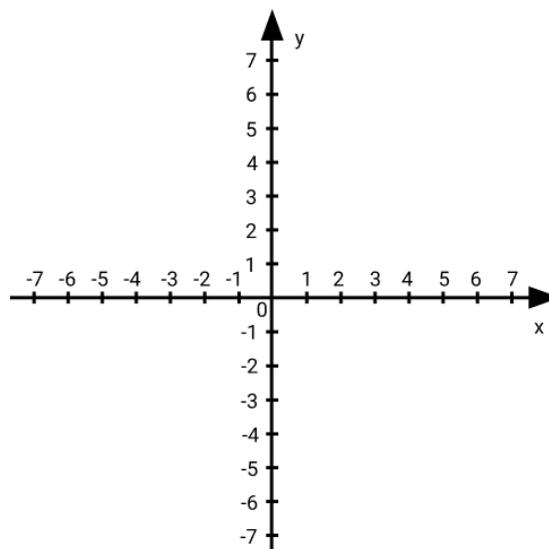
5.2 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DO WAVEWATCH III

Para a comparação com os resultados provenientes do WAVEWATCH III, será analisada apenas a série temporal respectiva ao período de janeiro a novembro de 2017. Assim, será estudado o nível de precisão e representatividade dos principais padrões de variações sazonais nas características de vento e onda dos resultados do modelo global WW3.

5.2.1 Análise do Vento

Para as comparações das direções e intensidade de vento entre os dados observados e os resultados do modelo numérico, as análises de direção e intensidade foram divididas em suas componentes U e V, levando em consideração que as saídas dos dados de vento do WW3 se encontram neste respectivo padrão. Desta forma, cada componente (U e V) representa a direção e a intensidade do vento em m/s, de acordo com sua respectiva orientação no plano cartesiano, onde a componente U representa a intensidade e direção do vento na direção Leste-Oeste, e a componente V diz respeito à intensidade e direção do vento na direção Norte-Sul. Valores positivos de U e V indicam ventos de Oeste e Sul, respectivamente. Já os valores negativos de U e V indicam ventos de Leste e Norte (Figura 26).

Figura 26: Representação do plano cartesiano, onde o eixo X corresponde à componente U (intensidade e direção leste-oeste), e o eixo Y representa a componente V (intensidade e direção norte-sul).



Fonte: matematicabasica.net

5.2.1.1 Componente U do Vento

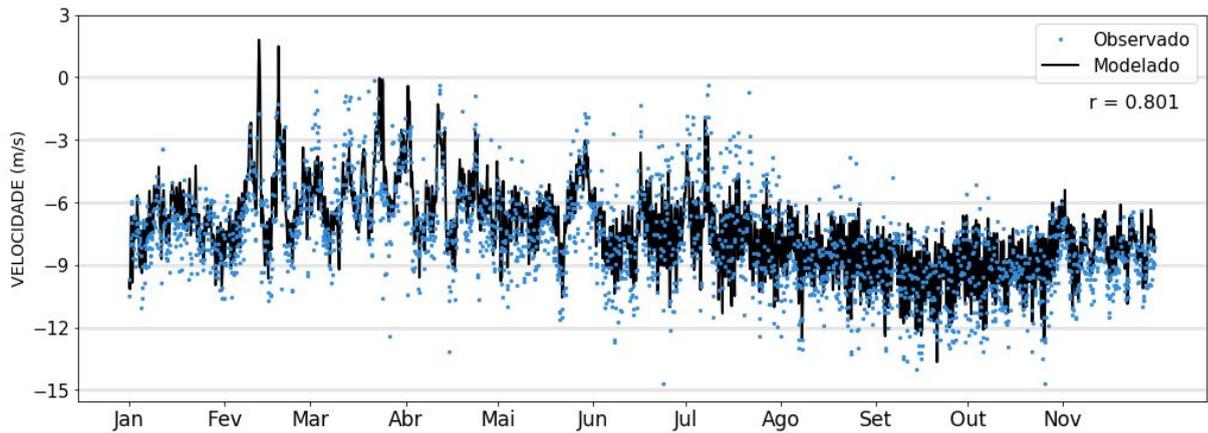
No geral, as análises das médias dos resultados do WW3 representam as tendências de aumento e decréscimo de velocidade e direção do vento tanto na componente U quanto na componente V durante o período estudado, representando os principais padrões meteorológicos e climatológicos influenciados pelo deslocamento latitudinal da ZCIT na região equatorial.

Contudo, os valores médios encontrados para a componente U do vento evidenciam que os dados da bóia foram subestimados pelo modelo em praticamente todos os meses de maneira uniforme, embora situações nas quais houve subestimação particularmente grande ocorram nos meses de fevereiro, março e abril (Figura 27, Figura 28a e Figura 28b). Os resultados do modelo para componente U foram menores que os dados observados em média de 0,2 m/s a 0,9 m/s. Apenas no mês de março a componente U encontrou sua média bem representada pelos resultados do WW3, com o resultado médio do modelo para este mês de -5,35 m/s, quando o observado foi de -5,4 m/s. No mês de julho, a média do resultado do modelo foi superestimada, apresentando velocidades de -7,5 m/s, enquanto o observado foi de -6,8 m/s, como pode ser visto na Figura 29.

É possível perceber que o vento resultante do modelo numérico muitas vezes indica uma direção de vento oposta do dado observado, ocorrendo ao longo de praticamente toda a série temporal, mas com maiores intensidades nos meses de fevereiro, março e abril (Figura 28a). Em certos eventos, enquanto o vento observado pela bóia apresentou um fluxo de determinado sentido, o modelo apresentou sentido inverso. A presença da ZCIT em sua posição ao sul e a existência de outros eventos meteorológicos conforme discutimos anteriormente, pode provocar maiores variações na direção e intensidade do vento que um modelo numérico com baixa resolução espacial pode não representar com fidelidade.

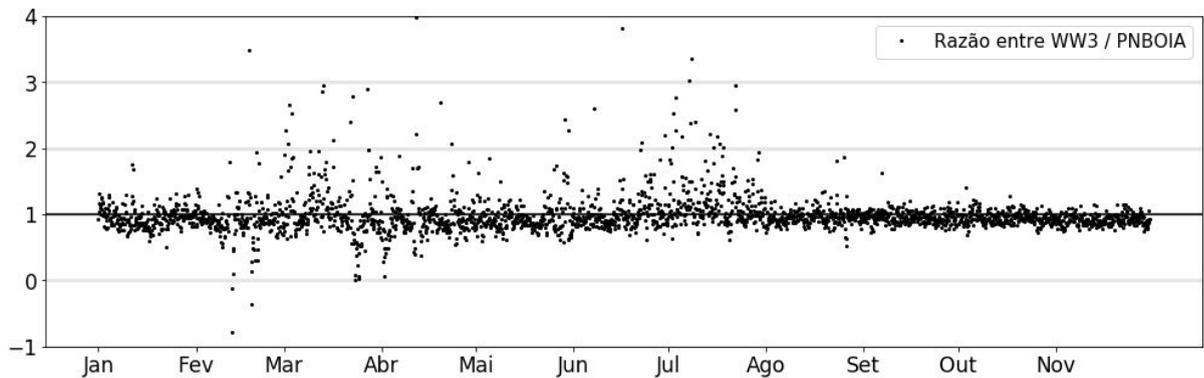
Apesar de diferenças na direção e intensidade do vento sugerir resultados incongruentes com os dados observados, pode-se perceber que de forma geral parece haver razoável correlação entre os resultados do WW3 e os dados da bóia, com tendência do modelo superestimar meses de maiores intensidades de vento e subestimar os meses com menores intensidades de vento. Dessa forma, os resultados do modelo parecem ser mais apropriados para representar as condições de vento na região no segundo semestre.

Figura 27: Série temporal da Componente U do Vento e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (pontos azul) e dos resultados do WW3 (pontos preto) entre janeiro e dezembro de 2017.

