



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
CURSO DE OCEANOGRAFIA

ANDRÉ RIBEIRO DE AQUINO

REGIME E VARIABILIDADE DE ONDAS NO ATLÂNTICO TROPICAL

FORTALEZA

2016

ANDRÉ RIBEIRO DE AQUINO

REGIME E VARIABILIDADE DE ONDAS NO ATLÂNTICO TROPICAL

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

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Rui Simões de Menezes

A669r Aquino, André Ribeiro de.

Regime e variabilidade de ondas no Atlântico Tropical / André Ribeiro de Aquino – 2016.
62 p. : il. color., enc. ; 30 cm.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso
Bacharelado em Oceanografia, 2016.

Orientação: Prof^o. Dr^o. Carlos Eduardo Peres Teixeira.

1. Ventos alísios. 2. Ciclones. 3. *Swell*. I. Título.

CDD 551.518 3

ANDRÉ RIBEIRO DE AQUINO

REGIME E VARIABILIDADE DE ONDAS NO ATLÂNTICO TROPICAL

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

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Antônio Geraldo Ferreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dra. Maria Ozilea Bezerra Menezes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, o qual sempre foi e será um grande alicerce para mim.

Aos meus pais, por todo o amor a mim dedicado, sempre me apoiando e ajudando em todos os momentos, em todas as decisões, sendo de fundamental importância para o meu êxito na faculdade e na vida.

Aos meus irmãos, Mateus e Lucas por toda a companhia, amor e cumplicidade, e ao Gustavinho por toda a fofura e capacidade de me trazer uma genuína alegria.

Ao Prof. Carlos, não só pela excelente orientação, mas por toda a dedicação, paciência, compreensão, ajuda, conversas, incentivo ao longo do meu curso, especialmente no momento de conclusão.

Aos participantes da banca examinadora Prof. Geraldo e Prof^a. Ozilea por aceitarem meu convite e disponibilizarem de seus tempos para contribuir com a melhoria da qualidade do meu trabalho.

A todos os meus amigos que fiz ao longo desses anos de faculdade, por todos os momentos de descontração entre as aulas, pelas saídas de campo, estudos em grupo, congressos, festas e histórias a serem contadas.

A todos os professores e funcionários da universidade, os quais tiveram uma participação relevante na minha trajetória enquanto na graduação.

À Jamile, a qual teve/tem um papel muito importante na minha vida. Por todo o companheirismo, suporte, amizade e todos os momentos vividos.

Aos meus amigos não colegas de faculdade, especialmente aos mais próximos, por estarem presentes tanto nas ótimas experiências vividas, quanto nas situações mais difíceis.

“A vida vem em ondas como um mar, num
indo e vindo infinito.” (Lulu Santos/Nelson
Motta)

RESUMO

As ondas são importantes componentes dinâmicos, sendo responsáveis, quando em região costeira, por afetarem o transporte de sedimentos e impactarem atividades, como a portuária e a navegação. No presente trabalho, propomos avaliar a climatologia de ondas e sua variabilidade de longo prazo do Atlântico Tropical. Para a execução desse objetivo, utilizamos dados de altura significativa, o período de pico e a direção média de onda obtidos a partir do modelo WaveWatch III (WW3), para os anos de 1979 a 2015. Observamos que as características das ondas para a região de interesse estão relacionadas à atuação dos ventos alísios e à ocorrência de ciclones, tropicais ou extratropicais. A posição da Zona de Convergência Intertropical influenciar as variações sazonais observadas, sobretudo sobre a costa Norte do Brasil. Nossos resultados demonstraram que as direções predominantes são, para a maior parte do setor Norte da costa do Brasil, entre norte e nordeste e, para a costa Leste, entre leste e sudeste; os períodos de maior ocorrência são menores que 10 segundos (ondas do tipo *sea*) e as alturas entre 1,5 e 2,5m. Encontramos variações de longo prazo de 25 cm (0,69 cm/ano) para a altura das ondas; 0,5 s (0,014s/ano), para o período e 5% (0,13%/ano), para a direção. As causas destas variações ainda não são bem conhecidas, mas podem estar relacionadas a mudanças climáticas. Ao compararmos os resultados obtidos pelo modelo WW3, com os do modelo ERA-Interim e dados *in situ*, pudemos observar que o modelo WW3 não apresentou um bom desempenho para a região costeira, o que requer atenção quando utilizado para gestão e atividades na costa. Não pudemos concluir também qual dos dois modelos comparados (WW3 ou ERA) melhor representa a realidade para a área de interesse. Novos estudos, portanto, ainda são necessários para uma validação efetiva dos modelos para a região avaliada.

Palavras-chave: ventos alísios. ciclones. *swell*.

ABSTRACT

Waves are important components of the ocean's dynamics, being responsible, once they reach the shore, for the sediments transport and for impacting on harbor activities and navigation. The aim of this work is to evaluate the wave climatology and its long time variability over the Tropical Atlantic. For this purpose, we used significant height, peak period and wave direction data obtained from the model WaveWatch III (WW3), from 1979 to 2015. We have observed that the waves' characteristics for the study area are related to the trade winds and the occurrence of tropical and extratropical cyclones. The location of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and its meridional oscillation have an influence on the observed seasonal variations. Our results have shown that the predominant wave directions are from North to Northeast, for most parts of the northern coast of Brazil, and from East to Southeast, for the east coast. The periods of higher occurrence are smaller than 10 s (sea waves) and the wave heights, from 1.5 m to 2.5 m. We have found long term variations of 25 cm (0.69 cm/year) for the wave heights, 0.5 s (0.014s/year) for the wave periods and 5% (0.13%/year) for the wave directions. The causes for these variations are still not well known, although they might be related to the climate change. When comparing the results obtained from the WW3 model with the ERA-Interim results and *in situ* data, we observed that the WW3 model did not behave properly for the coastal area, which requires attention when applied for coastal management and activities. We could not conclude which of the two models (WW3 or ERA) was more representative for the area of interest. Therefore, further research is needed for an effective validation of the models for the study area.

Keywords: trade winds. cyclones. WaveWatch III.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1	- LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	14
FIGURA 2	- ZONAS GERADORAS DE SWELL.....	15
FIGURA 3	- MÉDIA CLIMATOLÓGICA DA DIREÇÃO DAS ONDAS PARA OS ANOS DE 1979 A 2015..	25
FIGURA 4	- FREQUÊNCIA MÉDIA DA DIREÇÃO DAS ONDAS POR QUADRANTE PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	25
FIGURA 5	- MÉDIA CLIMATOLÓGICA DA ALTURA SIGNIFICATIVA DAS ONDAS PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	27
FIGURA 6	- FREQUÊNCIAS MÉDIAS DA ALTURA SIGNIFICATIVA DAS ONDAS AGRUPADAS POR INTERVALO DE ALTURA PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	28
FIGURA 7	- MÉDIA CLIMATOLÓGICA DO PERÍODO DE PICO DAS ONDAS PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	29
FIGURA 8	- FREQUÊNCIAS MÉDIAS DE OCORRÊNCIA DO PERÍODO DE PICO DAS ONDAS POR INTERVALO DE PERÍODO PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	29
FIGURA 9	- MÉDIA CLIMATOLÓGICA SAZONAL DA DIREÇÃO DAS ONDAS PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	31
FIGURA 10	- MÉDIA CLIMATOLÓGICA SAZONAL DA ALTURA DAS ONDAS PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	32
FIGURA 11	- MÉDIA CLIMATOLÓGICA SAZONAL DO PERÍODO DAS ONDAS PARA OS ANOS DE 1979 A 2015.....	33
FIGURA 12	- HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P1.....	36
FIGURA 13	- HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P2.....	38
FIGURA 14	- HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P4.....	39
FIGURA 15	- HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P5.....	41
FIGURA 16	- HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P6.....	42
FIGURA 17	- HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P7.....	43

FIGURA 18 - HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P8.....	45
FIGURA 19 - HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P9.....	46
FIGURA 20 - HISTOGRAMAS DIRECIONAIS DAS MÉDIAS SAZONAIS ENTRE OS ANOS 1979-2015 DA ALTURA E PERÍODO DE ONDA PARA O PONTO P10.....	47
FIGURA 21 - MAPAS DE COEFICIENTE DE REGRESSÃO LINEAR PARA OS DIFERENTES QUADRANTES DE DIREÇÃO DE ONDA ENTRE OS ANOS 1979 E 2015.....	51
FIGURA 22 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DE FREQUÊNCIA DE OCORRÊNCIA DE DIREÇÃO NO PONTO P1 PARA O QUADRANTE 1 (0-30°), ENTRE OS ANOS 1979-2015.....	52
FIGURA 23 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DE FREQUÊNCIA DE DIREÇÃO NO PONTO P1 PARA O QUADRANTE 4 (90-120°), ENTRE OS ANOS 1979-2015.....	52
FIGURA 24 - MAPA DE COEFICIENTE DE REGRESSÃO LINEAR PARA A VARIÁVEL ALTURA SIGNIFICATIVA DA ONDA ENTRE OS ANOS 1979 E 2015.....	53
FIGURA 25 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DA ONDA NO PONTO P1, ENTRE OS ANOS 1979-2015.....	54
FIGURA 26 - SÉRIE TEMPORAL DAS MÉDIAS DE ALTURA SIGNIFICATIVA DA ONDA NO PONTO P3, ENTRE OS ANOS 1979-2015.....	54
FIGURA 27 - MAPA DE COEFICIENTE DE REGRESSÃO LINEAR PARA A VARIÁVEL PERÍODO DA ONDA ENTRE OS ANOS 1979 E 2015.....	55
FIGURA 28 - MAPA DE COEFICIENTE DE REGRESSÃO LINEAR PARA A VARIÁVEL PERÍODO DA ONDA ENTRE OS ANOS 1979 E 2015.....	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COORDENADAS GEOGRÁFICAS DOS PONTOS DE ESTUDO.....	20
TABELA 2 - COMPARAÇÃO DE DADOS DE INTERVALOS DE DIREÇÃO DE ONDA DO MODELO WW3 (PONTO 1: 38° 30' W; 03° 00' S), ERA-INTERIM (SAMPAIO, 2014) E DADOS DE ONDÓGRAFO (IN SITU) PARA O ANO 2000.	22
TABELA 3 - COMPARAÇÃO DE DADOS DE INTERVALOS ALTURA SIGNIFICATIVA DE ONDA DO MODELO WW3 (PONTO 1: 38° 30' W; 03° 00' S), ERA-INTERIM (SAMPAIO, 2014) E DADOS DE ONDÓGRAFO (IN SITU) PARA O ANO 2000.....	22
TABELA 4 - COMPARAÇÃO DE DADOS DE INTERVALOS DE PERÍODO DE PICO DE ONDA DO MODELO WW3 (PONTO 1: 38° 30' W; 03° 00' S), ERA-INTERIM (SAMPAIO,2014) E DADOS DE ONDÓGRAFO (IN SITU) PARA O ANO 2000.....	22
TABELA 5 - MÉDIAS SAZONAIS PARA CADA PONTO DE ESTUDO AO LONGO DE TODOS OS ANOS (1979-2015).....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CFSRR	<i>Climate Forecast System Reanalysis Reforecast</i>
E	Leste
EMC	<i>Environmental Modeling Center</i>
ENE	Leste-nordeste
ESE	Leste-sudeste
GSF	<i>Global Forecast System</i>
HN	Hemisfério Norte
HS	Hemisfério Sul
MMAB	<i>Marine Modeling and Analysis Branch</i>
N	Norte
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NE	Nordeste
NNE	Norte-nordeste
NNW	Norte-noroeste
NW	Noroeste
S	Sul
SE	Sudeste
SSE	Sul-sudeste
SSW	Sul-sudoeste
SW	Sudoeste
W	Oeste
WNW	Oeste-noroeste
WSW	Oeste-sudoeste
WW3	WAVEWACTH III
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Área de estudo.....	14
2	OBJETIVOS	17
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1	Modelo	18
3.2	Dados disponíveis.....	18
3.3	Comparação com dados <i>in situ</i> e com dados do modelo ERA-Interim	19
3.4	Análise dos dados	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1	Comparação dos dados do modelo WW3.....	21
4.2	Climatologia de ondas da área de estudo	23
4.2.1	<i>Descrição geral</i>	23
4.2.1.1	<i>Direção</i>	23
4.2.1.2	<i>Altura</i>	26
4.2.1.3	<i>Período</i>	26
4.2.2	<i>Variação sazonal</i>	30
4.2.2.1	<i>Direção</i>	30
4.2.2.2	<i>Altura</i>	31
4.2.2.3	<i>Período</i>	33
4.2.4	<i>Discussão</i>	48
4.2.3	<i>Variabilidade temporal de longo prazo</i>	49
4.2.3.1	<i>Direção</i>	50
4.2.3.2	<i>Altura</i>	53
4.2.3.3	<i>Período</i>	55
4.2.3.4	<i>Discussão</i>.....	56
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Ondas são propagações de perturbações geradas em um meio,

Existem diversos tipos de ondas que ocorrem nos oceanos, como ondas capilares; marés; ondas internas; ondas planetárias e *tsunamis*, sendo classificadas, dentre outros fatores, de acordo com suas origens (efeito dos ventos; distúrbios sísmicos; forças gravitacionais, por exemplo) (POND, 83). Considerando-se as ondas como senoidais simples, elas possuem características em comum, dentre as quais podemos citar a altura (distância entre uma crista, ponto mais alto da onda, e o cavado, ponto mais baixo) e o período (intervalo de tempo entre a passagem de duas cristas ou cavados sucessivos, cuja distância representa o comprimento de onda, pelo mesmo ponto fixo).

Dentre os diferentes tipos de onda, as superficiais de gravidade são geradas pelo vento a partir da transferência de energia e momento (UNIVERSITY, 1999). Estas são de fundamental importância, uma vez que a dissipação da energia das mesmas é a principal forçante para a dinâmica costeira (PIANCA; MAZZINI; SIEGLE, 2010), além de exercerem influência nos ventos de superfície, correntes, processos de mistura e transporte de calor e momento, por exemplo (HEMER; CHURCH; HUNTER, 2010).

Para que essas ondas sejam formadas, é necessário que o vento sopra com velocidade e duração suficientes sobre uma pista, extensão desobstruída da superfície do mar, também conhecida como *fetch*. Uma vez que o vento costuma ser variável, raramente uma condição ideal, responsável pelo estado de mar completamente desenvolvido (*fully developed sea*), em que não há variação das características da onda, é satisfeita. Assim é formado um campo de ondas, o qual representa um conjunto de ondas com diferentes parâmetros (UNIVERSITY, 1999). Costuma-se utilizar espectros de ondas para representar esse campo composto por ondas com diferentes frequências, amplitudes e direções (DEAN, 1991). A partir da análise espectral, é possível se obter o período de pico (região de maior densidade espectral) do mesmo e a direção média (no período de pico). Esses parâmetros são, juntamente com a altura significativa da onda, a qual é definida por LeBlond (1978) como a altura média da maior terça parte ($\frac{1}{3}$) das ondas analisadas, comumente fornecidas (por meio de modelos, como o WaveWatch III, por exemplo) para diferentes análises.

Quando se propagam dentro da zona de geração, as ondas são classificadas como vagas (ou do tipo *sea*), com períodos que variam entre 0.2s a 9s. Uma vez que deixam a zona de formação, as ondas superficiais de gravidade passam a ser do tipo marulho (ou *swell*), as

quais possuem períodos de 10 a 30 s (segundo classificação de Pond (1983)). Estas podem se propagar por grandes distâncias, com pouca dissipação de energia, e alcançar zonas costeiras, definindo assim, juntamente com ondas *sea* formada por ventos locais, o clima de ondas de uma determinada região (BRANCO, 2005). Esse conhecimento é fundamental, já que as ondas em uma região costeira são responsáveis pela geração de correntes, as quais influenciam no transporte de sedimentos; definição de feições costeiras; são potencial fonte de energia, além de afetarem obras situadas na costa e atividades recreacionais, portuárias, dentre outras.

Diversos são os fatores que influenciam a geração de ondas (como será melhor descrito na seção 1.1 para a área de estudo) e variabilidade das mesmas, como variações sazonais do regime de ventos associadas a mudanças de gradiente de pressão e temperatura da superfície do mar (WANG; ZWIERS; SWAIL, 2004) e da formação de ciclones tropicais (ALVES, 2006). Alguns eventos de escala interanual, como o *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), também são descritos como responsáveis por alterações na climatologia de ondas de determinada região (REGUERO; MÉNDEZ; LOSADA, 2013). Alguns autores atribuem também variabilidades de longo prazo no regime de ondas às mudanças climáticas (WOOLF; WOLF, 2013).

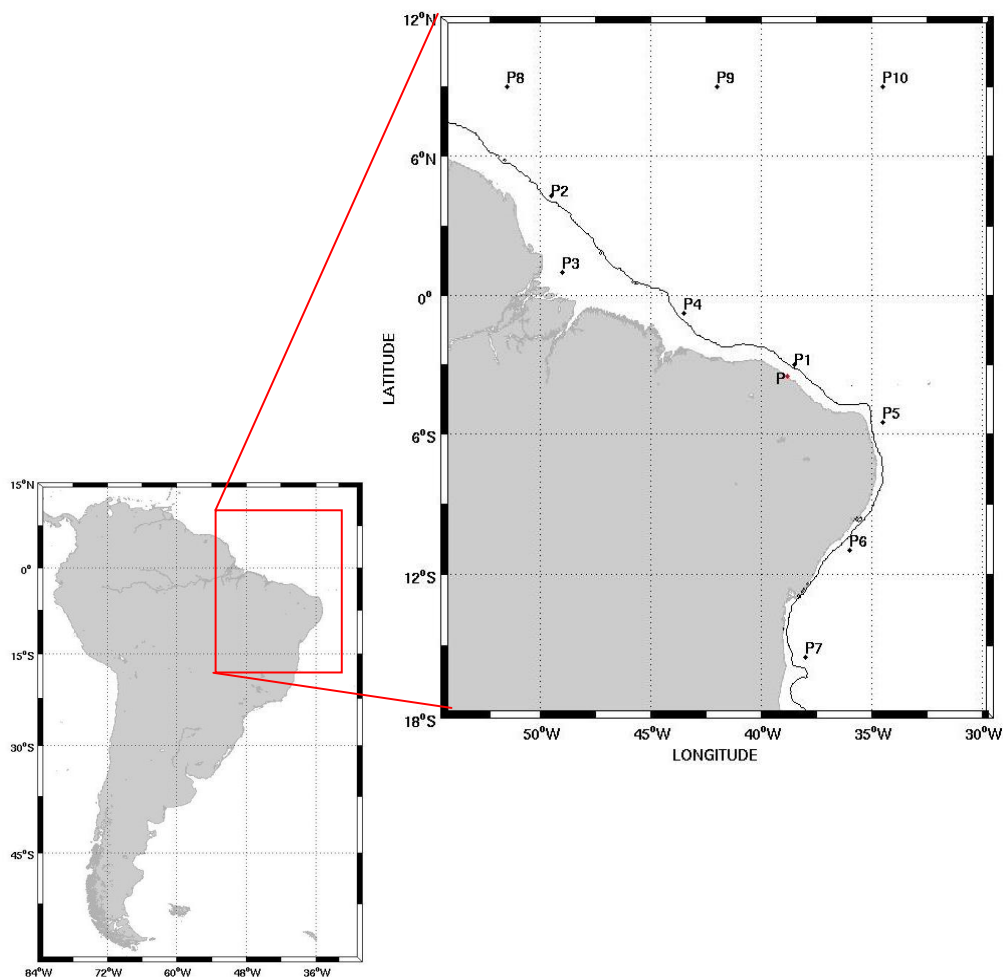
O estudo do regime de ondas por meio da obtenção de dados *in situ*, como os realizados por Vieira, Pitombeira e Souza (2007) e Da Silva *et al.* (2011) para a região do Ceará, Brasil, está muitas vezes sujeito a limitações por conta da escassez de dados. Dessa forma, a modelagem numérica, tanto de previsão (*forecast*), quanto de uso de dados pretéritos de determinados parâmetros (*hindcast*), tem sido uma importante ferramenta para a descrição da climatologia de ondas; vem, portanto, sendo atualmente utilizada em vários estudos, como por Arinaga; Cheung (2012) e Alves (2006) para toda região do globo, Candella (1997), para o Atlântico Sul, e por Branco (2005), Pianca, Mazzini e Siegle (2010) e Dias (2013) para a litoral do Brasil.