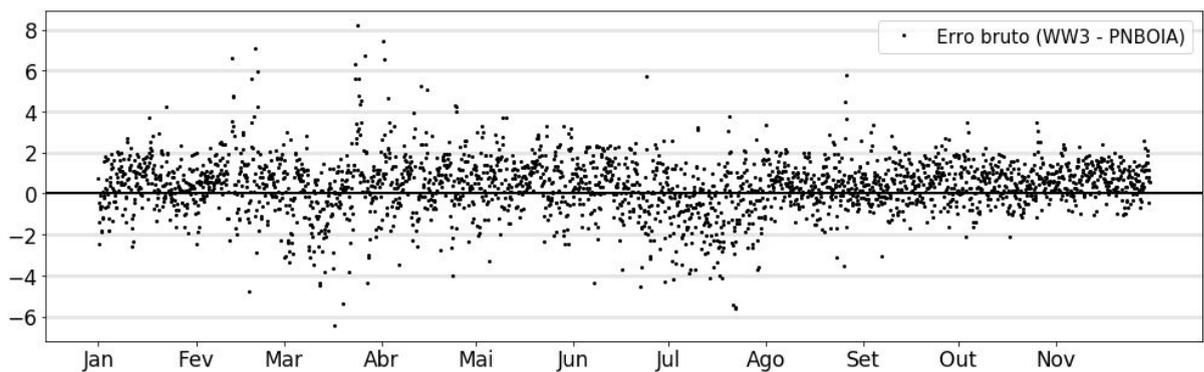


Fonte: O Autor (2019)

Figura 28: Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados da Componente U do Vento do WW3 e os dados do PNBOIA entre janeiro e dezembro de 2017. Para o painel superior, valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação. Para o painel inferior, valores acima da linha preta indicam subestimação do modelo.



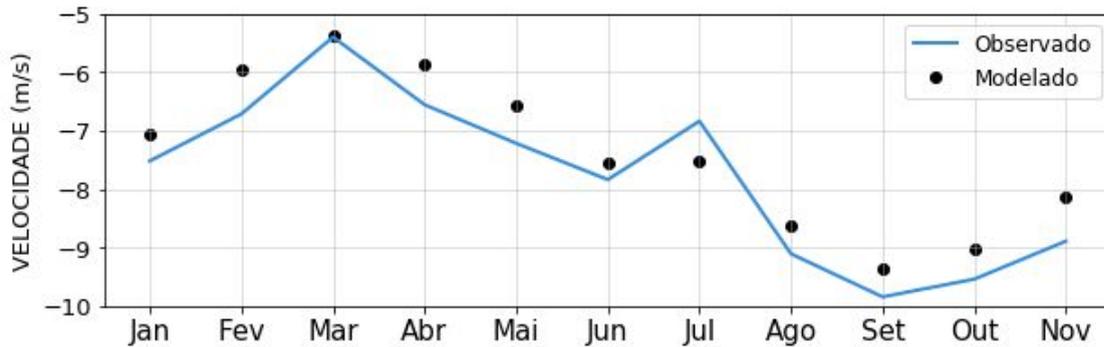
(a)



(b)

Fonte: O Autor (2019)

Figura 29: Médias mensais da Componente U do Vento dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e dezembro.



Fonte: O Autor (2019)

5.2.1.2 Componente V do Vento

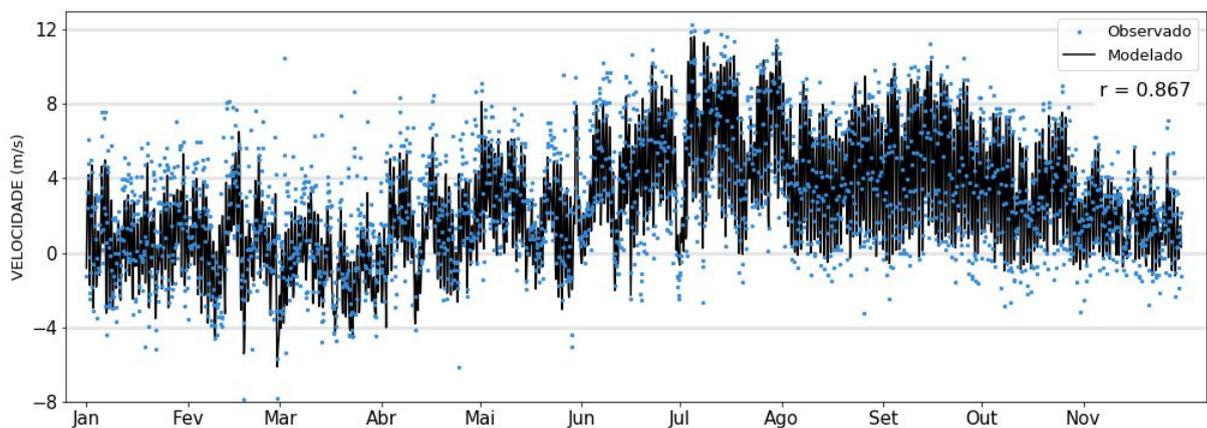
Assim como encontrado na componente U, as análises das médias da componente V do vento representam as tendências de aumentos e decréscimos de intensidade do vento durante o período analisado, indicando menores velocidades no primeiro semestre e maiores velocidades no segundo semestre do ano (Figura 30). De forma geral, o WW3 subestimou as variações de vento no primeiro semestre e apresentou maior concordância com os dados observados no segundo semestre. Para os coeficientes de correlação entre os parâmetros de onda dos resultados obtidos pelo WW3 e os dados observados, a componente V do vento apresentou melhor correlação, com valor de 0,867 (Tabela 5).

Os valores médios encontrados para a componente V demonstraram que o modelo subestimou as velocidades médias dos dados observados em de até 1,2 m/s no primeiro semestre de 2017. Vale ressaltar ainda que, durante o mês de março, foi encontrada uma média de -0,8 m/s, enquanto o dado observado indicou média de 0,4 m/s, indicando que em média o modelo representou a componente V do vento com direções contrárias ao vento observado pela bóia neste período. Por outro lado, a análise das médias dos resultados do WW3 no segundo semestre de 2017 indicou que o WW3 conseguiu representar bem os dados observados, apresentando diferenças de no máximo 0,20 m/s entre os resultados do modelo e os dados observados, como pode ser visto na (Figura 31).

As análises da série temporal para o primeiro semestre parecem indicar que o WW3 apresentou menores faixas de variação em relação aos dados observados, tanto em direção como em

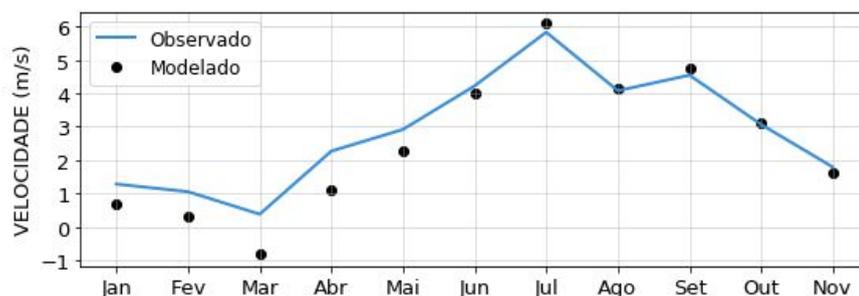
intensidade do vento. Enquanto isso, no segundo semestre, os resultados do modelo parecem apresentar uma faixa de variação de direção e intensidade semelhantes aos dados observados, apresentando uma maior concordância entre eles. Ao longo da série, é comum ainda identificar situações nas quais os resultados do modelo apresentam sentido oposto ao vento observado (Figura 32a). Tal situação acontece principalmente nos meses de menor intensidade de vento, principalmente entre fevereiro e abril, quando o Erro bruto aparece deste período aparece superior ao Erro bruto nos meses com ventos mais intensos. (Figura 32b)

Figura 30: Série temporal da Componente V do Vento dos dados observados (pontos azul) e dos resultados do WW3 (pontos preto) entre janeiro e dezembro de 2017.