Embora crescente, ainda são poucos os estudos de climatologia de ondas e sobretudo suas variabilidades para a região costeira brasileira, em especial do litoral Norte e Nordeste do Brasil. O presente trabalho pretende contribuir, por meio da análise de dados do modelo de reanálise WaveWatch III, com o melhor entendimento do regime de ondas dessas regiões e como o mesmo vem sendo alterado a longo prazo.

1.1 Área de estudo

A área de interesse do presente trabalho (FIGURA 1) é o setor oeste do Atlântico Tropical e se estende entre as latitudes 18° S e 12° N e longitudes $54^{\circ}30'$ W e $29^{\circ}30'$ W. Compreende toda a costa da região Norte e Nordeste do Brasil, a qual será abordada com destaque. Dividiremos o litoral estudado no presente trabalho em duas regiões distintas, baseado no regime de ondas predominante de cada uma: setor Norte, que se estende do Amapá a Natal, no Rio Grande do Norte; e o setor Leste, de Natal até a Bahia.

Figura 1- Localização da área de estudo. E linha em preto representa a isóbata de 100m, a qual representa uma profundidade média da quebra da plataforma continental (PC) brasileira.

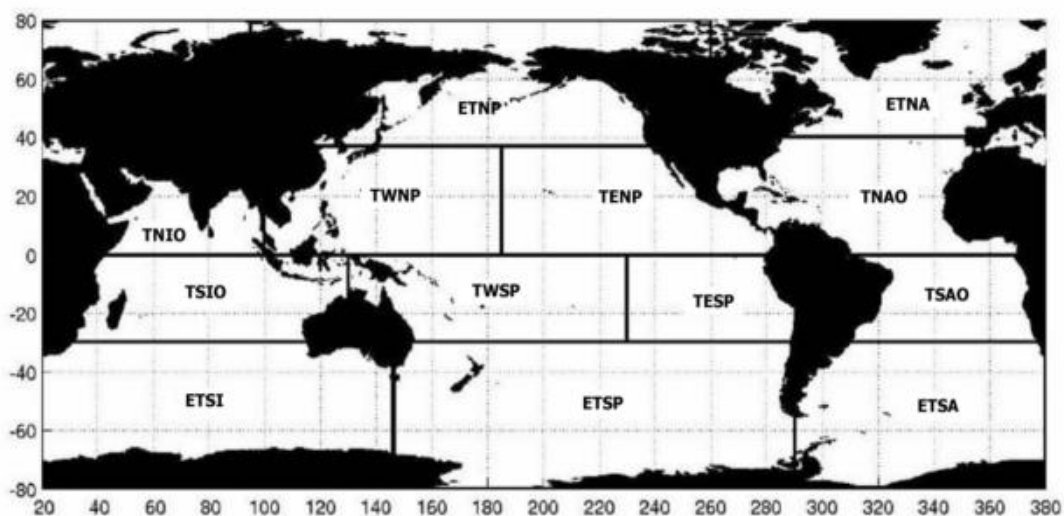


Fonte: o autor.

Dentre os fatores que influenciam na geração ondas que atuam no litoral Norte e Nordeste brasileiro, podemos citar a atuação dos ventos alísios. A confluência dos ventos provenientes do Hemisfério Norte (HN) e Hemisfério Sul (HS) determina a localização da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Durante os meses de setembro e novembro há a predominância dos alísios de sudeste, período na qual a ZCIT se encontra mais ao norte e entre os meses de dezembro e março, a ZCIT se encontra mais ao sul e os alísios de nordeste predominam (DA SILVA et al., (2011); FERREIRA; MELO (2005)).

Para o HN, a área extratropical do Atlântico Norte (ETNA; *Extra-Tropical North Atlanti*; FIGURA 2) contribui, a partir da ação de ciclones extratropicais, com ondulações *swell* que alcançam o Brasil, com ondas de valores médios anuais de altura significativa de até 1 metro, para o setor Norte e 0,5 metros para o setor Leste. Tempestades formadas na área tropical do Atlântico Norte (TNAO; *Tropical North Atlantic*), cujas atividades são mais intensas no verão do HS, possuem grande influência no regime de ondas da área de estudo ao gerarem ondas de até 2 metros de altura significativa para o litoral norte brasileiro, com diminuição gradual dos valores em direção ao litoral da Bahia (BRANCO, 2005). O aumento da altura significativa de ondas que alcançam os estados brasileiros se inicia na primavera (no HS), quando passa a ocorrer a temporada de tempestades tropicais no HN, enquanto que os menores valores de altura de ondas geradas na TNAO são encontradas no inverno austral, segundo o mesmo autor.

Figura 2- Zonas geradoras de ondas *swell*.



Fonte: Alves (2006).

No Hemisfério Sul, parte das ondulações formadas nas áreas tropicais e extratropicais geradoras de swell também influenciam na climatologia de ondas do litoral brasileiro. A área de geração tropical do Atlântico Sul (TSAO; Tropical South Atlantic) possui baixa intensidade de atividade ciclônica, porém ondulações resultantes dessa atividade alcançam a região Nordeste do Brasil, especialmente no inverno austral, em que as alturas significativas das ondas possuem os maiores valores. As alturas diminuem na primavera, alcançando o seu mínimo no verão austral. As ondas formadas na área de geração extratropical do Atlântico Sul (ETSA; *Extra-Tropical North Atlantic*) influenciam o regime de ondas do setor Leste do Brasil, com ondas com alturas significativas de aproximadamente 1m. O setor Norte é pouco afetado por essas ondulações (BRANCO, 2005).

Distúrbios africanos de leste (também conhecidos como ondas africanas e ondas de leste), eventos meteorológicos que se formam no Atlântico Norte, distantes da costa, também são responsáveis pela geração de ondas que atingem a costa da área de estudo (INNOCENTINI et al., 2005). O autor, porém, menciona que a influência dessas ondas é mínima e não se sobrepõe à atuação das ondulações geradas pelos ventos alísios.

Da mesma forma, segundo Varejão-Silva (2000), por conta dos alísios possuem grande constância e intensidade ao longo de todo o ano para a região de estudo, as brisas marítimas e terrestres, resultantes de gradientes de pressão entre o continente e o oceano, possuem menor contribuição para a dinâmica local dos ventos, conseqüentemente das ondas, apenas alterando discretamente a direção predominante dos alísios ou, dependendo da orientação das brisas com os mesmos, as velocidades dos ventos dominantes. Quando as brisas estão mais intensas e alinhadas com os alísios de E/SE, como acontece no litoral do Rio Grande do Norte, mais contribuem para a dinâmica das ondas (FISCH, 2008).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é descrever a climatologia de ondas e sua variabilidade de longo prazo na região oeste do Atlântico Tropical por meio de dados obtidos a partir do modelo de reanálise Wavewatch III;

De forma específica, o trabalho tem como objetivos:

- Caracterizar a altura significativa, direção e período das ondas da região de interesse entre os anos de 1979 e 2015;
- Avaliar a variação espacial dos parâmetros utilizados, levando-se em conta diferentes escalas temporais (sazonal, anual e de longo período);
- Avaliar a qualidade do modelo Wavewatch III para representação do regime de ondas da área de estudo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção serão abordadas a descrição do modelo utilizado para obtenção dos dados e uma explanação sobre os mesmos; e os métodos de análise efetuados e a comparação do desempenho do modelo.

3.1 Modelo

O WAVEWATCH III TM (WW3), é um modelo de ondas espectrais de terceira geração, descrito por Tolman (1999), e desenvolvido pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

O modelo resolve a evolução do espectro do campo de onda sob a ação de um campo de ventos.

Um dos importantes atributos do WW3 é que o mesmo permite a interação de dois grids (*nested grids*), sendo um de maior resolução e outro de menor, o que resulta em uma maior eficiência computacional e modelagem mais detalhada. As versões atuais do modelo fazem assimilação dos dados observacionais e de satélite. Para o estudo presente, porém, somente um grid de baixa resolução (Global, com resolução de 1/2° ou 30 arco-minutos) cobre a área de interesse.

3.2 Dados disponíveis

Dados da altura significativa da onda, período do espectro e direção média da onda (no período de espectro), variando de janeiro/1979 a janeiro/2015, totalizando 36 anos de saída do modelo, foram obtidos a partir de simulações reanálise do WW3 (conhecido como NWW3), disponíveis no site <http://polar.ncep.noaa.gov/waves>. Os dados são fornecidos em intervalos de três horas, a partir das 0h.

Para a geração de dados de ondas, o WW3 utiliza como forçante campos pretéritos de vento (*hindcast*) de alta resolução (temporal de uma hora e espacial de 1/2°), 10m acima do nível do mar e que cobrem todas as latitudes (90°S– 90°N). De 1979 a 2005, os dados de vento são provenientes do *Climate Forecast System Reanalysis Reforecast* (CFSRR), e de 2006 a 2015, do *Global Forecast System* (GSF), ambos produzidos pelo NCEP.

3.3 Comparação com dados *in situ* e com dados do modelo ERA-Interim

A fim de se determinar a eficácia do modelo para a área de interesse é importante que as medições do mesmo sejam validadas com dados observacionais. Porém, por falta de acesso a esses dados, as medições obtidas a partir do modelo WW3 foram comparadas com saídas do modelo de reanálise ERA-Interim e dados de um ondógrafo, informações apresentadas por Sampaio (2014) . O ondógrafo utilizado está instalado no Terminal Portuário do Pecém (latitude: $03^{\circ} 29' 31''$ S; longitude: $38^{\circ} 49' 03''$ W), a uma profundidade de 18m.

3.4 Análise dos dados

Para o presente estudo do regime de ondas, foram feitos mapas climatológicos anuais e sazonais das médias de altura significativa, período de pico e direção das ondas; mapas de coeficiente de regressão; histogramas direcionais e regressões lineares. Tabelas foram também utilizadas para serem apresentados os valores das medições obtidas a partir do banco de dados do modelo WW3.

Além das análises feitas para todas as coordenadas da área de estudo, foram escolhidos pontos específicos da grade (TABELA 1; FIGURA 1), sendo sete mais próximos da plataforma continental do Brasil (pontos P1-P7), com o objetivo de se analisar a climatologia de ondas da região por setores, e 3 em regiões mais *offshore* (P8-P10), escolhidos para que se possa comparar as diferenças das ondulações em regiões mais distantes da costa e se elas influenciam na mesma. Os dados foram analisados por meio do software Matlab®.

Tabela 1- Coordenadas geográficas dos pontos de estudo.

<i>Pontos</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
Ondógrafo (P)	38° 49' 03" W	03° 29' 31" S
P1	38° 30' 00" W	03° 00' 00" S
P2	49° 30' 00" W	04° 30' 00" N
P3	49° 00' 00" W	01° 00' 00" N
P4	43° 30' 00" W	00° 30' 00" S
P5	34° 30' 00" W	05° 30' 00" S
P6	36° 00' 00" W	11° 00' 00" S
P7	38° 00' 00" W	15° 30' 00" S
P8	51° 30' 9" W	9° 00' 00" N
P9	42° 00' 00" W	9° 00' 00" N
P10	34° 30' 00" W	9° 00' 00" N

Fonte: o autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Comparação dos dados do modelo WW3

Nas TABELAS 2, 3 e 4 são comparadas as estatísticas de direção, altura e período de onda para o ano de 2000, obtidos por meio de saídas do modelo WW3 (para o ponto P1), dos dados do modelo ERA-Interim e de medições do ondógrafo do Porto do Pecém. São mostradas também as diferenças percentuais entre cada um dos dados. Como pode ser observado nas tabelas, há diferenças acentuadas entre alguns dos valores medidos pelo ondógrafo (*in situ*) e os dados dos modelos. Possivelmente, parte das diferenças de direção se deva ao fenômeno da refração, em que as ondas que chegam em P1 com pequenos ângulos, mudam de direção ao avançarem por linhas de profundidades mais baixas não paralelas ao campo de ondas, fazendo com que as mesmas cheguem no “ponto P” com direções diferentes. Para alguns intervalos de direção, o WW3 teve melhor desempenho que o ERA, porém, para outros intervalos, o ERA apresentou menores diferenças em relação aos dados do ondógrafo. O WW3 representa melhor as direções mais frequentes no Porto do Pecém (90-120°).

Em relação à altura, houve grandes diferenças entre os valores de frequências medidos do WW3 e *in situ*, chegando a 49,91% para alturas entre 1 e 1,5 m. A altura da onda é independente das outras variáveis características das ondas, como comprimento de onda, estando sua relação com as mesmas e com a profundidade limitada à região de quebra da onda (Pond, 83). Dessa forma, não foi possível encontrar uma explicação plausível para essas diferenças na frequência das alturas medidas. Para esta variável, o modelo ERA-Interim teve um melhor desempenho, uma vez que apresentou menores diferenças.

Os dados do modelo WW3 indicaram uma maior ocorrência de ondas do tipo swell (diferença de 18,71%) comparado com os dados *in situ*. Por estar localizada em uma posição mais *offshore* é possível que o ponto do modelo WW3 tenha registrado *swell* proveniente de direções que não registradas pelo ondógrafo, como certas ondulações de sudeste. As diferenças de frequência para o período de pico entre os dados do modelo ERA-Interim e do ondógrafo foram similares às do WW3.

Com as poucas análises realizadas, não foi possível definir com clareza qual dos dois modelos (ERA ou WW3) é mais efetivo para a área de estudo.

Tabela 2- Comparação de dados de intervalos de direção de onda do modelo WW3 (Ponto 1: 38° 30' W; 03° 00' S), ERA-Interim (SAMPAIO, 2014) e dados de ondógrafo (in situ) para o ano 2000.

<i>Direção – ano 2000</i>	<i>WW3</i>	<i>ERA-Interim</i>	<i>IN SITU</i>	<i>Diferença WW3/ERA</i>	<i>Diferença WW3/IN SITU</i>	<i>Diferença ERA/IN SITU</i>
0-15°	8,70%	15,64%	0,18%	-6,94%	8,52%	15,46%
15-30°	8,19%	14,25%	3,74%	-6,06%	4,45%	10,51%
30-45°	5,14%	11,50%	13,45%	-6,36%	-8,31%	-1,95%
45-60°	4,09%	12,57%	16,60%	-8,48%	-12,51%	-4,03%
60-75°	4,24%	13,89%	5,08%	-9,65%	-0,84%	8,81%
75-90°	6,50%	19,90%	4,16%	-13,40%	2,34%	15,74%
90-105°	22,78%	11,97%	28,03%	10,81%	-5,25%	-16,06%
105-120°	20,19%	1,09%	28,41%	19,10%	-8,22%	-27,32%
120-135°	0,08%	0	0,36%	0,08%	-0,28%	-0,36%
135-360°	20,06%	0	0	10,91%	10,91%	0

Fonte: o autor.

Tabela 3- Comparação de dados de intervalos de altura significativa de onda do modelo WW3 (Ponto 1: 38° 30' W; 03° 00' S), ERA-Interim (SAMPAIO, 2014) e dados de ondógrafo (in situ) para o ano 2000.

<i>Altura (m)</i>	<i>WW3</i>	<i>ERA-Interim</i>	<i>In situ</i>	<i>Diferença WW3/ERA</i>	<i>Diferença WW3/In situ</i>	<i>Diferença ERA/In situ</i>
0,5-1	0,00%	42,17%	7,19%	-42,17%	-7,19%	34,98%
1-1,5	9,17%	53,48%	59,08%	-44,31%	-49,91%	-5,60%
1,5-2	62,52%	4,35%	30,56%	58,17%	31,96%	-26,21%
2-2,5	26,69%	0,00%	3,15%	26,69%	23,54%	-3,15%

Fonte: o autor.

Tabela 4- Comparação de dados de intervalos de período de pico de onda do modelo WW3 (Ponto 1: 38° 30' W; 03° 00' S), ERA-Interim (SAMPAIO,2014) e dados de ondógrafo (in situ) para o ano 2000.

<i>Período (s)</i>	<i>WWIII</i>	<i>ERA-Interim</i>	<i>In situ</i>	<i>Diferença WW3/ERA</i>	<i>Diferença WW3/In situ</i>	<i>Diferença ERA/In situ</i>
4-9	62,49%	98,63%	81,20%	-36,14%	-18,71%	17,43%
10-20	37,51%	1,37%	18,70%	36,14%	18,81%	-17,33%

Fonte: o autor.

4.2 Climatologia de ondas da área de estudo

A partir dos dados de reanálise do modelo WW3, foi possível gerar mapas climatológicos, histogramas de frequência e direcionais dos parâmetros analisados, a fim de se determinar a climatologia de ondas da área de interesse ao longo dos anos de estudo.

4.2.1 Descrição geral

Foram feitas médias da altura, direção e período para cada latitude e longitude para os anos compreendidos entre 1979 e 2015. Foi possível, dessa forma, avaliar a variação espacial das variáveis. Para melhor compreensão do presente estudo da climatologia geral das ondas, abordaremos cada um dos parâmetros separadamente. Nos mapas são plotadas as isóbatas de 20 e 100 m. Como poderá ser observado nos mapas gerados, os valores mais próximos à costa, profundidades aproximadamente abaixo de 20m, que incluem o ponto P3, foram desconsiderados por apresentarem inconsistência dos resultados. Isso possivelmente se deve a limitações do modelo, especialmente para regiões de baixas profundidades e inseridas em grades de baixa resolução.

4.2.1.1 Direção

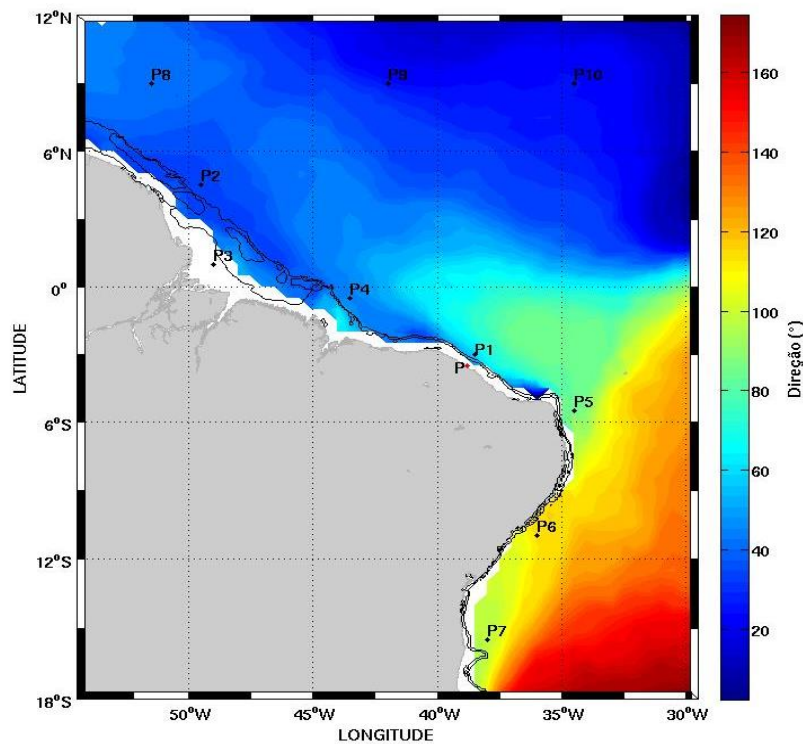
Como pode ser constatado na FIGURA 3, as direções médias predominantes acima de 0° de latitude são de nordeste. Na faixa entre 0° e 6° S há uma maior ocorrência de ondas de E e ENE, havendo também uma pequena porção de nordeste e outra de sudeste, a qual se estende em direção ao sul.