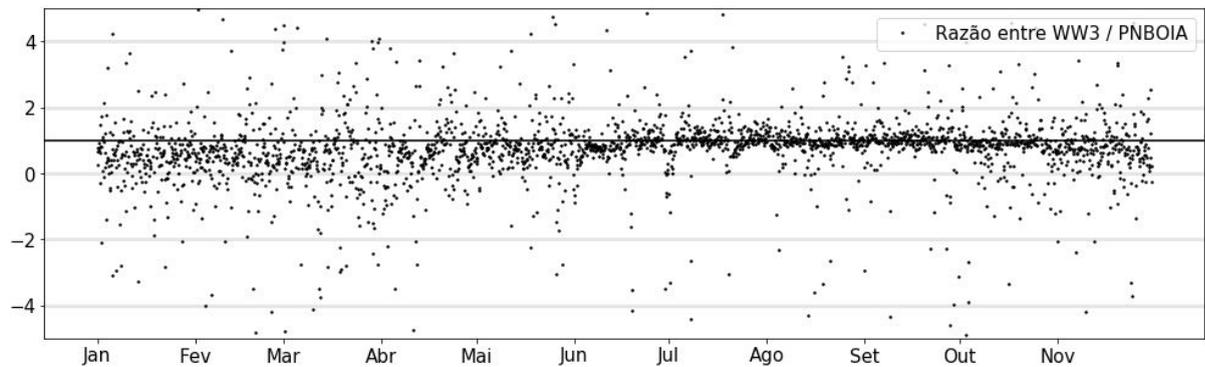
Fonte: O Autor (2019)

Figura 31: Médias mensais da Componente V do Vento dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e dezembro de 2017.

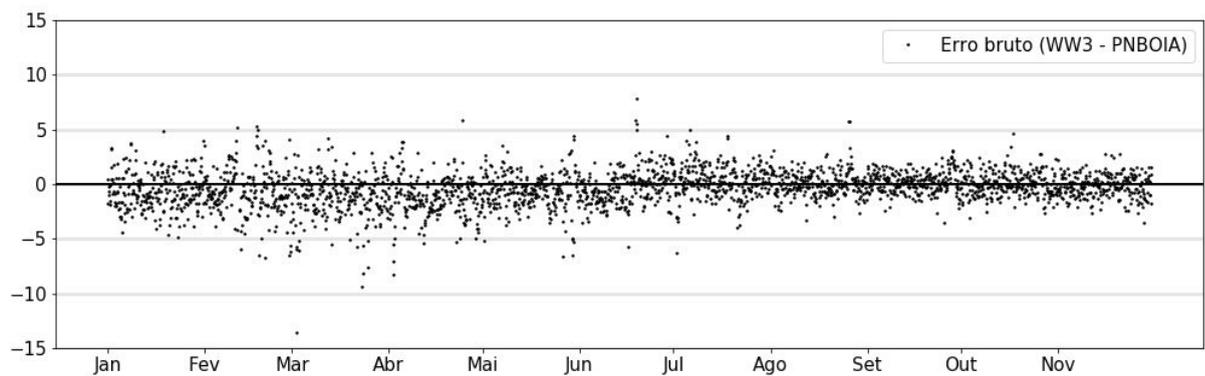


Fonte: O Autor (2019)

Figura 32: Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados da Componente V do Vento do WW3 e os dados do PNBOIA. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação.



(a)



(b)

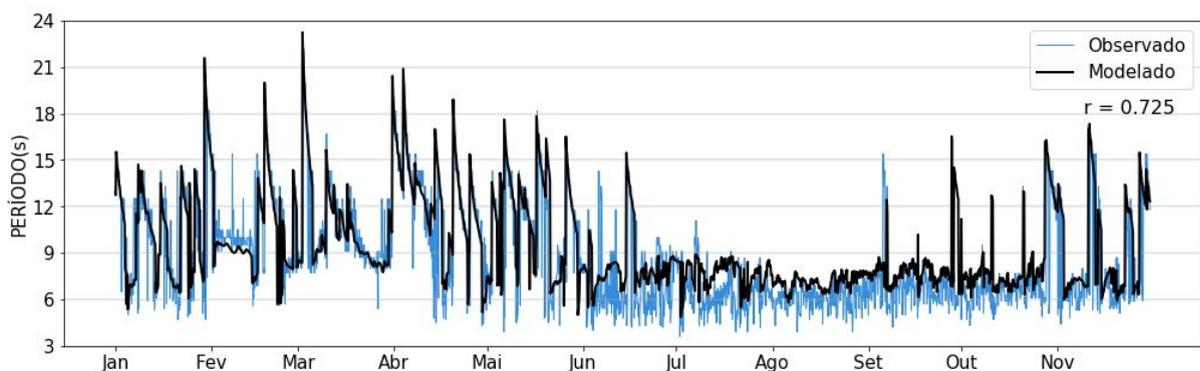
Fonte: O Autor (2019)

5.2.2 Período de Pico

Os resultados do WW3 apresentaram bem as variações de Período de Pico (T_p) durante a série temporal, com maiores valores de T_p no primeiro semestre do ano devido a ocorrência de ondas *swell* e menores valores de T_p no segundo semestre relacionados à formação de ondas *sea* (Figura 33). Apesar de boa representação das variações de T_p ao longo do ano, em praticamente todos os meses o WW3 superestimou os valores de T_p , principalmente no segundo semestre. Apesar do período de pico apresentar a menor taxa de correlação (0,725) entre todos os parâmetros de onda (Tabela 5), o WW3 demonstrou representar bem as principais ocorrências de ondas com maiores períodos.

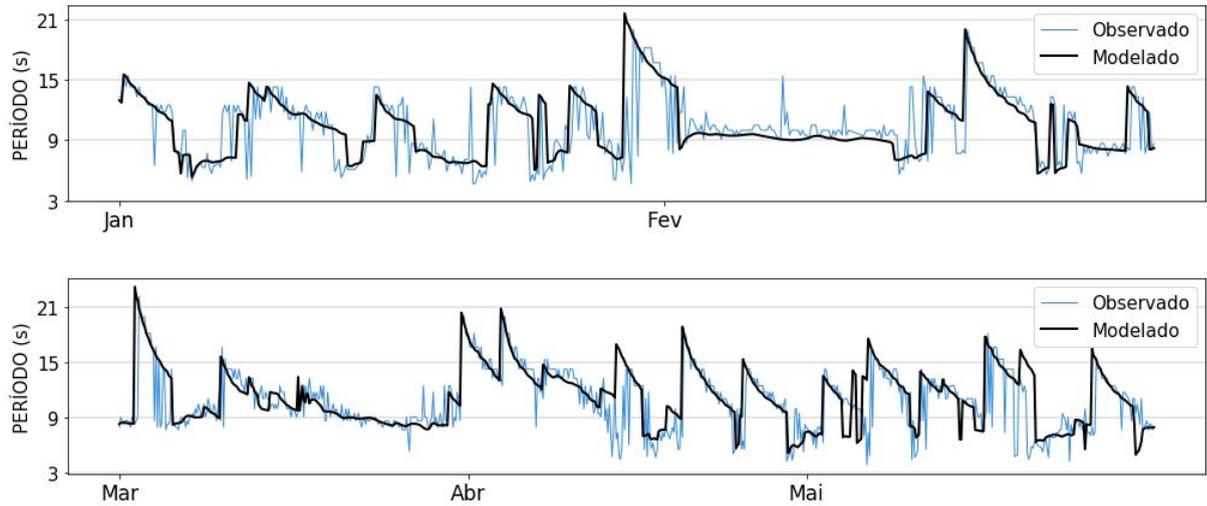
Ao comparar o primeiro com o segundo semestre, percebe-se que o modelo conseguiu representar ocorrências de chegadas dispersivas de ondas *swell* com boa precisão, representando melhor os valores de T_p em relação ao segundo semestre (Figura 34). No segundo semestre o modelo pareceu ter dificuldade em capturar as ocorrências de período de pico menores, relacionados às ondas do tipo *sea*. No entanto, entre os meses de setembro e novembro, o modelo parece representar de maneira ineficaz a chegada de eventos de *swell*, com uma ocorrência particularmente insatisfatória, quando as saídas do WW3 indicam a ocorrência de um T_p especialmente alto (superior à 16 segundos), que não foi encontrado nos dados observados. Essa superestimação dos dados observados e sua variação ao longo da série temporal pode ser notada nos gráficos de Razão e Erro bruto entre os resultados do WW3 e do PNBOIA, onde no primeiro semestre a Razão muito próxima de 1 e o Erro bruto em grande parte da série temporal é próximo ou ligeiramente abaixo de zero indicam uma superestimação relativamente menor no primeiro semestre e maior no segundo semestre (Figura 35a e Figura 35b).