Quando analisamos a distribuição da frequência média das ondas para cada intervalo de direção (FIGURA 4) ao longo de todo o período de estudo, podemos fazer as seguintes observações:

- há baixa ocorrência de ondas (<5%) entre 0 e 30° (Quadrante 1) a sudeste e leste da área de estudo. A frequência é maior nas regiões mais próximas à plataforma do setor Norte, podendo chegar a 25% em algumas áreas;
- as ondas de 30 a 60° (Quadrante 2) são mais frequentes nas proximidades dos pontos P2 e P3, área que abrange os estados do Norte do Brasil;

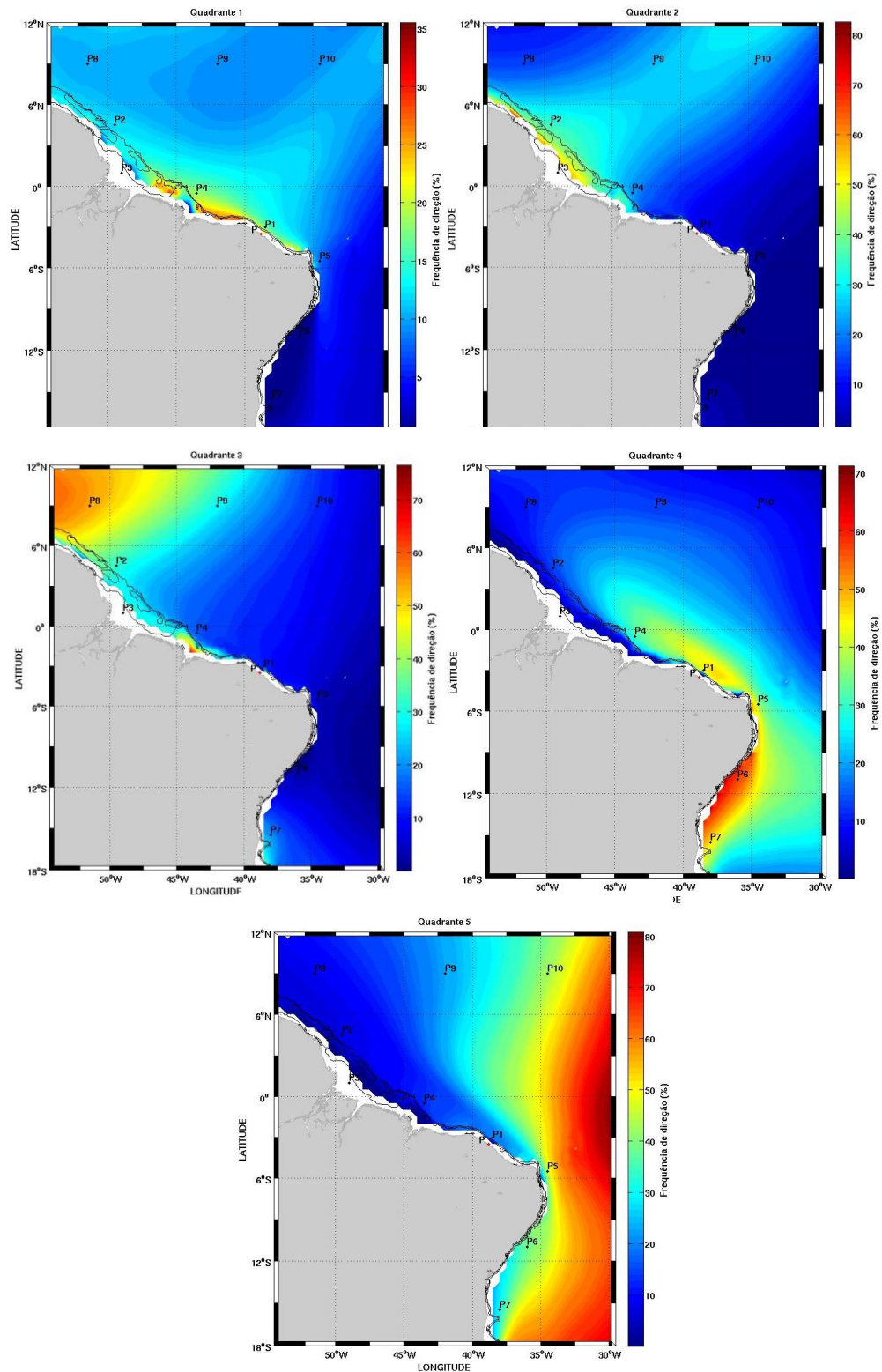
- não há a ocorrência de grande número de ondas entre 60 e 90° (Quadrante 3) em boa parte do mapa, estando estas concentradas na região noroeste do domínio (pontos P8, P9 e P2) e em parte da plataforma, nas proximidades dos pontos P4 e P3;
- há grande frequência de ocorrência de ondas entre 90 e 120° no sudeste do mapa e em parte da área próxima aos pontos P4 e P1, podendo chegar a mais de 60% no ponto P6 e proximidades;
- É possível visualizar uma faixa a leste do mapa, se estendendo por todas as latitudes, com altos valores (>70%) de frequência de ocorrência de ondas entre 120 e 360°. Boa parte das ondas desse quadrante, porém, não alcançam a maioria dos pontos estudados, com exceção dos pontos P5 (cerca de 50% da frequência), P6 e P7.

Figura 3- Média climatológica da direção das ondas para os anos de 1979 a 2015.



Fonte: o autor.

Figura 4- Frequência média da direção das ondas por quadrante para os anos de 1979 a 2015. Quadrante 1: 0-30°; Quadrante 2: 30-60°; Quadrante 3: 60-90°; Quadrante 4: 90-120°; Quadrante 5: 120-360°;



Fonte: o autor.

4.2.1.2. Altura

Por meio da FIGURA 5, podemos observar que as maiores alturas médias de onda, os quais variam entre 2,2 e 2,5 m, estão concentradas na região mais ao norte da área de estudo, onde se localizam os pontos P8, P9 e P10. As ondas nos pontos mais próximos à plataforma apresentam menores valores (de 1,4 a 1,9 m) quando comparados às das regiões em oceano aberto. Valores semelhantes também são observados nas áreas próximas aos pontos P6 e P7, na porção sudeste do mapa. Entre as duas regiões descritas há valores intermediários de altura, os quais vão de 1,9 a aproximadamente 2,2m.

Na FIGURA 6, podemos visualizar a distribuição espacial da frequência média das ondas para diferentes intervalos de altura significativa. Valores de altura entre 0,5 e 1m são aproximadamente nulos em todo o mapa; há uma maior ocorrência (valores que chegam a mais que 40%) de ondas entre 1 e 1,5 m, as quais estão localizadas na região da plataforma ou próximas a ela, na região do P7; frequências maiores que 30% de ondas entre 1,5 e 2m são encontradas em boa parte do mapa, estando os maiores valores (>60%) localizados em parte das proximidades da plataforma continental do setor Norte e Leste; para alturas significativas entre 2 e 2,5m, as maiores frequências (>45%) são observadas na porção leste da área de estudo, estendendo-se a oeste e sul. Há pouca incidência de ondulações com essas alturas, valores inferiores a 15%, na região da plataforma continental. É possível constatar frequências de 18 a 20% para ondas com alturas entre 2,5 e 3m localizadas na porção norte e sudeste do mapa e, em geral, pouca ocorrência de ondas acima dos 3m em toda a região de estudo.

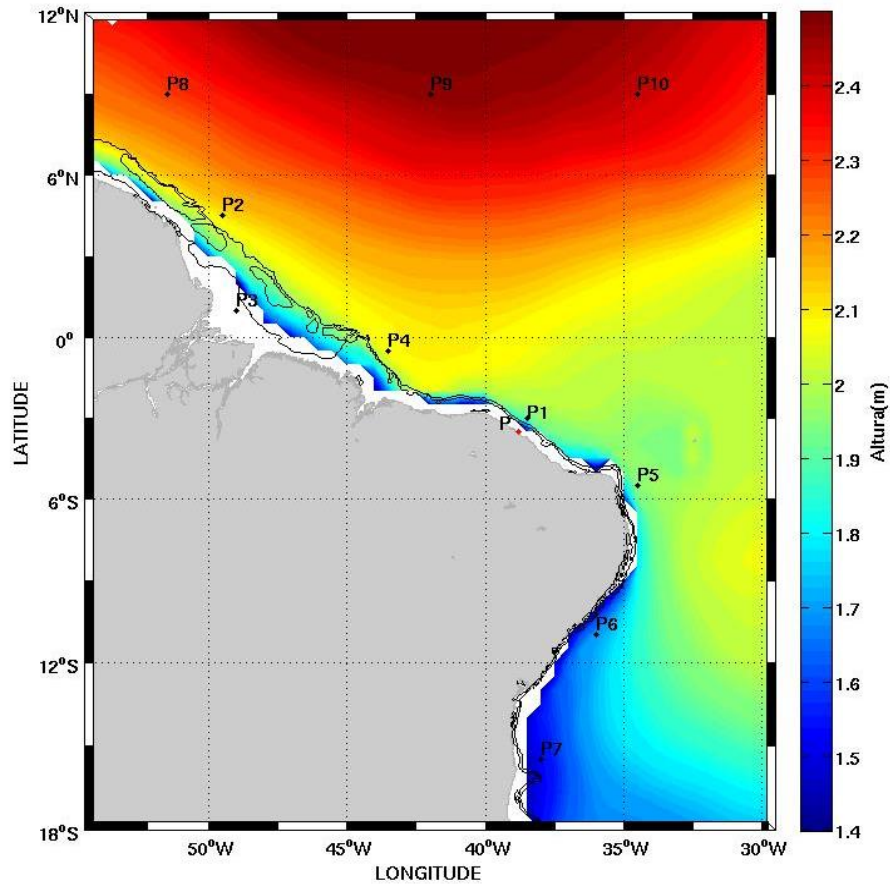
4.2.1.3. Período

Os maiores valores médios de período são localizados nas regiões mais *offshore*, podendo alcançar valores entre 11 e 12 s, na porção leste do mapa (FIGURA 7). Essas ondas de períodos superiores a 10s são caracterizadas como do tipo *swell*. As com valores inferiores a 10s são ondas *sea*, as quais são mais evidentes na regiões sobre e mais próximas da plataforma continental e em uma faixa mais extensa na porção sul da área de interesse. Os menores valores de período são observados nas regiões dos pontos P6 e P7.

Como podemos verificar na FIGURA 8, grande parte das ondulações com períodos de pico menores que 10s são encontradas na região da plataforma continental e áreas próximas aos pontos P6 e P7 (>80%). Há grande frequência também na porção entre as

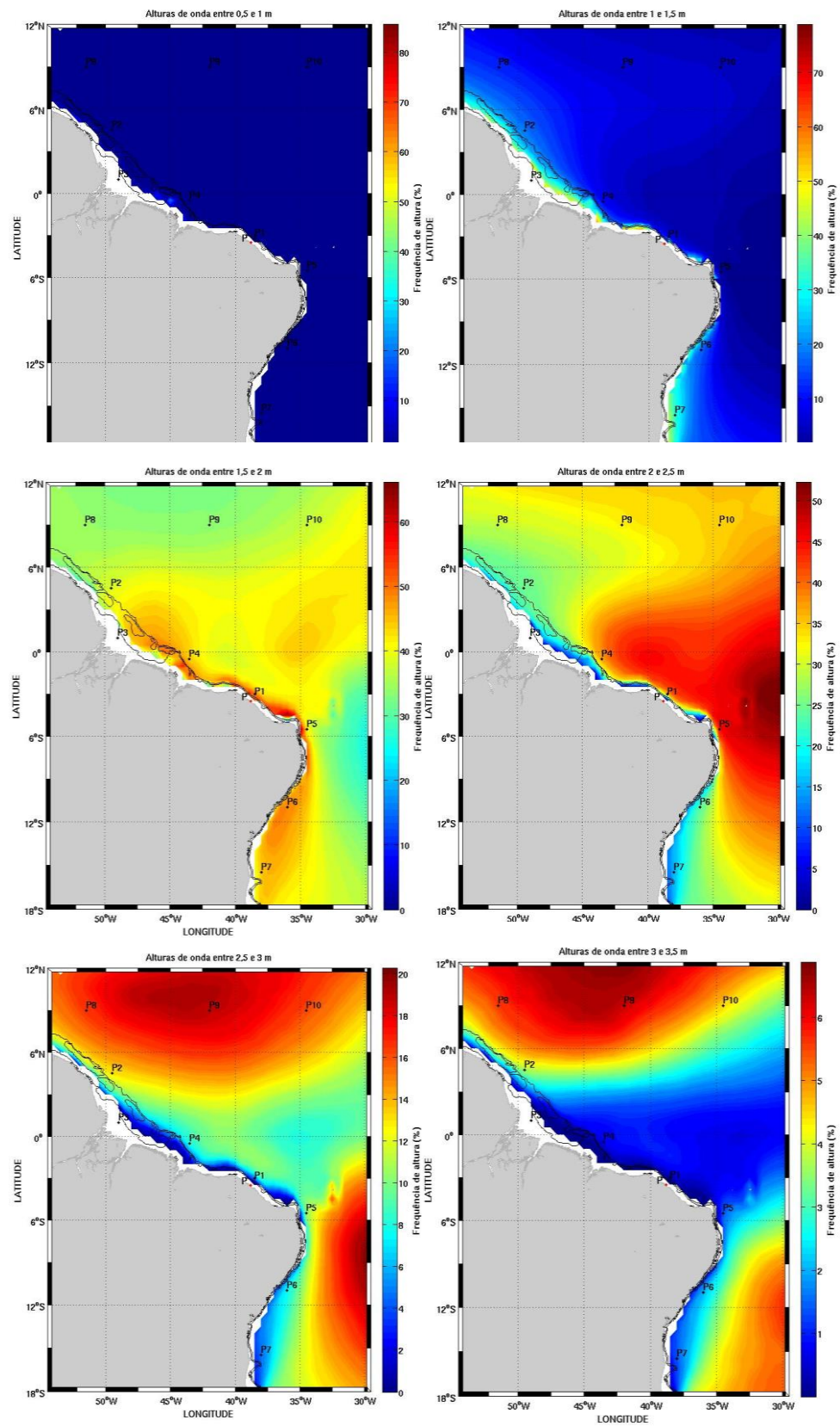
latitude 6 e 12° N e 35 e 54°W. O maior número de ondulações com períodos maiores que 10s (>60%) é encontrado na porção leste do mapa, aproximadamente entre as longitudes 35 e 30°W, cobrindo todas as latitudes.

Figura 5- Média climatológica da altura significativa das ondas para os anos de 1979 a 2015.



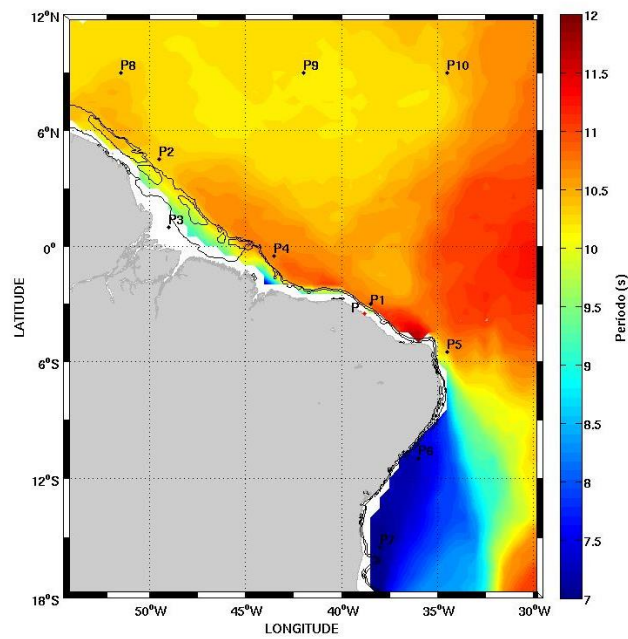
Fonte: o autor.

Figura 6 - Frequências médias da altura significativa das ondas agrupadas por intervalo de altura para os anos de 1979 a 2015.



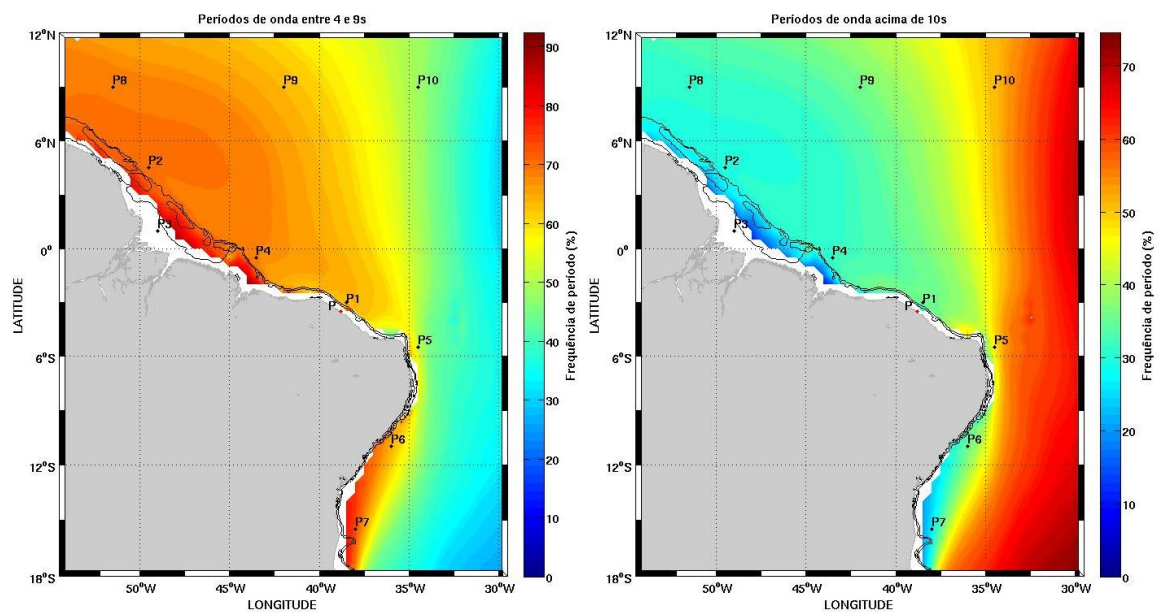
Fonte: o autor

Figura 7- Média climatológica do período de pico das ondas para os anos de 1979 a 2015.



Fonte: o autor.

Figura 8- Frequências médias de ocorrência do período de pico das ondas por intervalo de período para os anos de 1979 a 2015.



Fonte: o autor.

4.2.2. *Variação sazonal*

Além do estudo geral do regime das ondas, a análise das médias climatológicas foi dividida por trimestres, para que se pudesse observar as variações referentes a cada estação do ano nos parâmetros avaliados e suas distribuições espaciais. Novamente iremos descrever cada variável separadamente. As estações do ano mencionadas a partir desta seção se referem às do Hemisfério Sul.

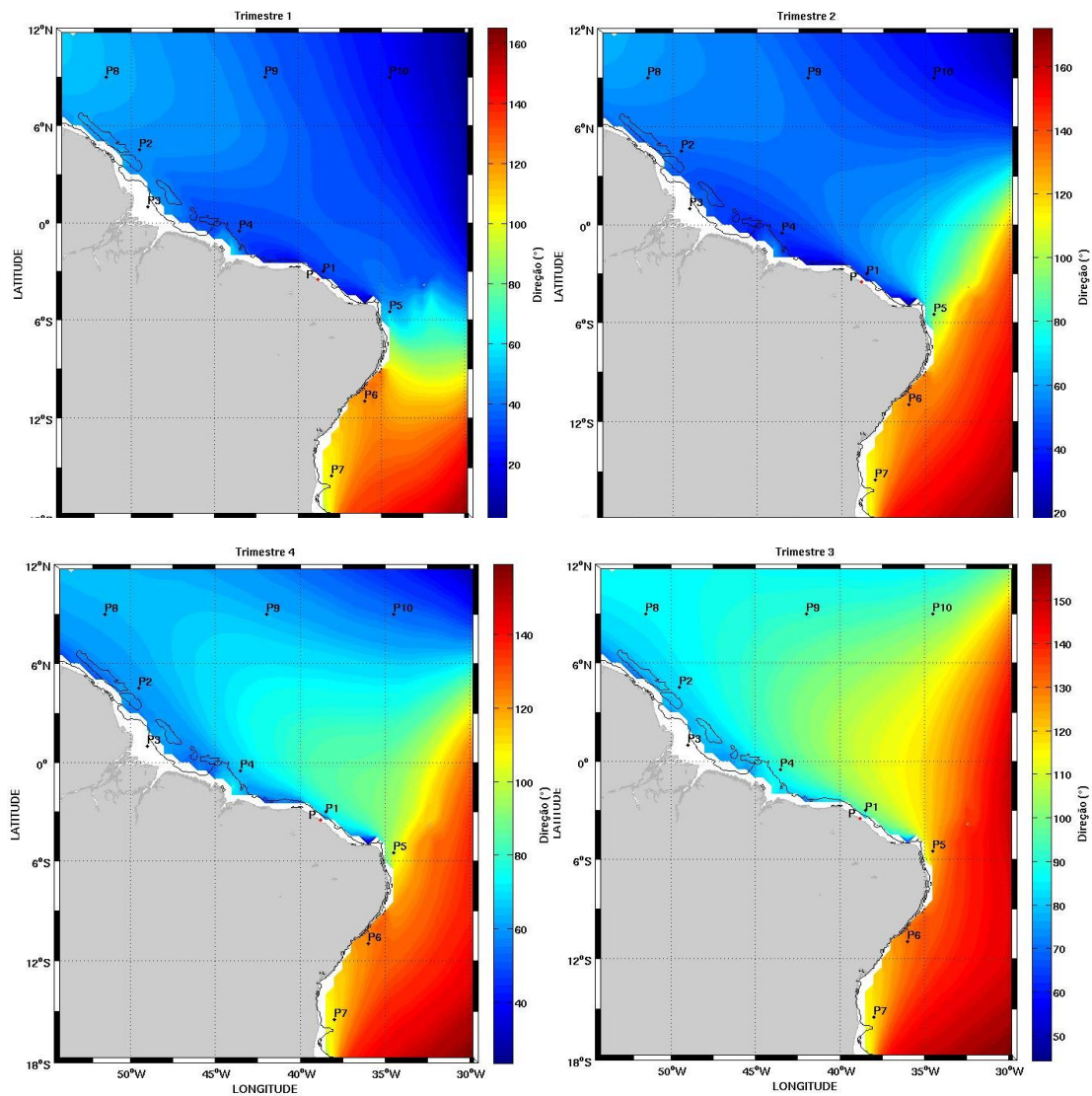
4.2.2.1. *Direção*

Podemos observar as variações sazonais de direção por meio da FIGURA 9. Durante o verão (primeiro trimestre), a partir de 6°S até 12°N, as ondas são predominantemente de NE, direção na qual as ondas chegam a todos os pontos de estudo, com exceção do P6 e P7. Isso se deve ao fato da ZCIT se encontrar mais ao sul, fazendo com que haja uma intensificação dos alísios de nordeste nesta região (DA SILVA *et al.*, 2011). Há uma pequena faixa de direção próxima ao Ponto 5 com valores entre 60 e 90°, e, ao sul desta, as ondulações são provenientes de sudeste. No segundo trimestre, as ondulações de sudeste e leste alcançam latitudes mais ao norte, à medida que vai ocorrendo um deslocamento da ZCIT em direção a essa direção. O ponto P5 passa a receber ondulações provenientes de E. O padrão de distribuição das direções ao longo do mapa, porém, se mantém.

No inverno (terceiro trimestre), há um aumento considerável na frequência de ondas de sudeste, aos quais se estendem desde 18°S até aproximadamente 10°N, na porção leste da área de estudo. Há uma maior ocorrência também de ondas de E e ESE. Os pontos P8, P2 e P4 continuam a receber ondulações de NE.

No quarto semestre (primavera) ainda é intensa a propagação de ondas de sudeste e leste.

Figura 9- Média climatológica sazonal da direção das ondas para os anos de 1979 a 2015. Trimestre 1: JANEIRO (JAN) –MARÇO (MAR); Trimestre 2: ABRIL (ABR) –JUNHO (JUN); Trimestre 3: JULHO (JUL) –SETEMBRO (SET); Trimestre 4: OUTUBRO (OUT)-DEZEMBRO (DEZ);



Fonte: o autor.

4.2.2.2 Altura

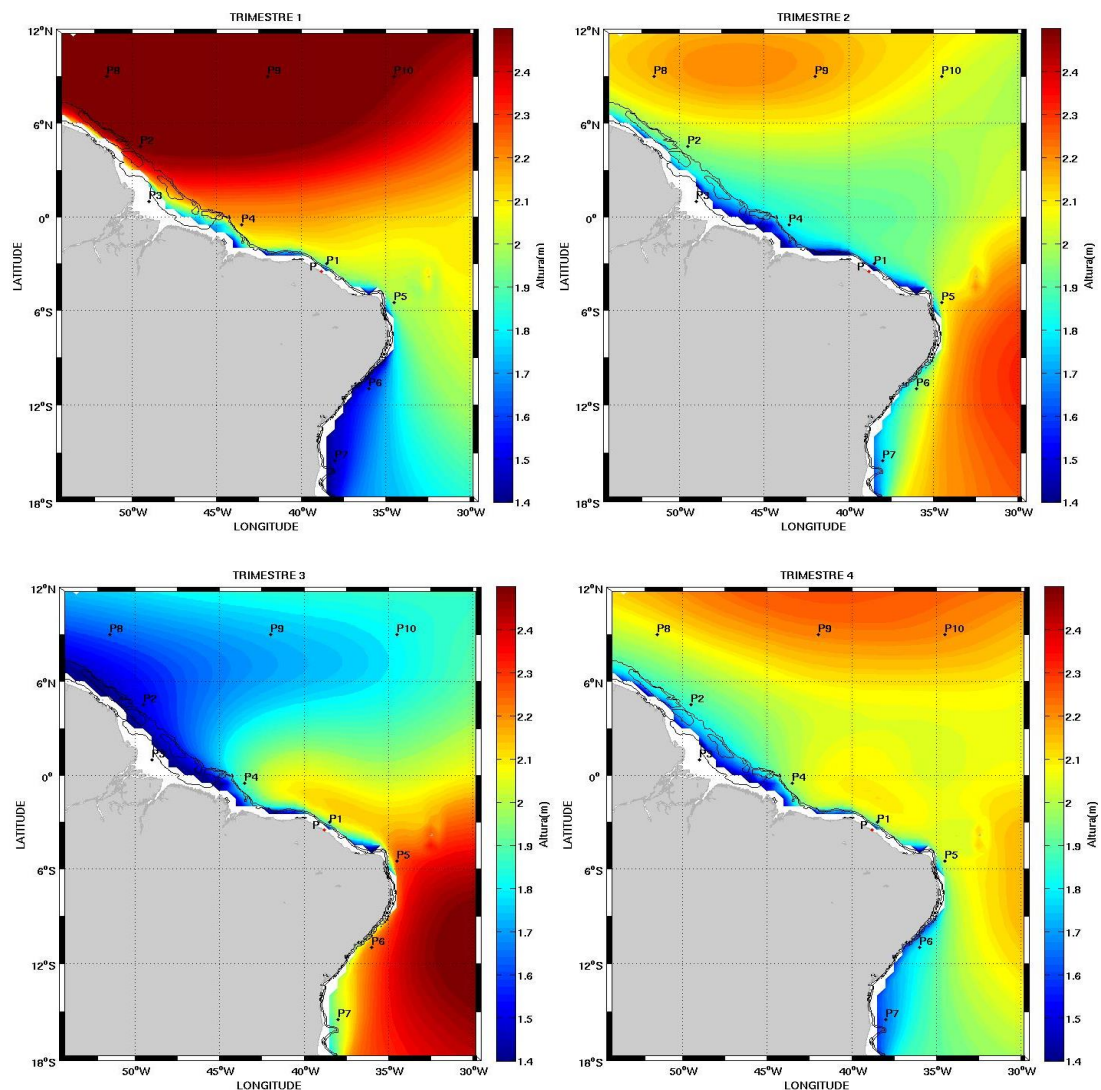
Conforme podemos visualizar na FIGURA 10, no primeiro trimestre, as regiões com maiores alturas médias, acima de 2,4m, se encontram ao norte do mapa, onde estão os pontos P8, P9 e P10, e também um pouco mais ao sul desses pontos, próximo a P2. Nos demais pontos de estudo, mais próximos à costa, as ondas são menores que 2 m. Valores semelhantes também são encontrados na porção mais ao sul da área de interesse.

No segundo trimestre (outono), há um grande aumento na altura das ondas na porção leste e sudeste do mapa, com valores próximos ou superiores a 2,2 m. Estas ondas são decorrentes da intensificação dos alísios de sudeste. Os pontos 5,6 e 7 passam a receber essas ondulações. A região norte do mapa continua apresentando altos valores, porém inferiores aos do primeiro trimestre.

No inverno (terceiro trimestre), a média da altura das ondas é ainda maior no quadrante sudeste do mapa e essas ondulações seguem se propagando para oeste.

No quarto trimestre (primavera), há um predomínio de ondas acima de 2m em boa parte do mapa. Valores inferiores são encontrados apenas próximos à costa.

Figura 10 - Média climatológica sazonal da altura das ondas para os anos de 1979 a 2015. Trimestre 1: JAN-MAR; Trimestre 2: ABR-JUN; Trimestre 3: JUL-SET; Trimestre 4: OUT-DEZ;



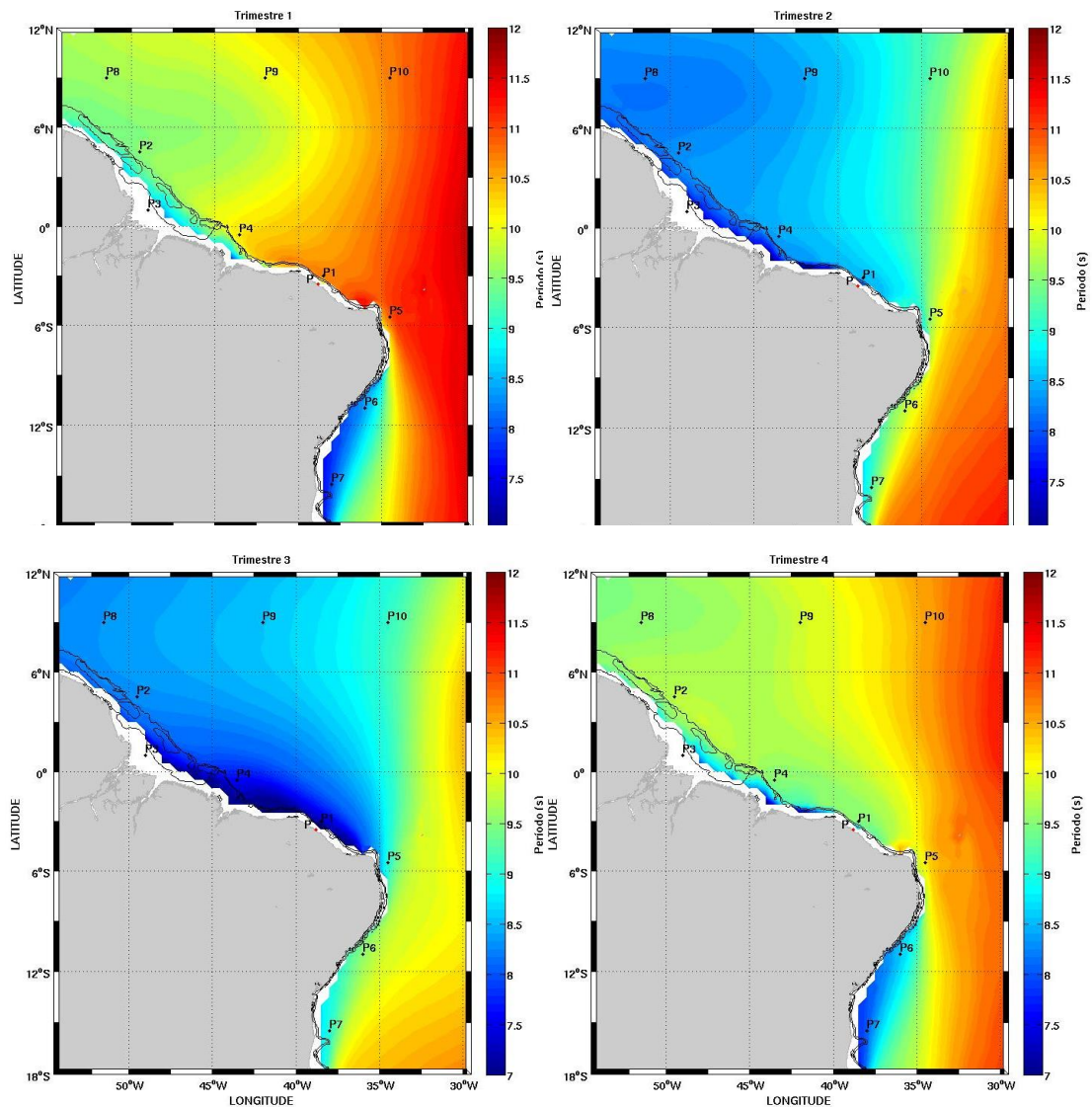
Fonte: o autor.

4.2.2.3. Período

As regiões de maiores períodos, indicando ondas *swell*, se encontram na porção leste da área de estudo para todos os trimestres, e nordeste para o primeiro, terceiro e quarto trimestre (FIGURA 11).

No verão ondas de mais de 11 s de período alcançam a costa do Brasil, nas regiões que incluem P5 e P1. No inverno, ondas *swell* chegam a atingir a costa do sudeste do Brasil, onde se localizam os pontos P6 e P7. Nas demais áreas há predominância de ondas de período abaixo de 10 s (ondas *sea*). No trimestre seguinte, ondas *swell* se propagam por uma maior área.

Figura 11 - Média climatológica sazonal do período das ondas para os anos de 1979 a 2015. Trimestre 1: JAN-MAR; Trimestre 2: ABR-JUN; Trimestre 3: JUL-SET; Trimestre 4: OUT-DEZ;



Fonte: o autor.

4.2.3 Descrição do regime de ondas para os pontos de estudo

São mostrados na TABELA 5 os valores médios sazonais, dos pontos escolhidos, entre os anos 1979 e 2015, dos seguintes parâmetros: altura máxima (H máx), altura mínima (H mín), amplitude de altura (Amp. de H), média da altura (Média de H), período máximo (T máx), período mínimo (T mín), amplitude de período (Amp. de T) e média de período (Média de T). Descreveremos a seguir as características do regime de ondas para cada ponto do estudo escolhido.

As FIGURAS 12-20 representam histogramas direcionais das alturas significativas e períodos de pico para cada trimestre (sazonal) e todos os anos de estudo. Ela foi dividida em 16 direções (pontos cardeais (N, E, S, W), colaterais (NE, SE, SW, NW) e subcolaterais (NNE, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, WNW, NNW), cobrindo um ângulo de 22.5° para cada direção; quando centrada nos pontos cardeais, inclui a partir do centro, portanto, direções de até 11.25° (ou 11°15') no sentido horário e anti-horário. Por esta abordagem, uma direção de 100°, por exemplo, será considerada de leste.