Figura 33: Série temporal de Período de Pico e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (linha azul) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e novembro de 2017.



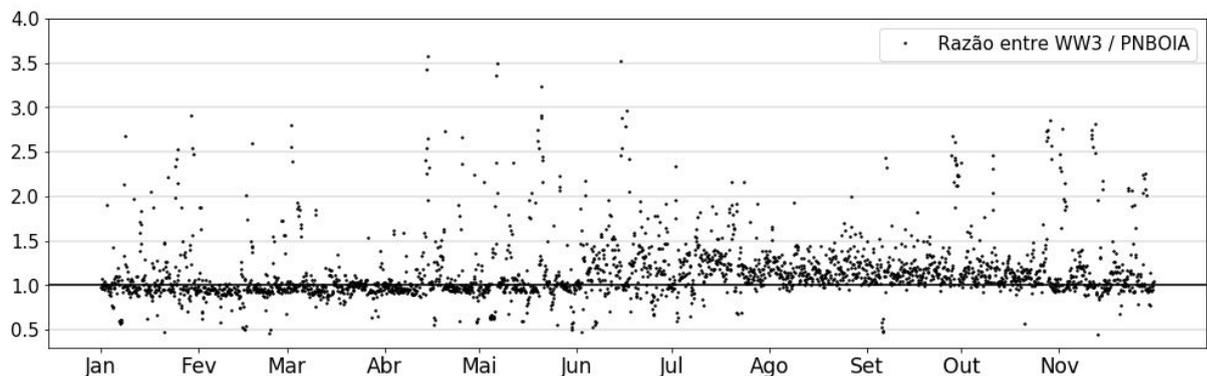
Fonte: O Autor (2019)

Figura 34: Série temporal de Período de Pico dos dados observados (linha azul) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e maio, período de maior concordância entre o WW3 e os dados observados para período de pico entre janeiro e maio de 2017.

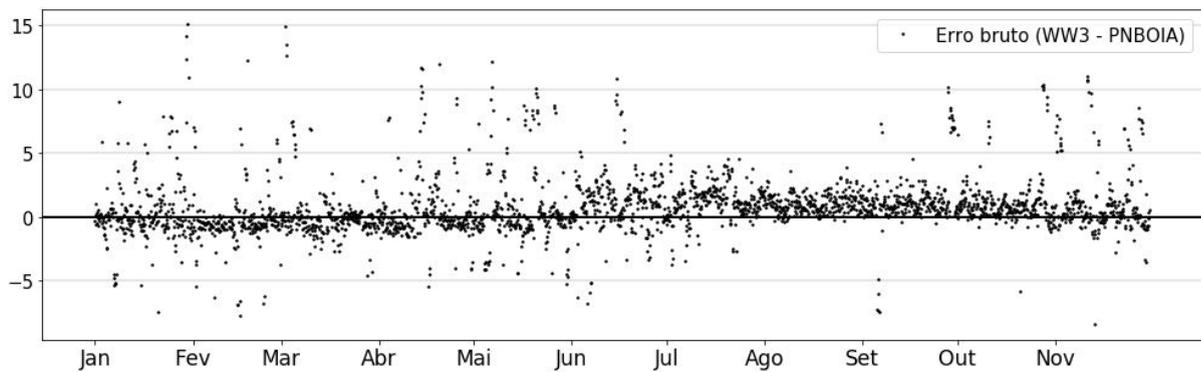


Fonte: O Autor (2019)

Figura 35: Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados de Período de Pico do WW3 e os dados do PNBOIA entre janeiro e novembro de 2017. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha preta indicam subestimação.



(a)



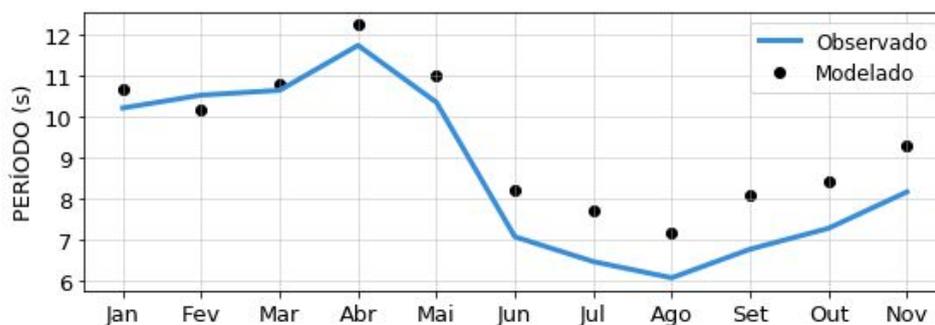
(b)

Fonte: O Autor (2019)

Apesar dos cálculos de Erro bruto e Razão indicarem subestimação do período de pico em diversas regiões pontuais da série (Figura 35a), não foi encontrada diferenças consideráveis nas análises de ocorrências de ondas *swell* (Figura 34), sendo encontrado em alguns momentos da série temporal um antecipação de 3h a 6h na entrada de *swell* em relação ao dado observado, levando o Erro bruto a calcular a diferença entre valores extremos de um ponto com período superior correspondendo a onda *swell* e um ponto com período inferior correspondendo à onda *sea*, mesmo a série de dados correspondendo aos mesmos intervalos e medições horárias.

As médias mensais de T_p nos meses de janeiro a maio indicaram uma diferença de aproximadamente 0,5 segundos entre os resultados do WW3 e os dados observados (Figura 36). A partir de junho, as diferenças entre T_p do modelo numérico e dos dados observados começam a ser mais expressivas. Entre junho e novembro, os resultados de T_p provenientes do WW3 superestimaram em média de 3 a 4 segundos os dados observados em praticamente todos os meses. (Figura 36).

Figura 36: Médias mensais de Período de Pico dos dados observados (linha azul) e dos dados provenientes do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.



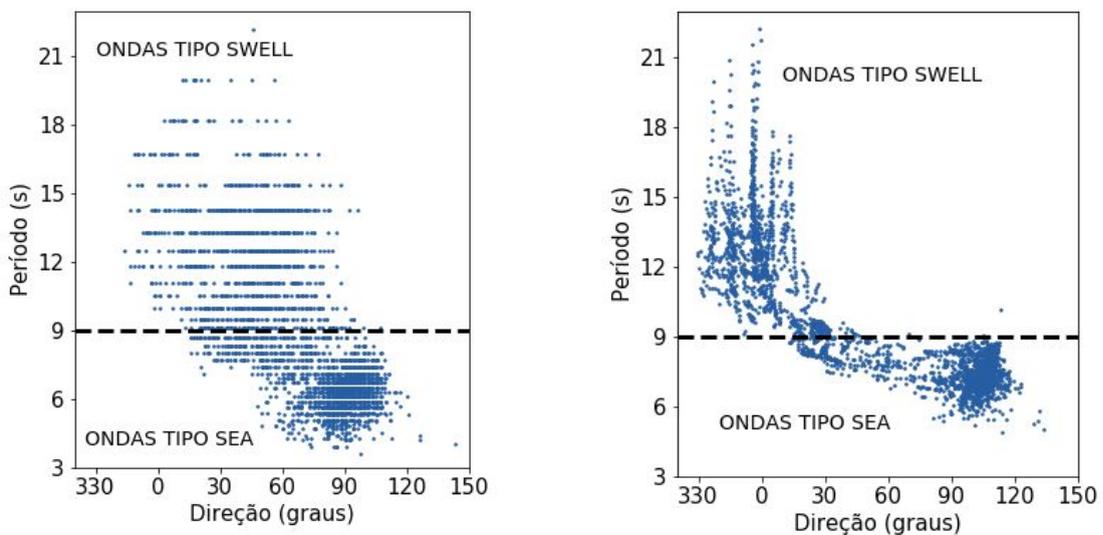
Fonte: O Autor (2019)

5.2.3 Direção de Onda

Assim como nos dados observados, os resultados do WW3 apresentaram variações sazonais entre as direções de onda, apresentando direções do quadrante Norte e Nordeste no primeiro semestre, e direções de Leste no segundo semestre. Contudo, as direções incidentes de onda do WW3 foram consideravelmente subestimadas no primeiro semestre e superestimadas no segundo semestre do ano. Embora o valor do RMSE encontrado para os valores de direção de onda apresente maior valor entre todos os parâmetros (Tabela 4), vale lembrar que o RMSE deve ser analisado individualmente levando-se em consideração que os valores de direção de onda se encontram num intervalo entre 340° e 120°.