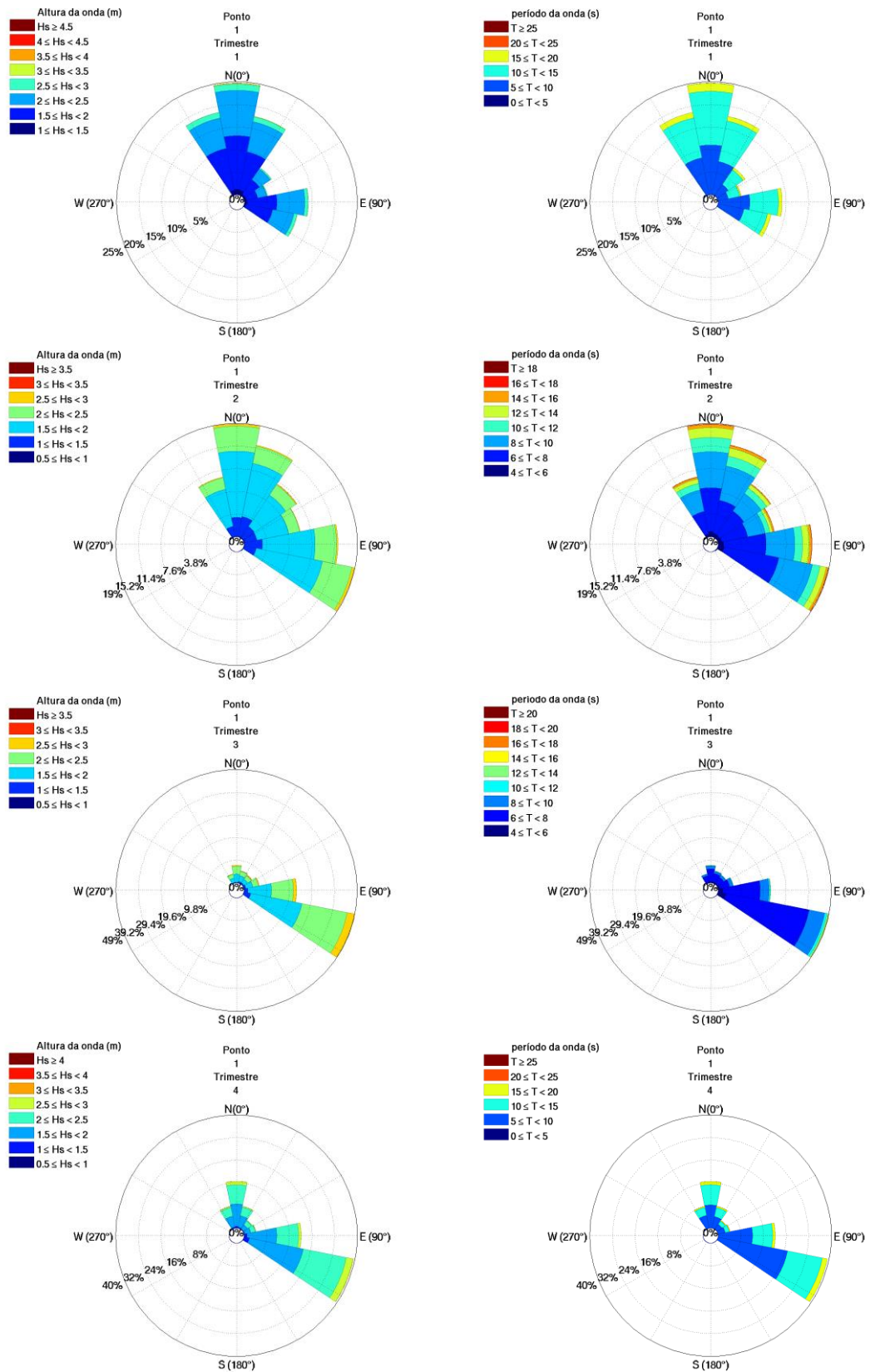
Em relação ao ponto P1 (38° 30' W; 03° 00' S), localizado na altura da cidade de Fortaleza/CE, ao longo do ano há predominantemente ondas de direção ESE (30%), E (18%), N (aproximadamente 17%) e NNE (12%). Há também a presença de ondas de NWN, NE e ENE. As maiores alturas se encontram entre 1,5 e 2,5m, com média de 1,55m e altura máxima de 2,95m (tabela). Há maior ocorrência de ondas *sea*, com maiores períodos de pico entre 6 e 8s. Como pode se observar na FIGURA 12, o Ponto 1 recebe no primeiro trimestre ondas predominantemente de N (25%), NNW e NNE, principalmente do tipo swell, com períodos mais frequentes entre 10 e 20s e Hs podendo superar 2,5m. No segundo trimestre há uma predominância de ondas *sea* para as direções N e ESE, com 19% cada. Há a presença de ondas swell de maiores períodos (até 16s) que a estação do ano anterior. No inverno (terceiro trimestre), as ondas são em sua maioria de ESE (49%), com alta frequência também de ondas de leste (aproximadamente 20%). Há maior frequência de ondas acima dos 2m que nos outras estações do ano. Na primavera, as direções das ondas seguem o mesmo padrão que o trimestre anterior, porém a frequência das ondas de N começa a aumentar novamente.

Tabela 5- Médias sazonais para cada ponto de estudo ao longo de todos os anos (1979-2015).

<i>Estação do ano</i>	<i>Pontos</i>	<i>H máx</i>	<i>H mín</i>	<i>Amp. de H</i>	<i>Média de H</i>	<i>T máx</i>	<i>T mín</i>	<i>Amp. de T</i>	<i>Média de T</i>
Verão (HS)	P1	4,09	0,83	3,26	1,98	21,08	3,93	17,15	10,76
	P2	4,58	0,83	3,75	2,38	18,86	2,08	16,78	9,3095
	P4	3,01	0,83	2,18	1,5612	20,58	3,23	17,35	8,7767
	P5	4,02	0,83	3,19	1,9889	22,13	3,13	19	10,8881
	P6	2,86	0,83	2,03	1,5868	20,88	2,71	18,17	8,4194
	P7	3,12	0,83	2,29	1,4668	19,71	2,47	17,24	7,931
	P8	5,39	0,83	4,56	2,589	18,77	2,73	16,04	9,6414
	P9	5,55	0,83	4,72	2,6336	20,01	2,9	17,11	9,9931
	P10	5,32	0,83	4,49	2,5084	21,8	2,87	18,93	10,7234
	Outono (HS)	P1	3,11	0,8	2,31	1,78	17,88	4,19	13,69
P2		3,57	0,84	2,73	1,8528	17,27	4,69	12,58	8,2145
P4		2,69	0,56	2,13	1,3892	17,59	3,82	13,77	7,3638
P5		3,69	1,18	2,51	2,0643	19,26	5,14	14,12	9,5898
P6		4,17	0,9	3,27	1,9624	20,16	4,79	15,37	9,8115
P7		4,02	0,75	3,27	1,7656	18,58	4,18	14,4	9,1527
P8		3,81	1,06	2,75	2,1627	17,09	5,19	11,9	8,2279
P9		3,62	1,08	2,54	2,1778	17,69	4,91	12,78	8,4462
P10		3,65	1,11	2,54	2,0624	19,69	4,79	14,9	9,2966
Inverno (HS)		P1	3,47	0,96	2,51	1,98	18,67	4,54	14,13
	P2	2,33	0,73	1,6	1,3221	17,64	4,05	13,59	8,289
	P4	3,2	0,56	2,64	1,5039	19,36	3,58	15,78	6,7907
	P5	4,23	1,3	2,93	2,2696	19,07	5,43	13,64	8,9995
	P6	4,98	1,08	3,9	2,2393	20,41	5,57	14,84	9,5518
	P7	5,38	0,93	4,45	1,9932	18,95	3,96	14,99	9,0282
	P8	3,71	0,91	2,8	1,6274	17,56	4,98	12,58	8,3884
	P9	4,78	1,02	3,76	1,7438	18,15	4,86	13,29	8,5904
	P10	6,62	1,05	5,57	1,814	20,47	4,4	16,07	9,1514
	Primavera (HS)	P1	3,81	0,79	3,02	1,98	21,83	3,77	18,06
P2		4,49	0,79	3,7	1,7181	20,53	3,96	16,57	9,7281
P4		2,74	0,64	2,1	1,5241	20,48	3,61	16,87	7,9061
P5		3,46	1,09	2,37	2,0334	21,89	4,93	16,96	10,1757
P6		3,88	0,98	2,9	1,8038	20,29	4,47	15,82	8,5825
P7		4,17	0,73	3,44	1,665	19,07	3,87	15,2	8,0431
P8		5,21	0,91	4,3	2,0627	19,98	5,26	14,72	9,563
P9		5,34	1,01	4,33	2,2182	20,63	4,95	15,68	9,875
P10		5,3	0,99	4,31	2,2095	21,03	4,56	16,47	10,5531

Fonte: o autor.

Figura 12- Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P1.

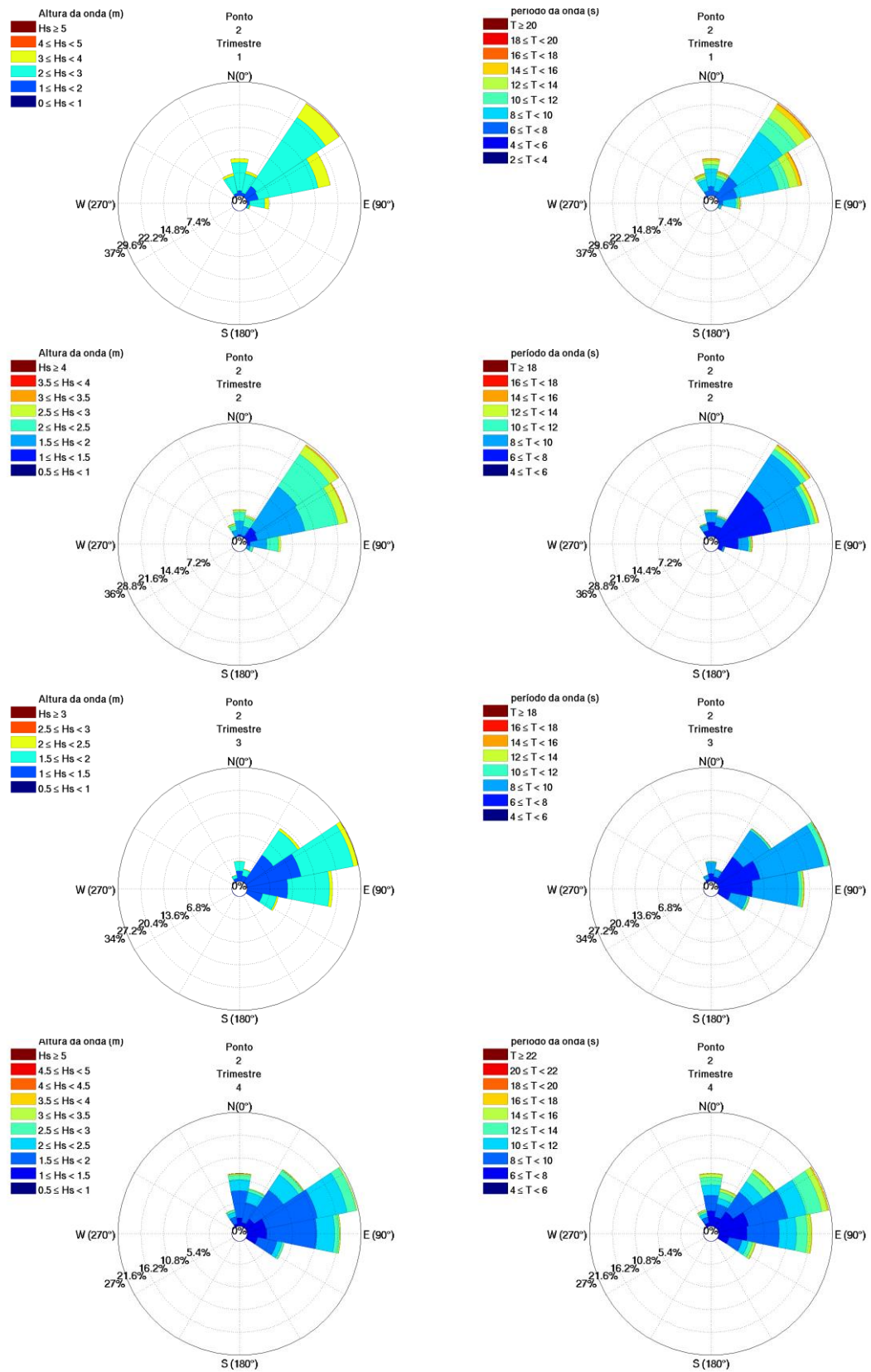


Fonte: o autor.

As direções anuais predominantes para o P2, próximo à plataforma continental do estado do Amapá, são de NE ($\cong 25\%$) e ENE ($\cong 30\%$), estando os valores mais frequentes entre 40 e 60°. Há também a presença de ondulações de E ($\cong 15\%$) e, em menores frequências, de N, NE e NW. As alturas significativas de maior ocorrência estão entre 1,5m (50%) e 2 m (aprox. 38%) e os períodos entre 7 e 8 s. Para o primeiro semestre (FIGURA 13), são encontradas ondas com maiores frequências na direção NE (37%) e ENE (aprox. 27%), alturas principalmente entre 2 e 3m, embora sejam encontradas entre 3 e 4m. São mais recorrentes ondas sea, porém são encontradas ondas com períodos acima de 16 s. As direções das ondas no trimestre 2 seguem o mesmo padrão que o do trimestre anterior. No trimestre 3, há aumento da frequência de ondas de leste, atingindo o valor de aproximadamente 27%. Ondas de ENE passam a ser as mais frequentes (34%), seguidas das de NE (aprox. 14%). Na primavera um aumento na frequência de ondas de N (16%), NW (8%) e NE (8%) enquanto que as outras direções permanecem com frequências similares à estação anterior.

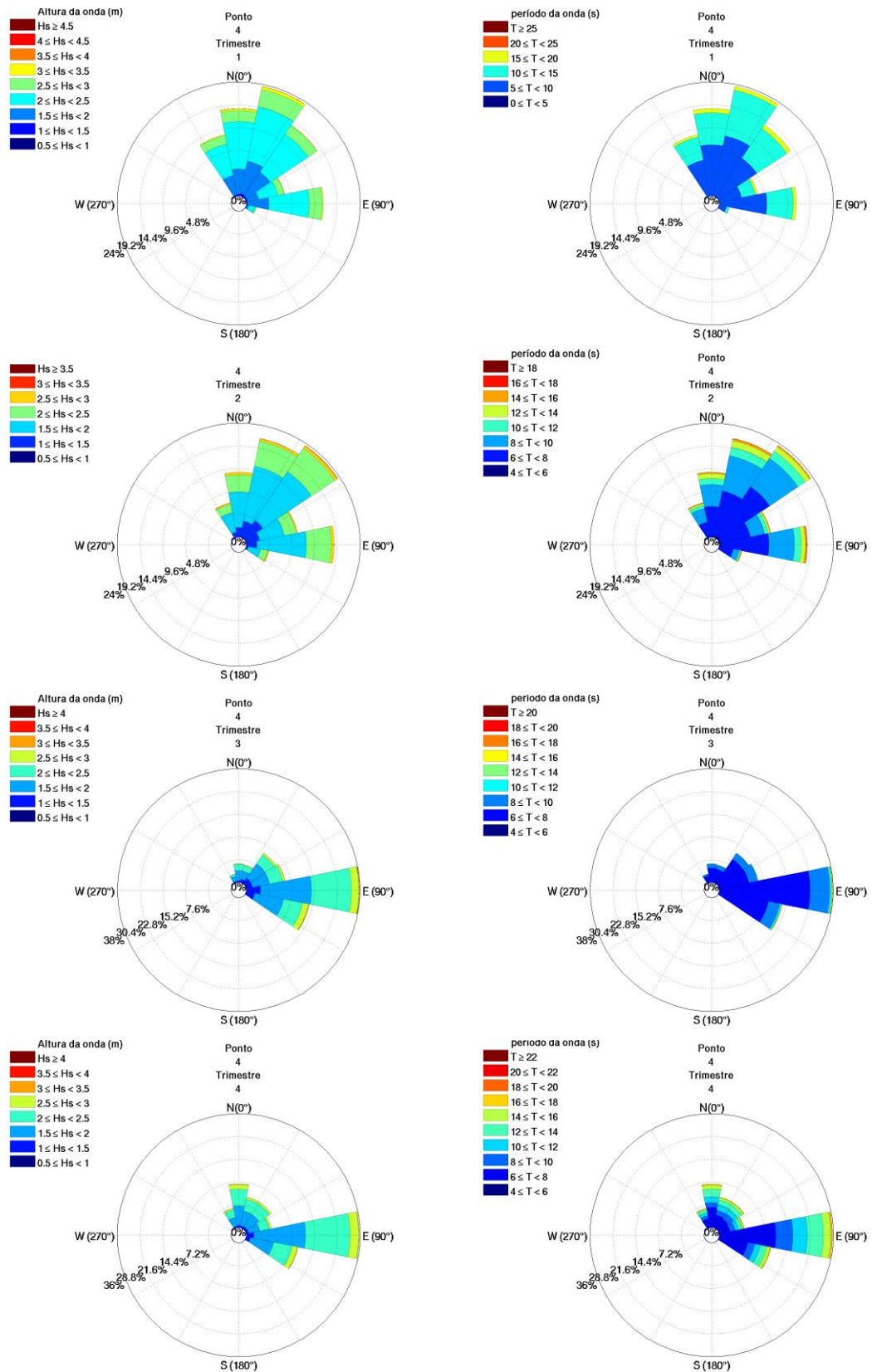
Para o ponto P4, localizado próximo à PC do estado do Maranhão, pode ser constatado que a direção mais recorrente ao longo do ano é a de E, com quase 28% do total. Outras direções também apresentam alta frequência, como as de NE (aprox. 16%), NNE (aprox. 15%), N (aprox. 13%) e SE (11,2%). Ondas em sua maioria do tipo sea, com períodos de maior frequência entre 5 e 8 s; chegam a este ponto, porém, ondas swell de período médio de até 14s. Alturas de ondas de maior frequência de 1 m (>45%) e 1,5 m (aprox. 45%). Avaliando sazonalmente (FIGURA 14), as ondas mais frequentes no verão para este ponto são de NNE (24%), N e NE (com aprox. 19% cada) e E (aprox. 15%). Ondas em sua maioria entre 1 e 2,5 m, e períodos indicando grande frequência de ondas swell. No outono, as ondas passam a ser predominantemente do tipo sea. Há um aumento do número de ondas de NE e E. A partir do inverno, grande parte das ondas passam a chegar de E (38%), com pequenas frequências nas outras direções. Na primavera, embora ainda com baixa ocorrência, as ondas de N começam a crescer em número de observações.

Figura 13 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P2.



Fonte: o autor.

Figura 14 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P4.



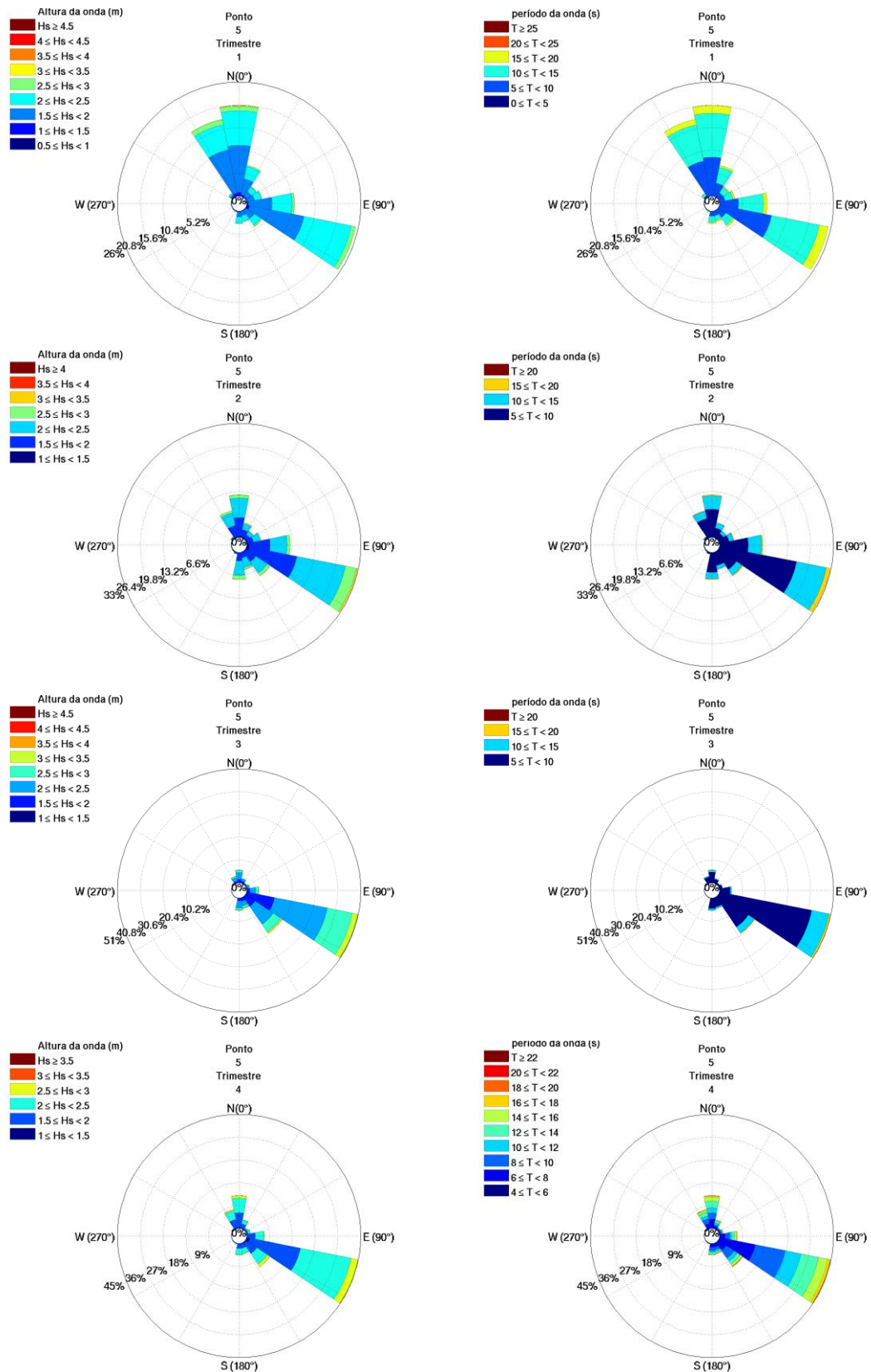
Fonte: o autor.