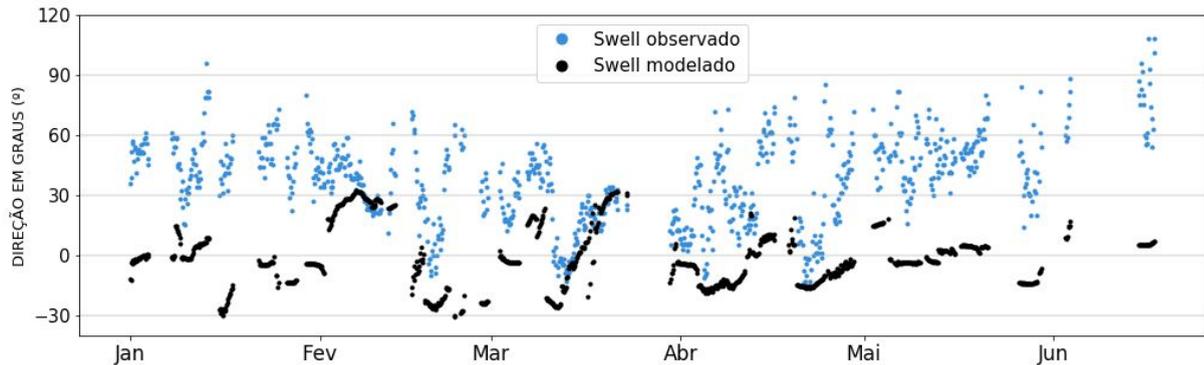
Em média, o primeiro semestre dos resultados do WW3 divergiram dos dados observados com diferenças entre 20 e 30°. Dessa forma, onde os dados observados apresentam, no geral, maiores ocorrências de ondas de quadrante Nordeste, os resultados do WW3 indicaram maiores ocorrências de ondas do quadrante Norte, associadas à ondas tipo *swell* (Figura 37 e Figura 38), indicando uma subestimação de direção de onda por parte do modelo. Enquanto isso, no segundo semestre, os dados provenientes do modelo numérico apresentaram uma maior ocorrência de ondas entre 100 e 110°, onde os dados observados indicaram maiores registros entre 80 e 100°, indicando uma superestimação da direção de onda neste período (Figura 39).

Figura 37: Relação entre Direção de Onda e Período de Pico. Os gráficos do lado esquerdo (a) são resultados dos dados observados, enquanto os gráficos do lado direito (b) são resultados do WAVEWATCH III entre janeiro e novembro de 2017.



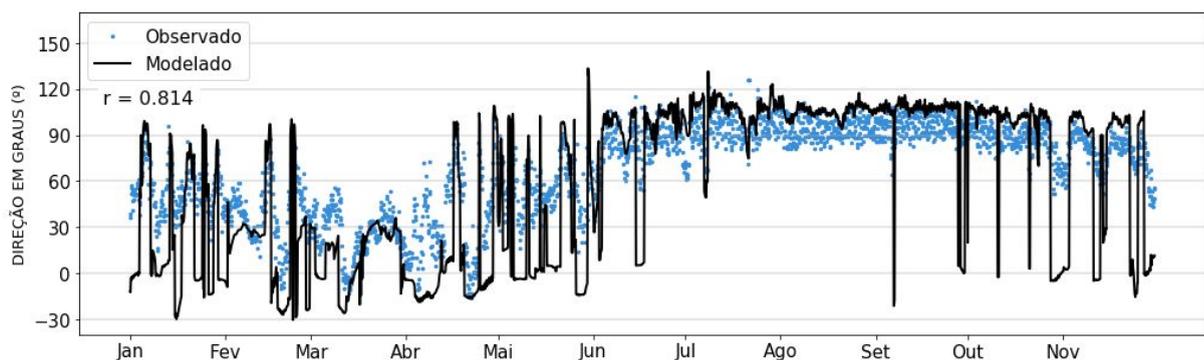
Fonte: O Autor (2019)

Figura 38: Série temporal de Direção de Ondas do tipo *swell* dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.



Fonte: O Autor (2019)

Figura 39: Série temporal de Direção de Onda e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (pontos azuis) e dos resultados do WW3 (linha preta) entre janeiro e novembro de 2017.



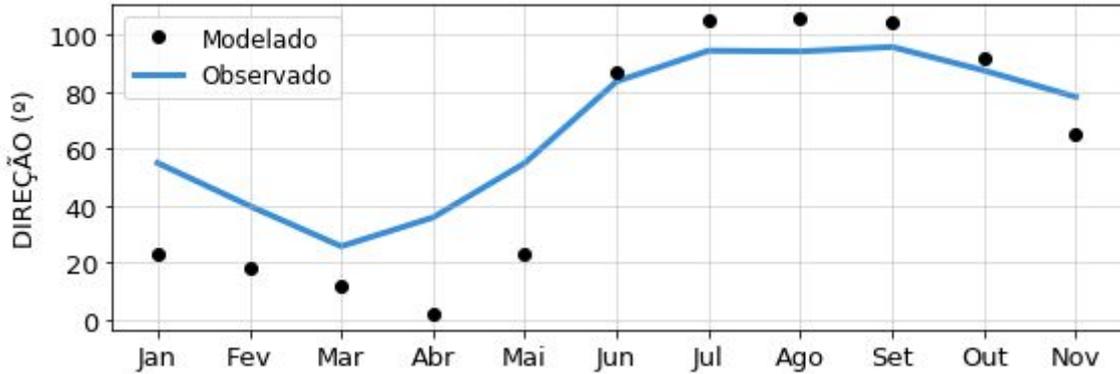
Fonte: O Autor (2019)

Mesmo subestimando ou superestimando as sazonalidades de direções de onda, os resultados do WW3 para o segundo semestre apresentaram em média uma maior proximidade com os dados observados (Figura 40), onde as menores valores no Erro bruto apresentam menores diferenças entre o resultado do modelo e os dados observados (Figura 41a). Dessa forma, foi identificado que no segundo semestre, em geral, o modelo pareceu representar melhor os dados observados, especialmente entre agosto e outubro, quando o regime de ondas é formado principalmente por ondas do tipo *sea*.

Apesar da média mensal do mês de junho apresentar uma aparente proximidade entre a direção de onda resultante das simulações do WW3 e os dados observados, as análises individuais da tendência encontrada neste mês indicam uma superestimação que pode não ter sido identificada na

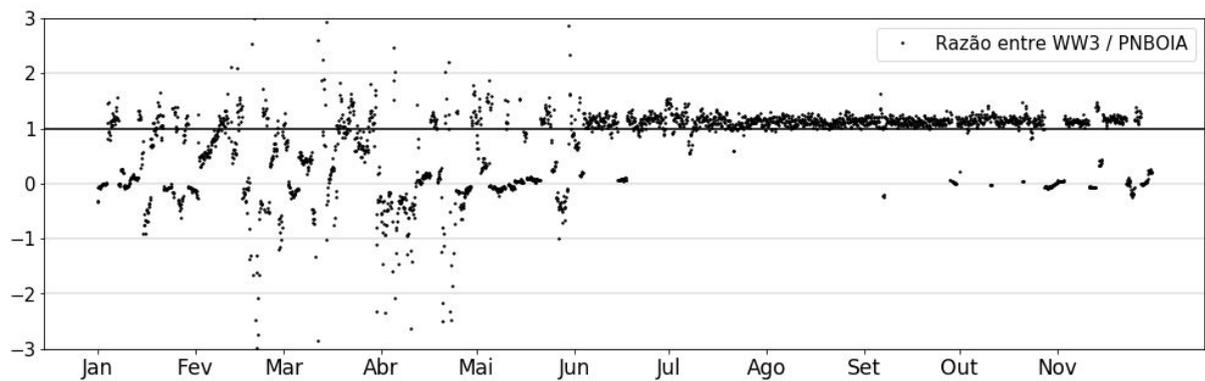
média mensal pela presença de valores extremos nos resultados do WW3, diferenças de até 50° na direção de onda, como pode ser observado na Figura 40.

Figura 40: Médias mensais de Direção de Onda dos dados observados (linha azul) e dos resultados do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.

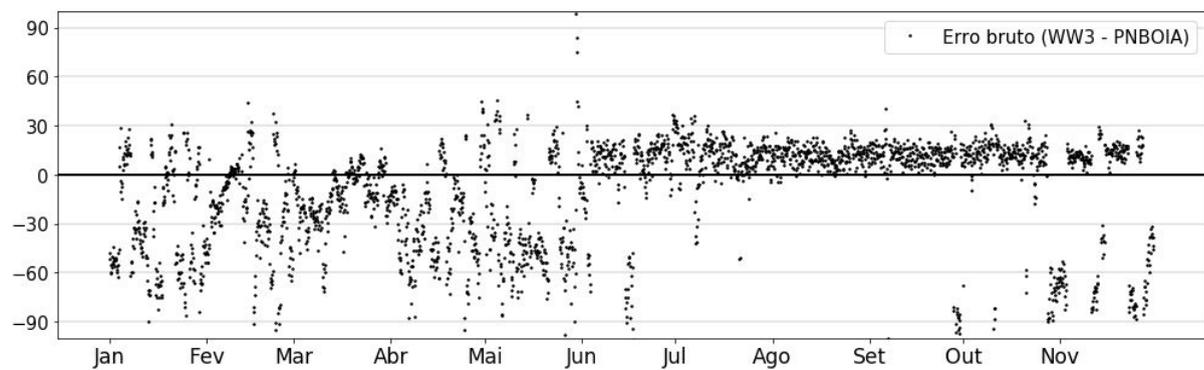


Fonte: O Autor (2019)

Figura 41: Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os resultados de direção de onda do WW3 e os dados do PNBOIA. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indicam superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha indicam subestimação.



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2019)

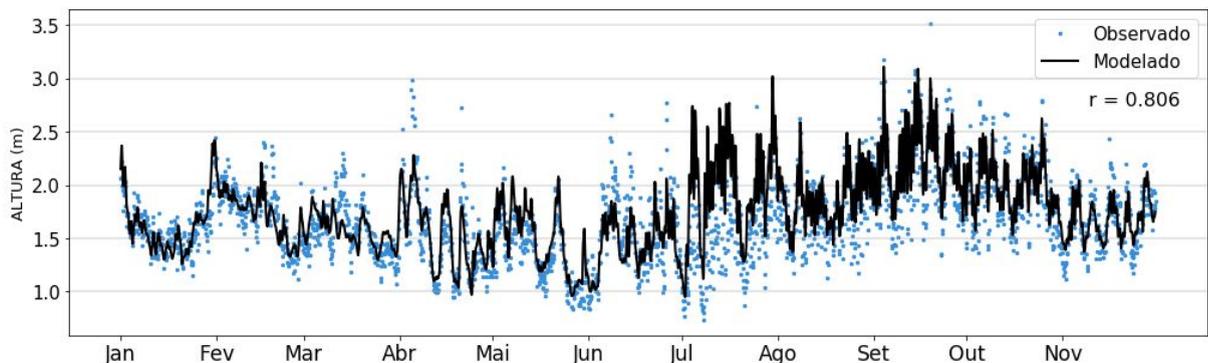
Quando comparado as ocorrências de ondas relacionando sua direção de incidência com seu período de pico, observa-se que o WW3 encontrou maiores ocorrências de ondas do tipo *sea* concentradas principalmente em um ângulo de incidência de 90° a 120° , enquanto os dados observados indicaram que as ondas do tipo *sea* se concentram principalmente entre 70° e 100° . Além disso, o modelo global superestimou as ocorrências de período de pico, indicando poucas ocorrências em períodos inferiores a 6 segundos. (Figura 38 e Figura 39).

Ainda sobre a relação entre direção de onda dos resultados do WW3 e os dados observados, foi possível encontrar uma maior concentração de valores extrapolados nas saídas do WW3, indicando maiores variações de direções de ondas, com incidências de 330° a 0° e de 0° a 120° , diferente dos dados observados, que por sua vez apresentaram menores variações de direções ao longo do ano, concentrando-se prioritariamente entre 20° e 110° (Figura 37). Vale ressaltar que o WW3 registrou poucas ocorrências de ondas *swell* acima de 30° (3% das ocorrências, enquanto a maior parte das ondas *swell* corresponderam a direções acima de 30° (68,2%).

5.2.4 Altura Significativa

Em geral, os resultados do WW3 para Altura Significativa (Hs) indicaram menores alturas no primeiro semestre e maiores alturas no segundo semestre, indicando o mesmo padrão sazonal encontrado nos dados observados principalmente no primeiro semestre do ano. Por outro lado, os resultados de Hs do modelo para o segundo semestre do ano foram superestimados em relação aos dados observados, indicando diferenças de até 1 m entre Hs obtido pelo WW3 comparado aos obtidos pela bóia nesse período do ano. Tendo em vista a superestimação do WW3 nos valores de período de pico, especialmente no segundo semestre, é natural que os valores de Hs também sejam superestimados nessa época do ano, especialmente entre julho e outubro (Figura 42). As comparações dos valores de Hs do WW3 com os dados do PNBOIA, parecem indicar uma concordância ligeiramente maior entre as ocorrências de menores alturas de onda em relação às maiores alturas, indicando que o modelo conseguiu representar melhor as menores alturas de onda.

Figura 42: Série temporal de Altura Significativa e Coeficiente de Correlação (r) dos dados observados (pontos azul) e dos dados provenientes do WW3 (pontos preto) entre janeiro e novembro de 2017.



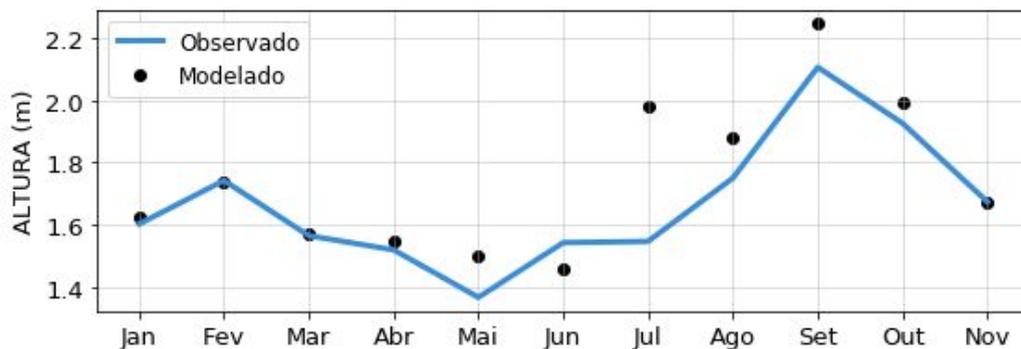
Fonte: O Autor (2019)

Analisando as médias mensais, os meses em que o WW3 melhor representou os dados observados foi em janeiro, fevereiro, março, abril, e novembro, sendo encontrado em média uma diferença de até 0,05 m entre o modelo e a bóia (Figura 43). Apenas a média do mês de junho foi subestimada pelo modelo, apresentando valor de Hs superior que o Hs observado de aproximadamente 0,1 m. No segundo semestre, a tendência do modelo foi de superestimar os valores de Hs nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, sendo julho o mês de maior superestimação média por parte do modelo, e os meses de agosto, setembro e outubro os valores superestimaram entre 0,05 e 0,1 m os dados observados.