O P5, localizado próximo à região do estado do Rio Grande do Norte, recebe grande número de ondulações vindo de ESE, com as direções predominantes estão entre 100 e 120°. Esse padrão se mantém ao longo dos diferentes trimestres (FIGURA 15). No verão, porém, há grande incidência de ondas de N (20,8%) e NW (aprox. 17%), as quais vão diminuindo ao longo do ano, alcançando valores bem baixos no inverno e voltando a aumentar um pouco na primavera. Há um número maior de ondas com alturas médias entre 1,5 e 2,5 m, vindas mais de sudeste, que os outros pontos até então mencionados. As maiores frequências de ondas acima de 2 m são encontradas durante o inverno.

No Ponto 6, localizado próximo à PC do estado do Sergipe, é praticamente inexistente, quando consideradas as médias dos parâmetros ao longo dos 35 anos do estudo, a presença de ondulações provenientes de norte e nordeste, o que difere dos outros pontos já discutidos. As direções predominantes se encontram entre 90 e 190°, o que significa ondulações de E (18%), ESE(45%), SE (8%), SSE (9%) e S (18%), sendo 100° a direção de maior frequência. Esse padrão ocorre em todas as estações (FIGURA 16), apenas com algumas variações de frequência, como observado nas figuras. As maiores alturas de onda estão entre 1 e 2m. São observadas, porém, um valor considerável de ondas acima dos 2m, especialmente no inverno, quando são mais abundantes. As ondas *sea* são mais recorrentes, embora haja claramente a presença de ondas *swell* para todas as direções e trimestres, especialmente no outono.

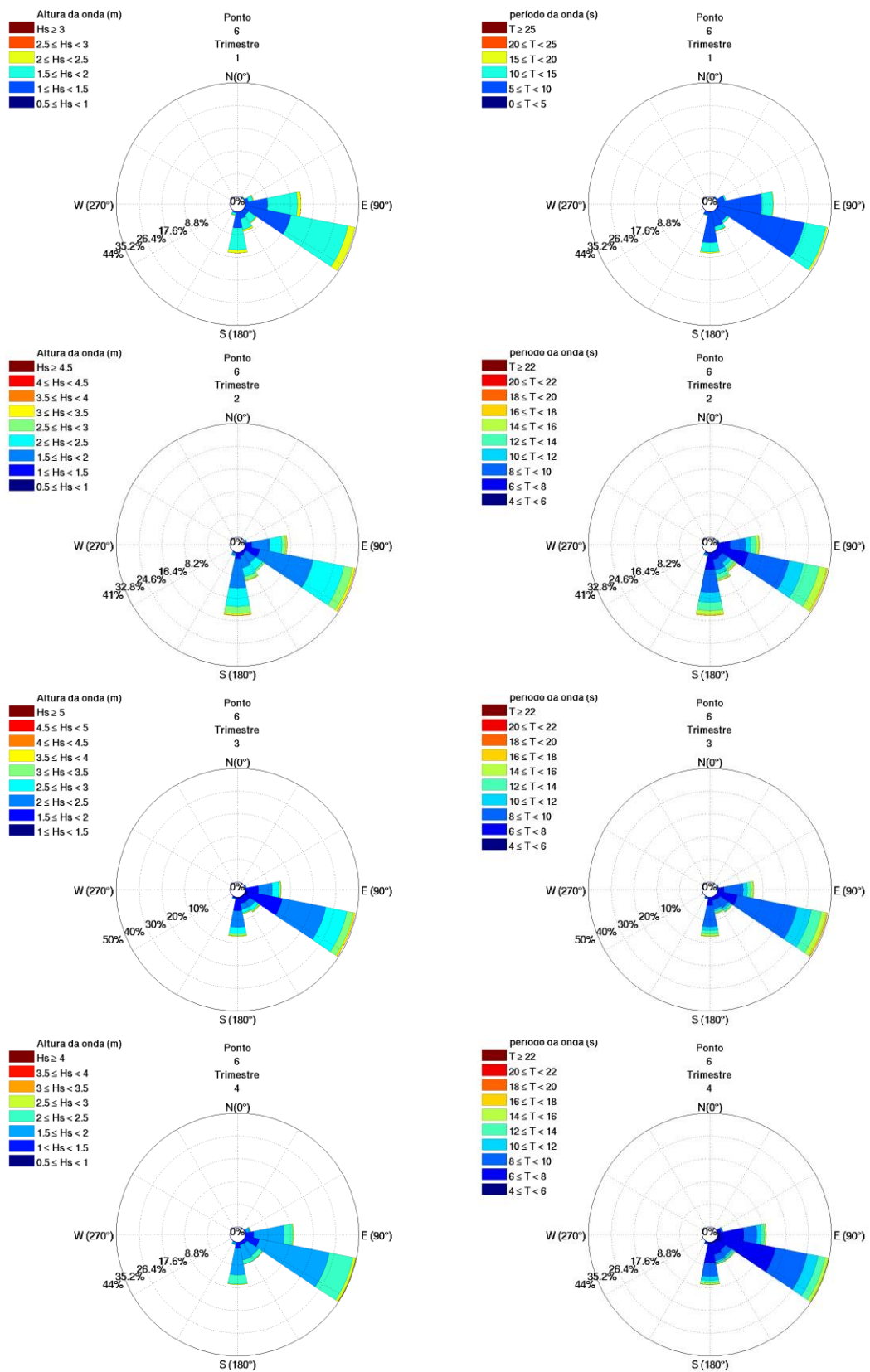
As direções dominantes para o ponto P7, localizado próximo à PC do estado da Bahia, estão entre 70 e 170°. As ondas provenientes de leste (90°) são as que ocorrem com maior frequência. Ondas *sea*, com períodos entre 6 e 10s são mais frequentes, embora possa ser observado ondas *swell*, de períodos médios para todos os anos entre 10 e 14s. Podemos observar na FIGURA 17 as variações sazonais para este ponto. No primeiro trimestre, a frequência das ondulações de leste é a maior, chegando a 46% do total, com períodos mais observados entre 6 e 8s e alturas entre 1 e 2m, representando mais de 90% das ondas para cada direção. No segundo trimestre, o número de ondulações provenientes dos quadrantes entre ESE e S aumenta, havendo uma maior incidência tanto de ondas *sea* quanto *swell* para essas direções. Não há aumento significativo de ondas *sea* para ondulações de leste, mas se pode constatar a maior presença de ondas do tipo *swell* para essas regiões. O terceiro e quarto semestre apresentam um perfil semelhante ao primeiro, tendo o terceiro, porém, maiores períodos para as ondulações de todas as direções.

Figura 15 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P5.



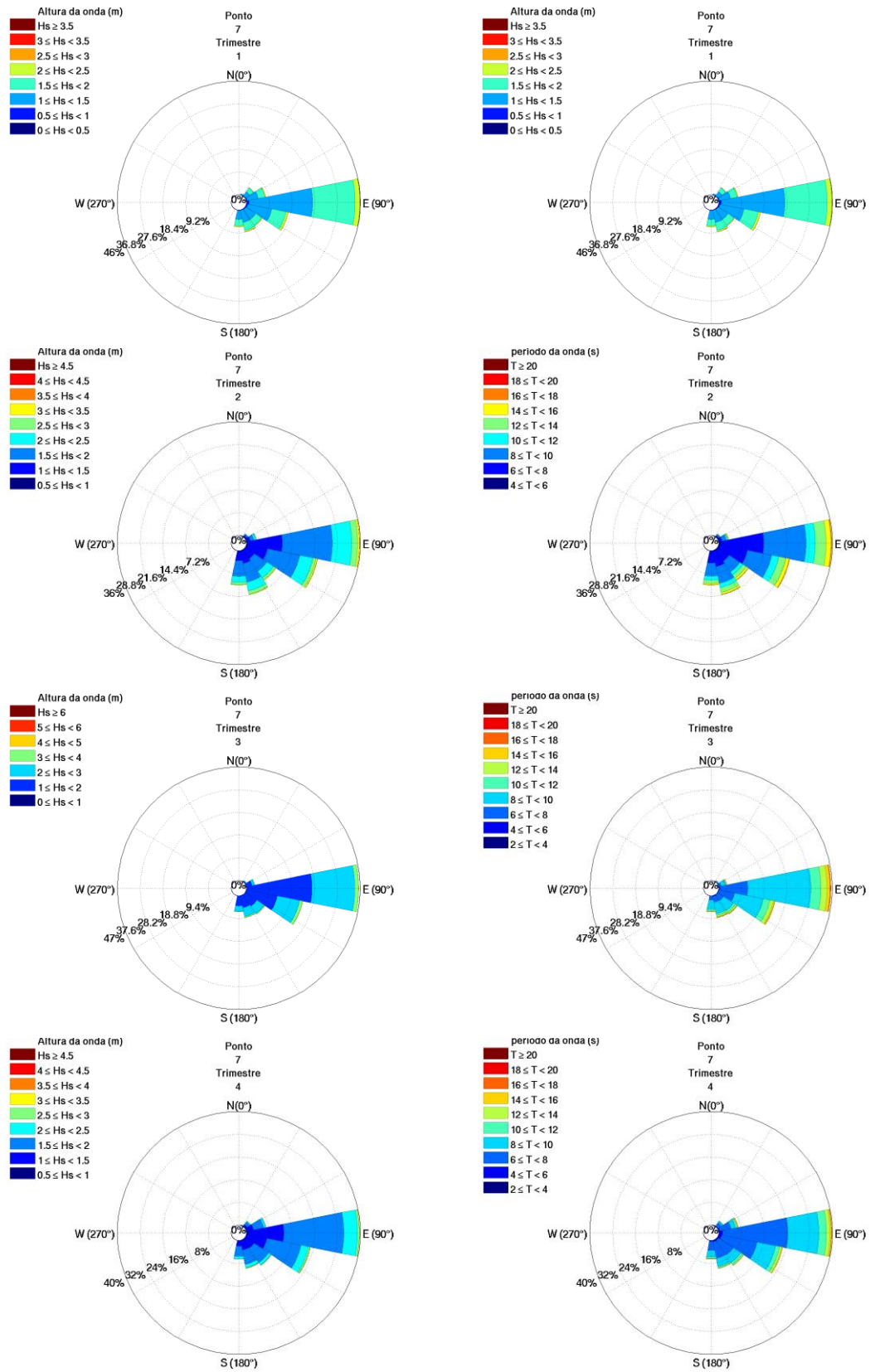
Fonte: o autor.

Figura 16 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P6.



Fonte: o autor.

Figura 17 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P7.



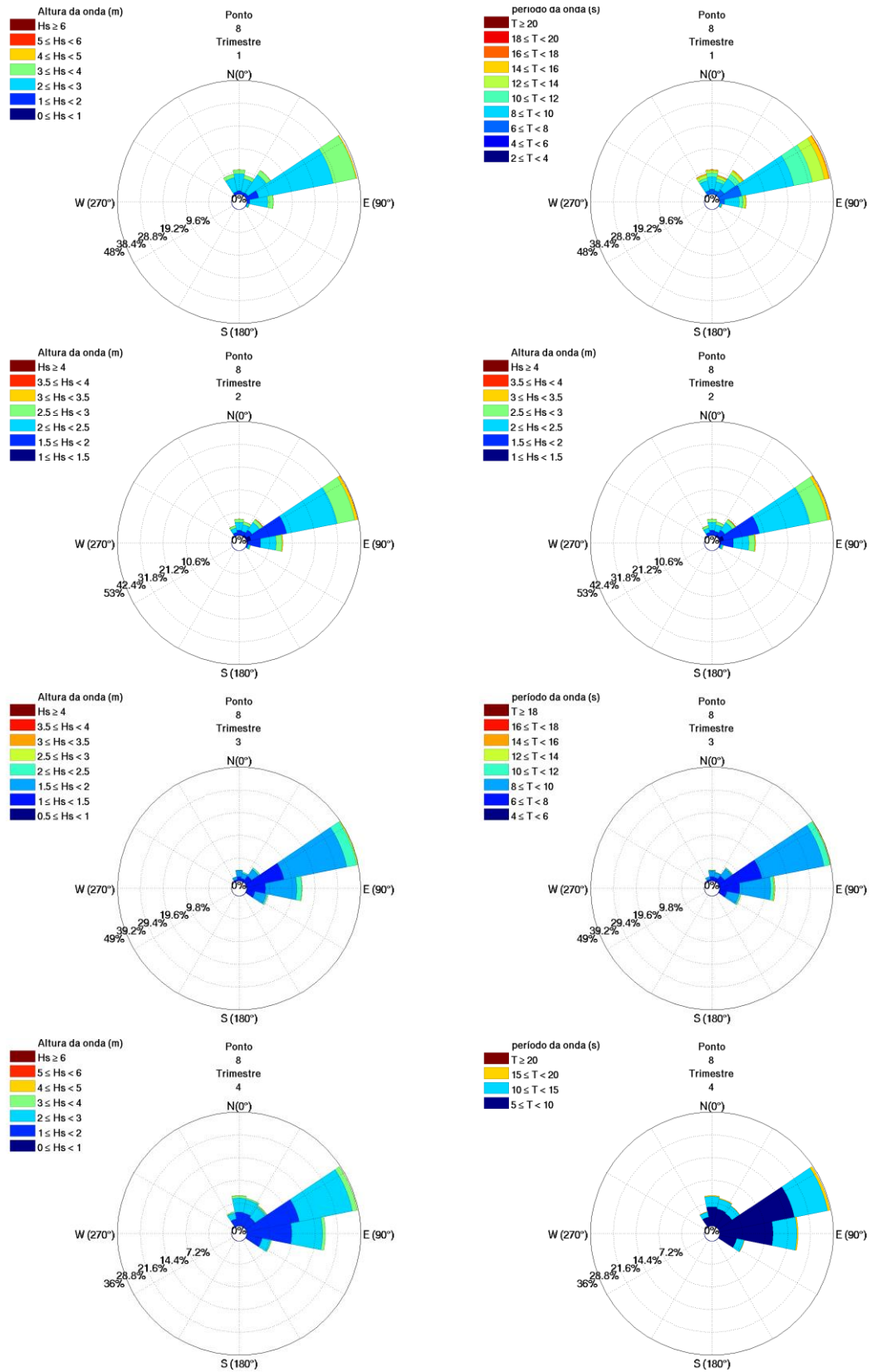
Fonte: o autor.

As direções médias mais frequentes do Ponto P8, localizado em região mais *offshore*, se encontram entre 0 e 110°, havendo a predominância de ondulações de ENE, sendo 60° e 70° as com maior ocorrência (mais de 20% cada). As alturas de maior frequência estão entre 1 e 3m, com as ondas de 1,5 e 2m representando cerca de 35% e 30%, respectivamente. Os períodos mais observados são de 7 e 8s, com mais de 30% cada. No verão, as ondas entre 2 e 3 m são mais observadas, porém com grande frequência também de ondas entre 3 e 4 m. A altura média chega a alcançar 2,59m, a maior dentre as estações. Nessa estação, para as direções mais observadas, há uma grande incidência de ondas *swell*, representando quase 40% do total de ondas para cada direção. No segundo e terceiro semestres, a quantidade de ondulações entre NNW e NE diminuem, porém aumenta para as ondulações de E e ESE, sobretudo para o terceiro trimestre. O número de ondas no quarto semestre entre NNW e NE volta a aumentar, assim como aumenta as ondulações de leste. Os histogramas direcionais sazonais podem ser vistos na FIGURA 18.

O ponto P9, localizado em região mais *offshore*, recebe ondulações de grande número de direções, desde NW a SE, sendo as de ENE as mais predominantes (aprox. 29%), seguidas das de NE com aproximadamente 23% do total. Podemos verificar que as ondas entre 2 e 3 m e períodos entre 7 e 9s são as mais observadas. Períodos de ondas *swell* também podem ser encontrados para ondulações que alcançam esse ponto. As ondas de ENE são as mais frequentes para todas as estações do ano (FIGURA 19), chegando a um percentual de 32 % no outono. No inverno, diminuem-se as frequências de ondas provenientes de N e NE, e aumentam-se as de E (18%), ESE (15%) e SE (12%). Na primavera, as ondulações de N voltam a ocorrer com mais frequência.

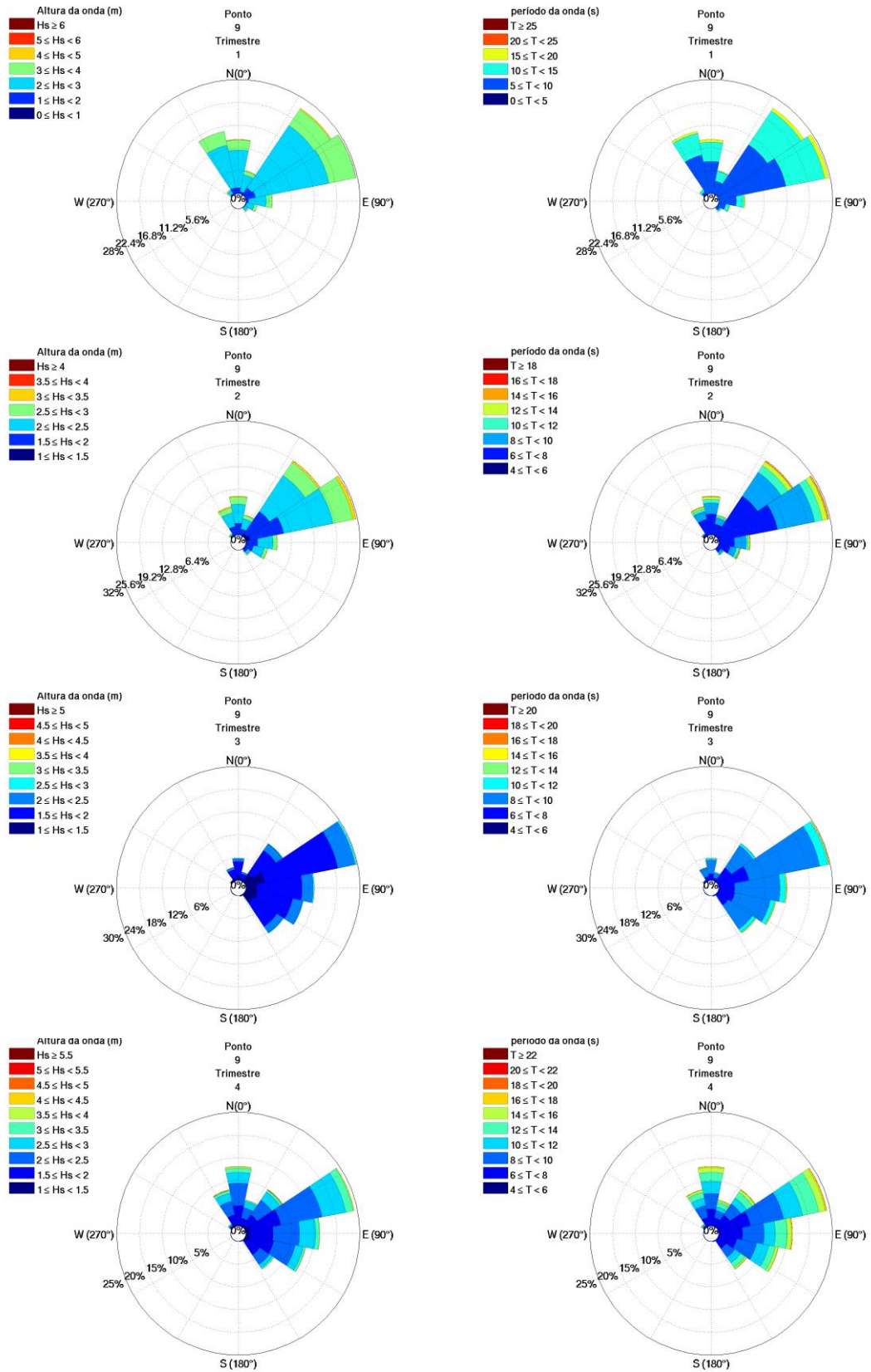
Ondulações em boa parte dos quadrantes de direção são registradas no ponto P10, localizado em região mais *offshore*, porém as mais frequentes variam de NW a S. As direções que mais ocorrem são de NE (aprox. 21%), NNW e N, com 12,6% cada, ENE (cerca de 10%) e SE (aprox. 9%). Alturas de onda entre 1,5 e 2,5 m são as mais observadas e períodos entre 7 e 9s, porém com grande frequência de ondas com períodos acima de 10 s, como pode ser constatado por meio da figura. As variações sazonais da altura significativa e período podem ser vistos na FIGURA 20.

Figura 18 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P8.



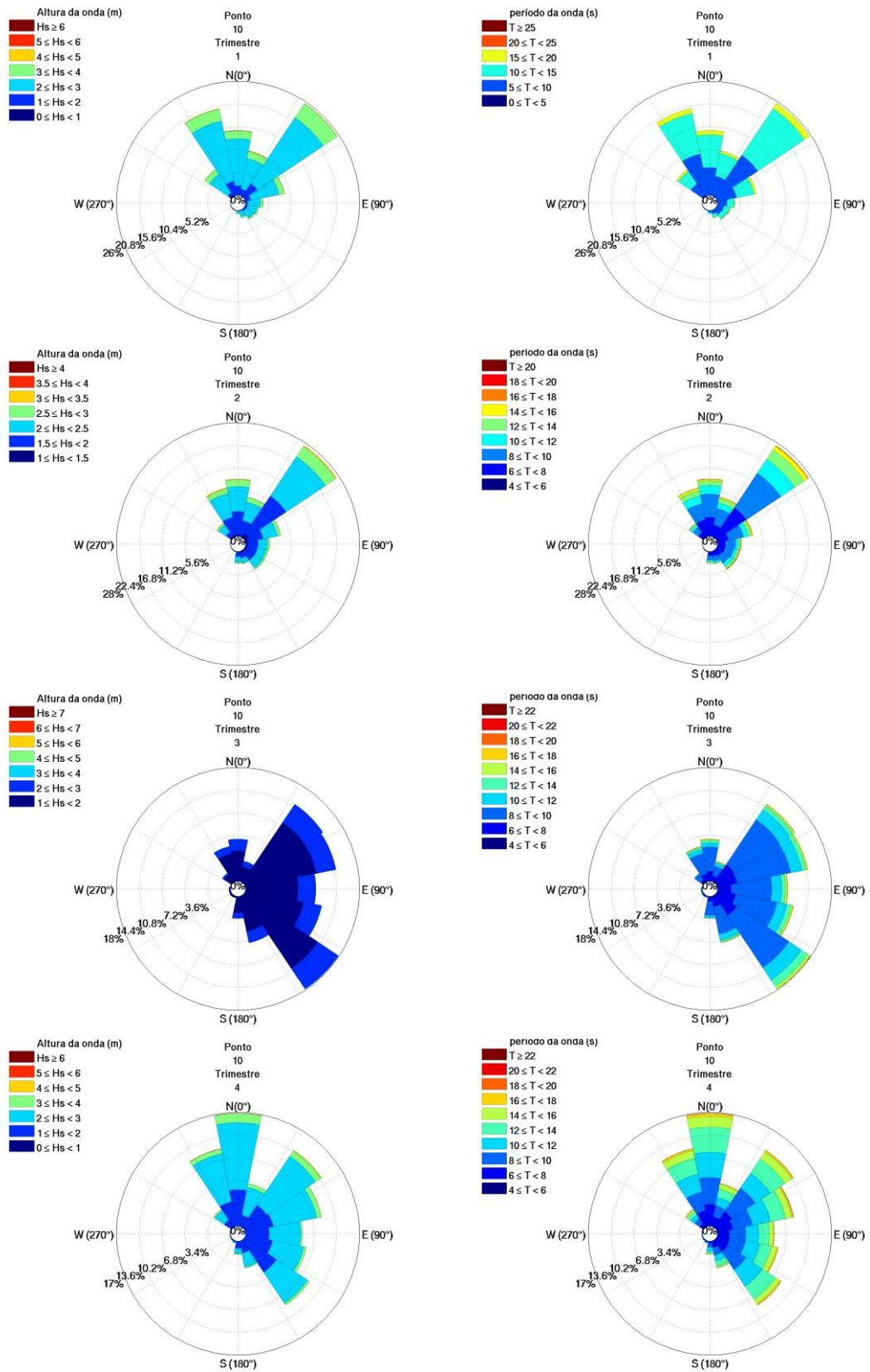
Fonte: o autor.

Figura 19 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P9.



Fonte: o autor.

Figura 20 - Histogramas direcionais das médias sazonais entre os anos 1979-2015 da altura e período de onda para o ponto P10.



Fonte: o autor.

4.2.4 Discussão

No setor Norte da área de estudo, o regime de ondas está principalmente relacionado à atuação dos ventos alísios. Quando a ZCIT se encontra mais ao sul, entre fevereiro e abril, os ventos alísios de nordeste exercem grande influência no regime de ondas dessa região, gerando ondulações de direção NE. Durante o verão e o outono, há também uma maior frequência de ondas swell geradas por ciclones tropicais e extratropicais no HN, como abordado por Alves (2006), gerando de NW a NE. Nos trimestres consecutivos, quando a ZCIT se encontra na região mais ao norte, as ondas formadas por conta dos intensificados ventos de alísio de SE são predominantes. Essa sazonalidade fica evidente ao observarmos a FIGURA 9. Os mapas de frequência de direção (FIGURA 4) nos permitem entender como se distribui espacialmente a média das direções nesse setor.

Analisando os histogramas direcionais dos pontos que influenciam as ondas desse trecho da costa, podemos observar que as ondas geradas sob influência dos alísios de nordeste e por ondas *swell* alcançam todos os pontos de estudo localizados nesse setor. As ondas de SE e ESE atingem P1 com grande frequência, porém vão diminuindo sua atuação à medida que se deslocam em direção a oeste da costa; os pontos P2 e P4, portanto, recebem com menores frequências ondulações dessas direções. As ondas que passam pelo ponto P8, na região noroeste do mapa, pouco influenciam o regime de ondas do litoral do setor Norte do Brasil, uma vez que são predominantemente de ENE.

Em relação à altura das ondas, pode-se observar por meio das figuras (média_saz) que as maiores alturas significativas coincidem com a direção das ondas associadas aos ventos mais intensos, de NE durante o verão e SE no inverno.

Devido ao setor Leste da área de estudo se localizar inteiramente na região de atuação dos alísios e esses ventos possuem direções e velocidades de grande constância, as ondas produzidas por eles exercem importante influência nessa costa. Segundo Dominguez; Da Silva; Martin (1992), embora ondas de N/NE estejam presentes ao longo de todo o ano nesse setor, ondas de E/SE são mais predominantes durante o outono e inverno, quando a ZCIT se localiza em uma posição mais ao norte. Esse fato pode ser constatado nos mapas climatológicos sazonais de direção (FIGURA 9) e nos histogramas direcionais para os pontos P5, P6 e P7 (FIGURAS 15-17). Como o ponto P5 se encontra em uma posição a nordeste da costa brasileira, recebe tanto as ondulações que exercem influência do Setor Norte quanto Leste da costa brasileira; isso explica, portanto, a alta frequência de ondas de NW e N, e

aumento nas de NNE, no verão, especialmente de ondas *swell* geradas por ciclones tropicais e extratropicais.

Variando sazonalmente de 10 a 20° S, há uma região, chamada de zona de divergência dos ventos alísios, em que, como o nome indica, parte dos ventos diverge, soprando nas direções E ou NE/N. Não foram constatadas ondulações dominantes de N/NE para as regiões dos pontos P6 e P7, o que sugere que essa zona de divergência se encontra predominantemente ainda mais ao sul da costa brasileira.

Ondas de direção S que chegam aos pontos P5 e principalmente P6 e P7 estão relacionadas a ventos associados a ciclones extratropicais do HS. São formados a partir de instabilidades geradas pela passagem de frentes polares (DIAS, 2013), resultando em fortes ventos, os quais são mais intensos durante o outono e inverno.

Alguns autores realizaram estudos do regime de ondas no litoral do Ceará. Da Silva *et al.* (2011) fez a análise para três anos distintos (1998,2000 e 2001) também utilizando dados do ondógrafo do Porto do Pecém. Os autores encontraram alguns resultados semelhantes aos obtidos no presente trabalho, como a maior frequência de ondas maiores que 2 metros no segundo semestre, cujas direções são em sua maioria de ESE (entre 100 e 120°). Justificaram essas maiores alturas de onda devido aos valores mais altos de intensidade dos ventos, os quais também foram encontrados pelos autores, para esse semestre. Para os meses de janeiro a abril, constataram a predominância de ondas de NE (entre 40-60°) associados aos alísios de mesma direção. Embora tenhamos encontrado um valor de aproximadamente 17% de ondas de NNE para os mesmos meses, ondas vindas de N foram as mais predominantes (25%). A grande diferença entre o espaço temporal utilizado em nosso trabalho e por Da Silva *et al.* (2011) pode induzir a algumas dessas variações de resultado. Comparando, porém, os dados da TABELA 2, para o ano 2000, com os obtidos pelos autores, para os 3 anos de estudo, ou seja, com uma maior aproximação do intervalo de tempo utilizado em ambos os trabalhos, novamente são encontradas diferenças das frequências das direções: 62,5% entre 90-120°, 18,75% entre 45-60°, contra 42,97%, 4,09% para as respectivas direções do presente trabalho.

4.2.3 Variabilidade temporal de longo prazo

Foram gerados mapas de coeficiente de regressão linear das séries temporais de cada ponto do *grid* do modelo, a fim de se analisar a distribuição espacial da variação de longo período da direção, altura e período das ondas para a área e período de estudo. Gráficos

de regressões lineares, obtidas a partir de séries temporais de médias mensais, também foram criados com o objetivo de se avaliar a tendência de aumento ou diminuição dos valores dos parâmetros das ondas ao longo dos 36 anos de estudo. O ponto escolhido para esta análise foi o P1, o mais próximo do ondógrafo do Porto do Pecém (ponto P).

4.2.3.1 Direção

Por meio da FIGURA 21, podemos observar as variações de direção para cada quadrante e suas distribuições na área de estudo. Para o primeiro quadrante (Q1; $0^\circ < \text{direção} \leq 30^\circ$) as maiores variações negativas (entre 4 e 5%) de frequência são encontradas próximas aos pontos P4 e P1, indicando que houve uma diminuição na tendência de incidência das ondulações com essas direções para essas áreas ao longo do período de análise. Essas variações se estendem, porém com menores valores, à região nordeste e leste da área de estudo. Pequenas variações positivas são encontradas nas áreas que envolvem os pontos P8 e P2.

Existe uma diminuição de até 5% na ocorrência de ondas do segundo quadrante (Q2; $30^\circ < \text{direção} \leq 60^\circ$), com maiores diferenças ocorrendo nos pontos P2, P9 e P10. Há uma variação positiva apenas para uma pequena região da plataforma norte brasileira.

Para o terceiro quadrante ($60^\circ < \text{direção} \leq 90^\circ$), há uma tendência de maior incidência de ondas na região da plataforma continental do Norte e Nordeste do Brasil e nas proximidades do ponto P7. Na maior parte da região, porém, há uma tendência de longo prazo de menores incidências de ondas deste quadrante.

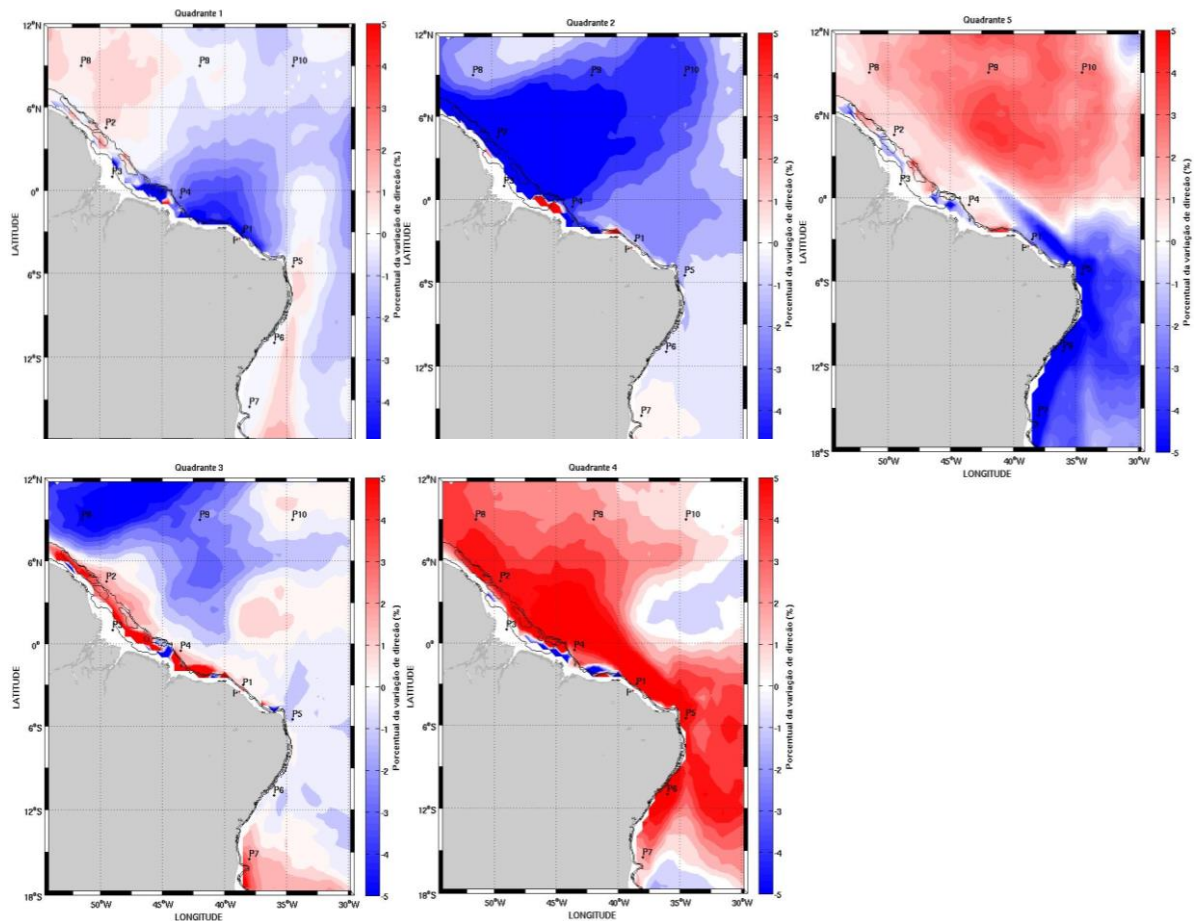
Um aumento (valores de até 5%) do número de ondas que chegam com direções entre 90° e 120° se faz evidente em boa parte do mapa, envolvendo todos os pontos de estudo, sendo que com menores variações nos pontos P10 e P7. É importante que este é o quadrante de maior frequência de ondas no setor Leste e parte do setor Norte da costa brasileira (FIGURA 4).

Em relação às ondas do quinto quadrante (Q5; direções $>120^\circ$), é possível constatar valores positivos de regressão (maiores incidências) no setor norte do mapa e negativos, no sul. Há apenas algumas exceções desse padrão em trechos da plataforma continental.

Para o Ponto 1 (P1), os quadrantes Q2, Q3 e Q5 não apresentaram grandes mudanças em suas frequências de ocorrência ao longo dos 35 anos analisados, uma vez que suas retas de regressão linear aproximadamente coincidem com suas médias. Porém, em

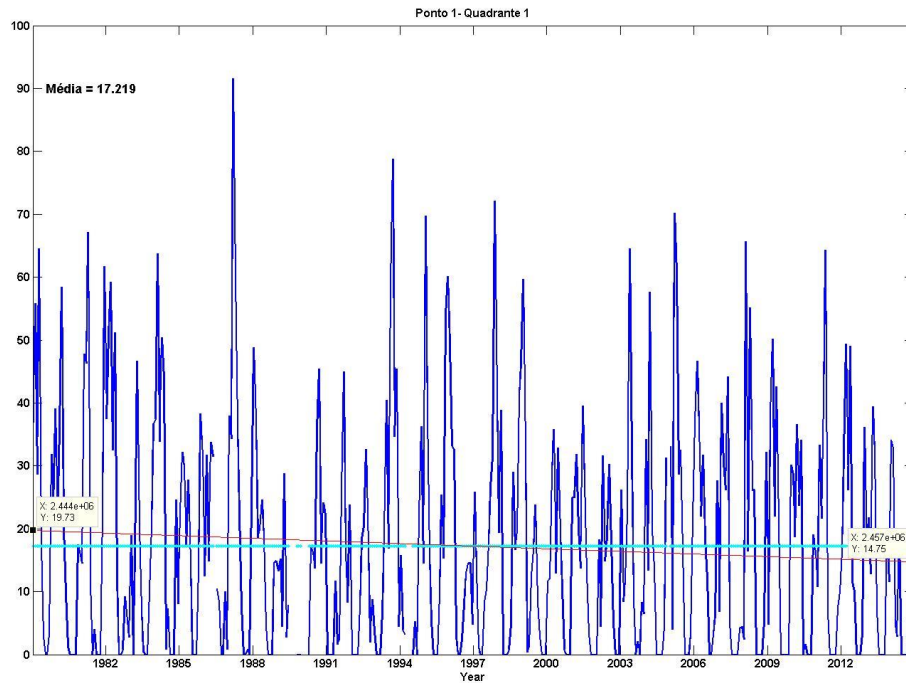
relação ao primeiro quadrante (ondas entre 0 e 30°; FIGURA 22), pode-se notar um decréscimo da frequência da direção de 4,15%. Essa variação fica mais evidente na região mais próxima da plataforma, abrangendo os pontos P1 e P4 (FIGURA 21 – Quadrante 1), estendendo-se, com menores valores, até o norte e leste do mapa. As ondulações entre 90 e 120° (FIGURA 23), de maior ocorrência (média de 42,80%), tiveram um tendência de aumento de frequência de 5,73%.