Em geral, as análises comparativas de Hs indicaram superestimação dos dados observados em boa parte dos meses, principalmente durante o segundo semestre do ano, quando a ocorrência de ondas tipo *sea* é predominante. Neste período, a Razão entre os valores resultantes do WW3 e os dados do PNBOIA indicam que em geral os valores de Hs do modelo não são satisfatórios para o segundo período do ano, especialmente nos meses de julho e agosto (Figura 44a). Já nos períodos que foram observadas ocorrências de ondas *swell* no primeiro semestre, o modelo parece representar bem os valores de Hs de forma semelhante à qual representou satisfatoriamente os valores de Tp nesse primeiro período do ano.

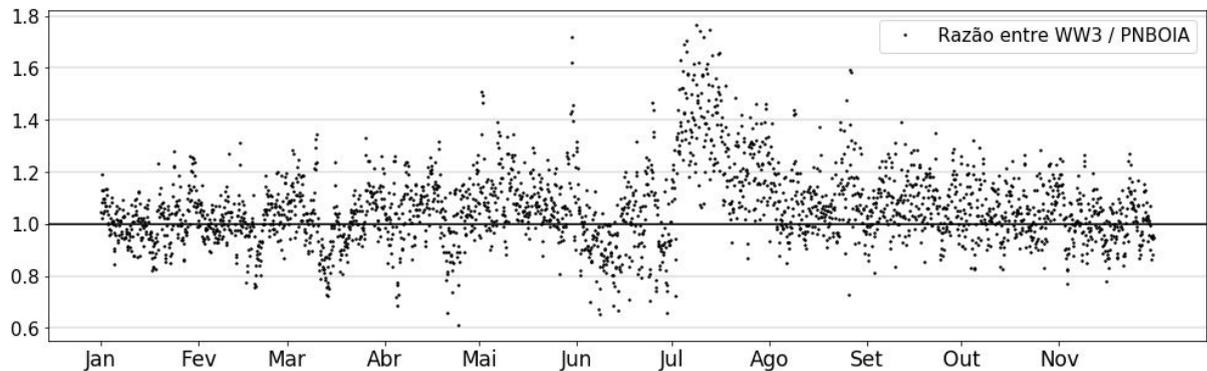
Quando se trata dos valores médios mensais de Hs encontrados pelo WW3, o modelo apresentou um bom desempenho nos meses do primeiro semestre, com exceção de maio, onde superestimou consideravelmente os resultados de Hs. O segundo semestre foi marcado por uma superestimação dos resultados do WW3, além disso, a média dos resultados do modelo numérico apresentaram não seguir os mesmos padrões de evolução das alturas de onda neste período (Figura 43).

Figura 43: Médias mensais de Altura Significativa dos dados observados (linha azul) e dos dados provenientes do WW3 (pontos pretos) entre janeiro e novembro de 2017.

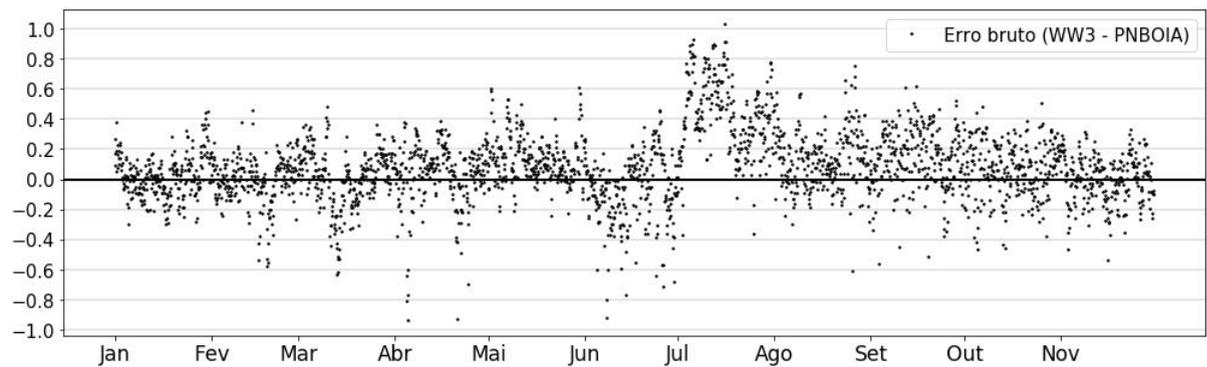


Fonte: O Autor (2019)

Figura 44: Série temporal de (a) Razão e (b) Erro bruto entre os dados de Altura Significativa do WW3 e os dados do PNBOIA entre janeiro e novembro de 2017. Quanto mais próximos os valores se encontram da linha preta, menor é a diferença entre os resultados do modelo e os dados observados. Valores acima da linha preta indica superestimação do WW3, enquanto valores abaixo da linha preta indicam subestimação.



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 4: Medidas estatísticas para os resultados do WAVEWATCH III (a) e do PNBOIA (b)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	75% Percentil
Hs (m)	0,95	3,11	1,75	0,37	1,95
Tp (s)	4,87	23,25	9,41	2,98	11,56
Dp (°)	0	359	136	118	112

(a)

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	75% Percentil
Hs (m)	0,73	3,51	1,67	0,38	1,89
Tp (s)	3,6	22,2	8,62	3,26	10,5
Dp (°)	0	359	74	47	92

(b)

Fonte: O Autor (2019)

Tabela 5: Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Coeficiente de Correlação de Pearson (r)

Parâmetro	RMSE	Correlação (r)
Tp (s)	2,45	0,725
Dp (°)	33,11	0,814
Hs (m)	0,24	0,805
Componente U do vento	1,42	0,801
Componente V do vento	1,70	0,867

Fonte: O Autor (2019)

5 CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas neste estudo, foi possível perceber variações sazonais ao longo do ano para todas as variáveis. Para o regime de ventos, constatou-se que os meses de fevereiro, março e abril apresentaram maiores variações de direção e intensidade no vento. Por outro lado, os meses agosto, setembro e outubro apresentaram menores variações, apresentando uma direção de ventos mais uniforme e mais intensos associados aos ventos alísios de Sudeste, contribuindo também para o aumento das alturas de onda nesse período do ano.

Como o vento é a principal forçante causadora das ondas superficiais de gravidade, foi também observado grandes variações na direção de ondas nos meses fevereiro, março e abril, tanto pela intensa variação da direção de vento, como pela entrada de ondas *swell* do quadrante Norte e Nordeste nesses meses e no primeiro semestre do ano em geral. Nos meses de agosto, setembro e outubro, as ondas incidem prioritariamente do quadrante Leste, seguindo o mesmo padrão da direção de vento, com diferenças de aproximadamente 20°.

Variações diárias de direção e intensidade do vento ao longo do dia foram observadas principalmente nos meses de agosto, setembro e outubro, possivelmente associada ao sistema de brisas local. Tais variações de direção de vento refletiram diretamente sobre o regime diário de ondas, com direções de onda com variações entre 85° e 100° ao longo do dia. Contudo, levando em consideração a escassez de trabalhos sobre o sistema de brisas no litoral do Ceará, recomenda-se estudos mais aprofundados sobre o tema.

Chegadas dispersivas de ondas *swell* foram observadas em praticamente todos os meses do ano, com maiores ocorrências entre dezembro e abril, especialmente dos quadrante Norte e Nordeste. A chegada de ondas *swell* nem sempre indicou ocorrências de maiores alturas de ondas. O oposto também foi observado, onde ocorrências com maiores alturas de onda foram observadas ao longo da série, principalmente entre os meses de julho e novembro, sem necessariamente indicar a entrada de ondas do tipo *swell*.

No geral, o presente trabalho corrobora com as tendências de variações dos principais parâmetros de onda, apresentando um padrão muito próximo às análises de outros autores. Contudo, o presente trabalho apresentou maiores ocorrências de ondas com períodos superiores à 9 segundos em relação aos trabalhos pretéritos, com aproximadamente 37% das ondas registradas pela bóia, enquanto trabalhos anteriores indicaram a ocorrência de 25% desse tipo de onda.

Para as análises dos resultados provenientes do modelo global de ondas WAVEWATCH III, pode-se observar diferentes comportamentos para os parâmetros de onda e vento. Enquanto o modelo apresentou boas relações com os dados observados para algumas variáveis, para outras o modelo superestimou ou subestimou consideravelmente seus valores. Durante o primeiro semestre do ano de 2017, os resultados do WAVEWATCH III indicaram representar bem os valores de período de pico e altura significativa. No segundo semestre, o modelo apresentou relativamente bem as as direções e intensidades de vento e direções de onda, apesar de ainda superestimar suas incidências de onda.

O WAVEWATCH III conseguiu representar bem os registros de chegadas de campos de ondas *swell*, no que diz respeito ao período de pico, mas subestima as direções de onda, apresentando ocorrências do quadrante Noroeste e Norte, enquanto os dados observados apresentam maiores ocorrências em Norte e Nordeste. Em algumas situações ocorridas no segundo semestre, o modelo apresentou ocorrências de ondas *swell* com altos períodos de pico que não foram observadas nos dados obtidos pela bóia.

Desta forma, recomenda-se uma maior cautela ao utilizar dados provenientes do modelo global WAVEWATCH III na representação do regime de ondas para o litoral do Ceará, levando em consideração os diferentes comportamentos dos parâmetros de onda em relação ao período do ano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, J. H. G. M. Numerical modeling of ocean swell contributions to the global wind-wave climate. *Ocean Modelling*, v. 11, n. 1-2, p. 98–122, 2006.
- ALMEIDA, L. R. D.; AMARO, V. E.; MARCELINO, A. M. T.; SCUDELARI, A. C. Avaliação do clima de ondas da praia de Ponta Negra (RN, Brasil) através do uso do SMC-Brasil e sua contribuição à gestão costeira. 2015, vol.15, n.2, p.135-151.
- ALVES, J. H. G. M.; GROSSMANN MATHESON, G. S.; RIBEIRO, E. O. Reconstituição de campos de ondas em eventos severos da costa sudeste brasileira através de modelagem numérica. In: III Congresso Brasileiro de Oceanografia – CBO’2008. Fortaleza, 2008.
- AQUINO, André Ribeiro de. Regime e variabilidade de ondas no Atlântico Tropical: Fortaleza, 2016. 62 p. TCC (Graduação em Oceanografia) - Curso de Oceanografia, Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- BITTENCOURT, D. P.; DE QUADRO, M. F. L.; CALBETE, N. O.; Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2002.
- CANDELLA, R. N. Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 1997.
- CARVALHO, N. V. Investigação sobre a Evolução do Clima de Ondas na Bacia de Campos. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.
- DA SILVA, A. C. et al. Características Das Ondas “Sea” and “Swell” Observadas No Litoral Do Ceará-Brasil:. *Tropical Oceanography*, v. 39, n. 2, p. 123–132, 2011. *Climatic atlas of the tropical Atlantic and eastern Pacific Oceans*
- DE PAULA, D. P.; MORAIS, J.O.; FERREIRA, O.; DIAS, J.A. – Análise histórica das ressacas do mar no litoral de Fortaleza (Ceará, Brasil): origem, características e impactos. In: Davis Pereira de Paula & J. Alveirinho Dias (orgs.), *Ressacas do Mar / Temporais e Gestão Costeira*, pp.173-201, Editora Premium, Fortaleza, CE, Brasil. ISBN: 978-85-7924-440-7. 2015
- FARIAS, 2012. Chegadas dispersivas de campos de ondas swell na costa oeste do estado do Ceará - Brasil. *Arq. Ciên. Mar*, Fortaleza, 45 (1): p.69-74. 2012
- FERREIRA A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, 2005.
- FISCH, C. I. Caracterização do Clima de Ondas na Costa do Ceará. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2008.
- INNOCENTINI, 2005. A agitação marítima no litoral do Nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.3, 367-374, 2005
- MUNK, W.H.; MILLER, G.R.; SNODGRASS, F.E. & BARBER, N.F. Directional recording of swell from distant storms. *Phil. Trans. Royal Soc., London*, v.255, p.505-584, 1963.

MELO, F. E. e. a. 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.

MELO, A. B. C., NOBRE, P., MELO, M. L. D., SANTANA, S. C., 2002: Estudo Climatológico da Posição da ZCIT no Atlântico Equatorial e sua Influência sobre o Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 12, 2002, Foz do Iguaçu. Anais Foz do Iguaçu, SBMET, 2012.

NOAA. WAVEWATCH III. Disponível em: <<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/>>. Acesso em 28 nov, 2019.

NOGUEIRA, I. C. M. Caracterização do Clima de Ondas na Bacia do Espírito Santo através de Modelagem Numérica. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2008.

POND, S.; PICKARD, G. Introductory Dynamical Oceanography. New York, NY: Pergamom Press, 2003.

Portal G1. Com ressaca do mar, ondas no litoral de Fortaleza chegam a 2,5 metros. G1/CETV, Fortaleza, 31 mar, 2017. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ceara/cetv-2dicao/videos/v/com-ressaca-do-mar-ondas-no-litoral-de-fortaleza-chegam-a-25-metros/5768755/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

VIEIRA, L. A. A. et al. Análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do porto do pecém. In: XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Rio de Janeiro, 2007.

VIEIRA, M. D. P. Identificação de ciclones extratropicais geradores de ondas *swell* na costa oeste do Ceará. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2016.

GARRISON, T. Fundamentos de Oceanografia. [S.l.]: Cengage Learning, 2016.

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

PITOMBEIRA, E. D. S. Deformação das ondas por difração no molhe do Porto do Mucuripe (Fortaleza - Ceará - Brasil). Arq. Ciên. Mar, 16 (1) : p 55-58. Jun, 1976, Fortaleza, Ceará.

PAULA, D. P., DIAS, J. M. A., FERREIRA, O., ALMEIDA, L. P M., MORAIS, J. O. Determinação dos limiares para impactos socioambientais em função das ressacas do mar em Fortaleza-CE, Brasil. In: Cong. Lat. Amer. Ciênc. Mar., Balneário Camboriú-SC, 2011.

Redação O POVO Online. Marinha do Brasil emite alerta para risco de ressaca no litoral cearense. Jornal O Povo, Fortaleza, 30 mar, 2017. Disponível em: <<https://www.opovo.com.br/noticias/fortaleza/2017/03/marinha-do-brasil-emite-alerta-para-risco-de-ressaca-no-litoral-do-ce.html>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

Ressaca do mar destrói parte da orla de Icarai, no litoral cearense. G1/CETV, Fortaleza, 19 jan, 2017. Disponível em:

<<http://g1.globo.com/ceara/cetv-2dicao/videos/v/ressaca-do-mar-destroi-parte-da-orla-de-icarai-no-litoral-cearense/5589540/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

SAMPAIO, N. D. E. G. do A. Variabilidade temporal do regime de ondas na porção Sudoeste do Oceano Atlântico Tropical. 2014. 73 f. Monografia (Graduação em Oceanografia) - Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

Ressaca do mar ocasiona ondas de até três metros no litoral de Fortaleza. G1/CETV, Fortaleza, 06 out, 2017. Disponível em:

<<http://g1.globo.com/ceara/cetv-1dicao/videos/t/edicoes/v/ressaca-do-mar-ocasiona-ondas-de-ate-tres-metros-no-litoral-de-fortaleza/6199624/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

IBGE. Fortaleza. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>>. Acesso em: 26 nov, 2019.

XAVIER, T. M. B. S., XAVIER, A. F. S., DIAS, P. L. S, e DIAS, M. A. F. S. A Zona de Convergência Intertropical e suas relações com a chuva do Ceará (1964-98). R.B. Met., 15, 27-43. 2000.