Figura 21 - Mapas de coeficiente de regressão linear para os diferentes quadrantes de direção de onda entre os anos 1979 e 2015. Os valores representam o percentual de variação da frequência de determinada direção. Quadrante 1: 0-30°; Quadrante 2: 30-60°; Quadrante 3: 60-90°; Quadrante 4: 90-120°; Quadrante 5:120-360°.



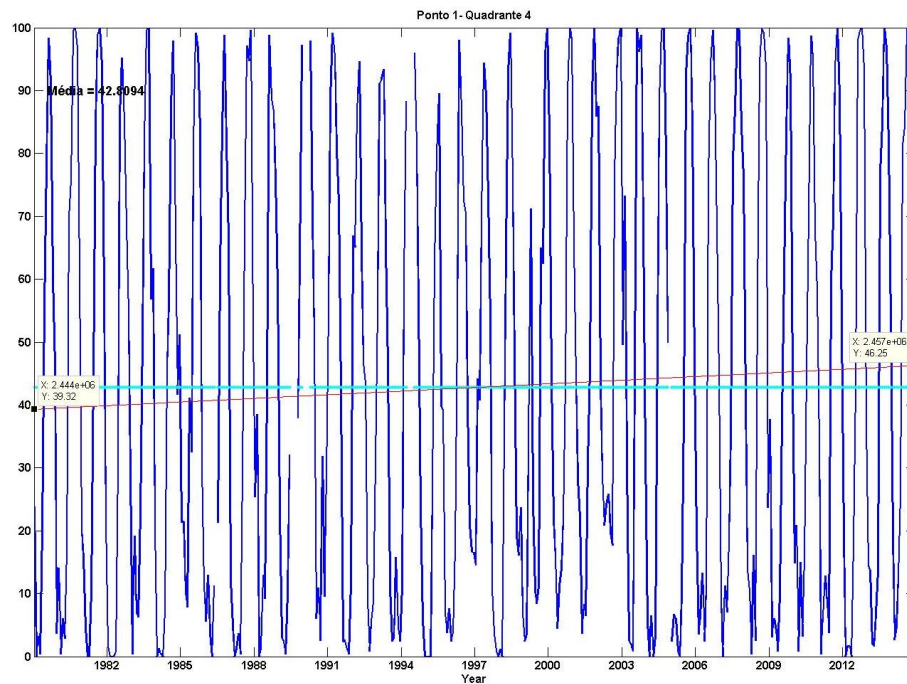
Fonte: o autor

Figura 22 - Série temporal das médias de frequência de ocorrência de direção no ponto P1 para o Quadrante 1 (0-30°), entre os anos 1979-2015. A reta vermelha representa a linha de tendência de regressão linear; a azul, a média mensal para todos os anos.



Fonte: o autor.

Figura 23 - Série temporal das médias de frequência de direção no ponto P1 para o Quadrante 4 (90-120°), entre os anos 1979-2015. A reta vermelha representa a linha de tendência de regressão linear; a azul, a média mensal para todos os anos.



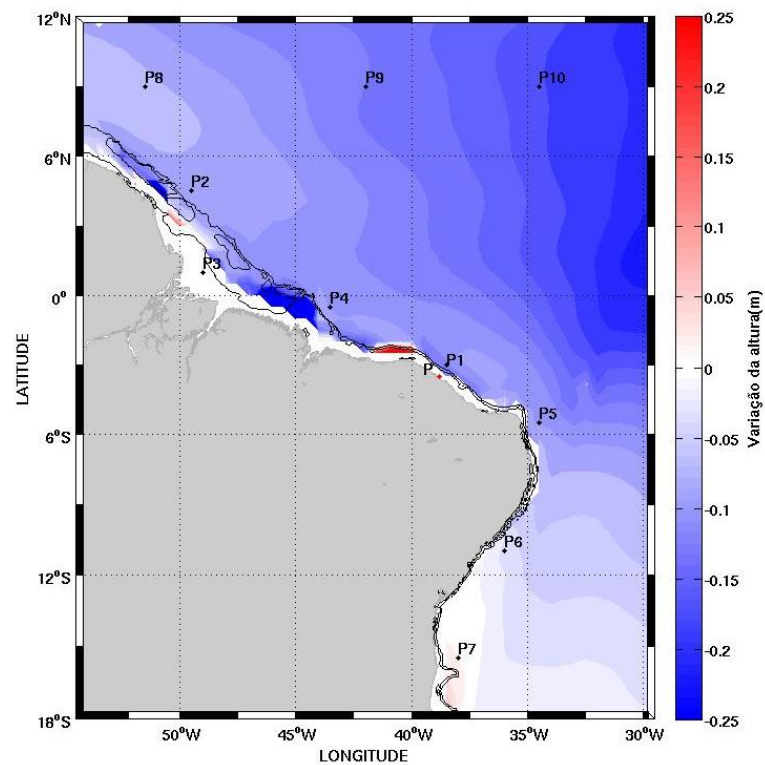
Fonte: o autor.

4.2.3.2 Altura

Boa parte da área de estudo (FIGURA 24) apresentou uma tendência de decréscimo da média mensal da altura das ondas ao final do período analisado. Os menores valores (-0.25m) estão localizados no extremo nordeste (NW) do mapa, com as faixas de variação diminuindo à medida que se afasta desse ponto, alcançando os menores valores ou nulos no sul do mapa, nas proximidades dos pontos P6 e P7.

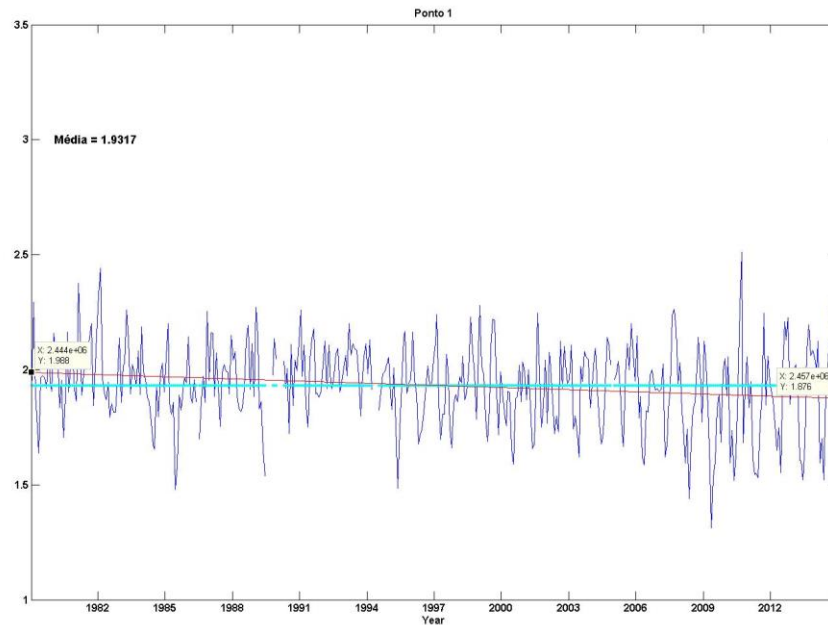
Ao analisarmos a série temporal de altura ao longo dos 36 anos de estudo para o Ponto 1 (FIGURA 25), podemos ver que houve uma tendência de decréscimo de 0,11 m (11 cm) do valor da altura para o ponto 1, aproximadamente 0,3 cm/ano.

Figura 24 - Mapa de coeficiente de regressão linear para a variável altura significativa da onda entre os anos 1979 e 2015. Os valores representam a variação da altura (em metros) para cada ponto do mapa.



Fonte: o autor.

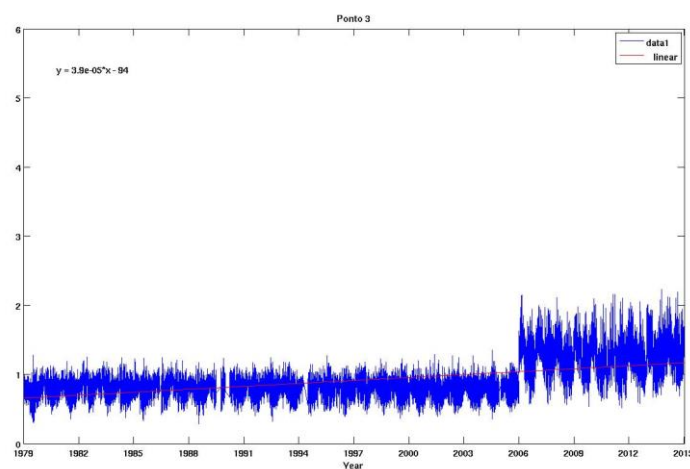
Figura 25 - Série temporal das médias de altura significativa da onda no ponto P1, entre os anos 1979-2015. A reta vermelha representa a linha de tendência de regressão linear; a azul, a média mensal para todos os anos.



Fonte: o autor.

A FIGURA 26 foi utilizada pra demonstrar a descontinuidade ns resultados do WW3 nos pontos mais próximos à costa (profundidades abaixo de 20m, aproximadamente), os quais foram, em virtude desses erros, desconsiderados do presente estudo. A série temporal realizada foi referente ao ponto P3. É possível ver variações significativas da média a partir de 2006.

Figura 26 - Série temporal das médias de altura significativa da onda no ponto P3, entre os anos 1979-2015.



Fonte: o autor

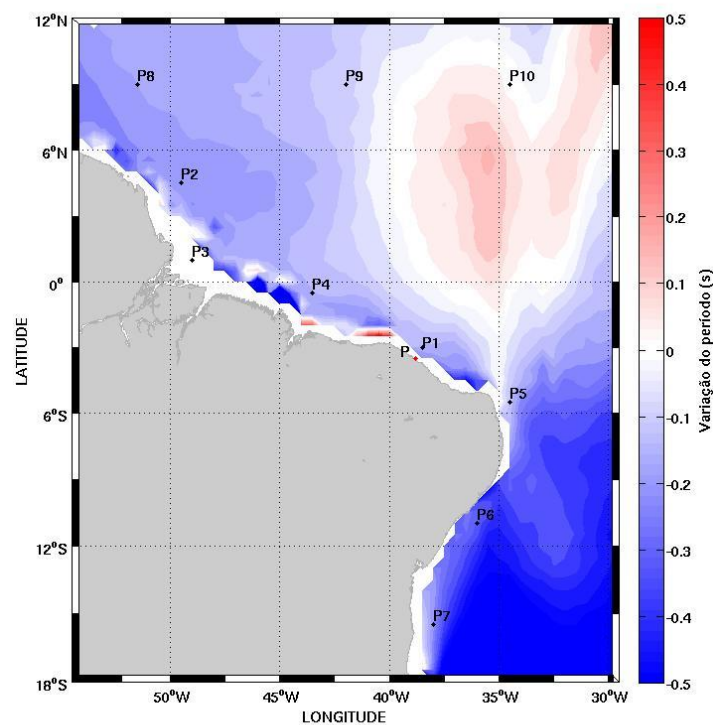
4.2.3.3 Período

Grande parte da área indicada apresenta valores negativos de tendência de variação de período de onda (FIGURA 27). Como é possível constatar, todos os pontos estudados tiveram um decréscimo no período entre 0,1 e 0,3 s, com exceção do P10, o qual não sofreu alteração.

A região sudeste do mapa foi a que registrou maiores valores de variação, com decréscimos de até 0,5 s. Na porção NE da área de estudo, houve uma variação positiva, de cerca de 0,2s no período das ondas.

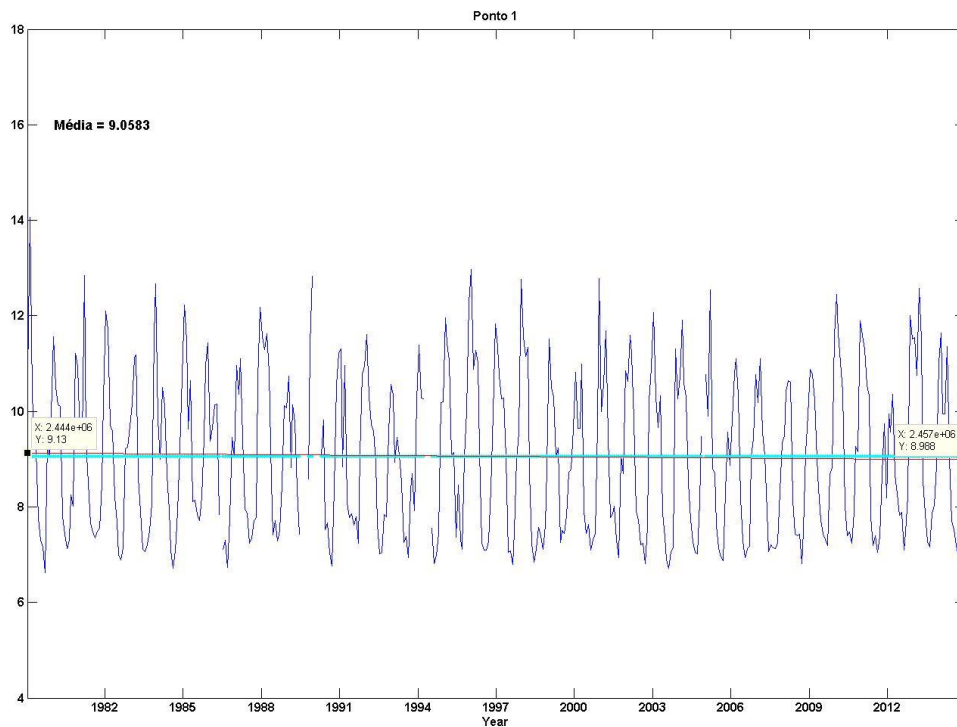
Quando plotada a série temporal (FIGURA 28) do período para o P1, percebe-se que a reta do coeficiente de regressão linear e da média mensal do período se sobrepõe, o que indica uma variação não expressiva do período das ondas ao final do período de análise.

Figura 27 - Mapa de coeficiente de regressão linear para a variável período da onda entre os anos 1979 e 2015. Os valores representam a variação da altura (em metros) para cada ponto do mapa.



Fonte: o autor.

Figura 28 - Mapa de coeficiente de regressão linear para a variável período da onda entre os anos 1979 e 2015. Os valores representam a variação da altura (em metros) para cada ponto do mapa.



Fonte: o autor.

4.2.3.4 Discussão

Podemos observar, por meio das séries temporais, que existe variabilidade temporal de longo período, mas também variações inter e intra-anuais das frequências de direção, altura e período das ondas. Isso se deve ao fato das variações por conta da sazonalidade e também possíveis flutuações interanuais de episódios oscilativos como o ENSO. Para este último caso, porém, essa variabilidade não é tão evidente, uma vez que as maiores alturas significativas não coincidiram em todos os anos com os eventos de El Niño, que em alguns estudos, como o realizado por Santana (2013), estão associados a aumentos nos valores desse parâmetro.

Izaguirre *et al.* (2013) observou as tendências de variação de eventos extremos para a América Central e do Sul. Como nos resultados do presente trabalho (FIGURA 22), encontraram tendências negativas nas áreas afetadas pelos ventos alísios do Hemisfério Norte, como o Norte do Brasil, Guiana Francesa e Suriname. Os resultados não se mostraram condizentes, contanto, com toda a área de estudo, já que houve uma tendência de aumento da

altura significativa para o litoral do Setor Leste do Brasil para o trabalho do autor mencionado.

A variabilidade a longo prazo da costa da América Latina e Caribe foi avaliada por Reguero, Méndez e Losada (2013), os quais utilizaram uma reanálise global de ondas, chamada de reanálise *Global Ocean Waves* (GOW), para a execução do estudo. Encontraram tendências de aumento na média anual das ondas para a costa brasileira, maiores na região sudeste. Não realizaram o estudo, porém, para regiões mais *offshore*, como no caso do presente estudo. Pelo fato do modelo WW3 não ter tido um bom desempenho em regiões costeiras, uma comparação mais aprofundada com o trabalho desses autores fica limitada.

Os resultados encontrados para a variação de longo prazo da altura não se mostraram em concordância com o trabalho de Sampaio (2014), o qual foi realizado para a mesma região do oceano Atlântico Tropical, porém a partir do modelo ERA-Interim. A autora encontrou valores positivos de variação para grande parte da área de estudo, com os maiores alcançando 0.18m (18 cm) entre aproximadamente as latitudes e longitudes de 0 e 6°N e 45 e 40°W, respectivamente. Como não foi possível, porém, à autora validar propriamente seus resultados para a região de interesse, por limitação de dados observacionais (mesma problemática que o atual trabalho), não podemos afirmar qual dos dois cenários melhor representa a realidade da variabilidade temporal de longo prazo para a altura significativa de ondas na região.

Comparando-se os mapas da FIGURA 21, os quais indicam as variações de longo prazo na direção para cada quadrante, com a FIGURA 4, a qual apresenta as frequências de ocorrência para cada intervalo de direção (quadrante), podemos observar que as regiões que apresentam maiores e menores tendências coincidem com as áreas com maiores frequências de ocorrência ondas com direções pertencentes àquele determinado quadrante. Para os três primeiros quadrantes, houve uma tendência de diminuição na frequência dessas ondas para essas áreas, com exceção da região da plataforma para ondas entre 60 e 90 ° (3° quadrante). Para ondas entre 90 e 120°, as áreas com maior frequência de ondas nessas direções estão apresentando aumento de até 5% ao longo dos 36 anos de estudo. Algumas regiões com baixa frequência, porém, também tiveram aumento. Em relação ao último quadrante, essa relação não está tão definida, tendo áreas com altas e baixas frequências apresentando variações a longo prazo. Usando o mesmo tipo de comparação para o período, ao analisarmos FIGURA 27, e a FIGURA 8, a qual mostra a frequência de ondas com períodos entre 4-9 s ou maiores que 10s, podemos observar que as regiões que apresentaram menores valores de variação de longo prazo possuem maior frequência de ondas do tipo *swell*. A variação do período, com

valores máximo de 0,5 s para os 36 anos (0,014s/ano), pode ser considerada expressiva, uma vez que representa até 5% da mudança para ondas de período de 5 s, por exemplo.

Por haver uma limitação de estudos quanto à variabilidade a longo prazo, especialmente quanto ao período e direções das ondas, não nos é possível fazer uma análise mais aprofundada sobre essas mudanças de longo prazo. Alguns autores, porém, associam variabilidades no clima de ondas ao aumento da ocorrência de eventos extremos (IZAGUIRRE *et al.*, 2013). Isso pode explicar em parte algumas das variações para a nossa área de interesse.

5 CONCLUSÃO

Com base na climatologia de 36 anos elaborada nesse estudo, as ondulações predominantes que se propagam na região de interesse estão relacionadas à direção dos ventos alísios e de eventos geradores de *swell*, como ciclones tropicais e extratropicais. Esses fatores são marcados por sazonalidades, influenciando em variações ao longo do ano nas características principais das ondas incidentes. Nossos resultados demonstraram que as ondulações predominantes para a área de estudo são do tipo *sea*, com direções entre E e SE para o setor Leste da costa e direções entre N e NE para o setor Norte, e alturas mais frequentes e, abrangendo maior área da região de interesse, entre 1,5 e 2,5 m. As maiores alturas significativas médias, entre 2,2 e 2,5 m, foram mais frequentemente localizadas na porção mais ao norte da área de estudo. Nos meses do ano em que a ZCIT se encontra mais ao norte, a predominância de ventos alísios de sudeste é maior, sendo geradas ondas predominantemente de E, ESE e SE, que chegam a alcançar porções do setor Norte do litoral. Nesses períodos, ondulações de SW a SE também estão associadas a ondulações geradas pela passagem de frentes frias em altas e médias latitudes no Hemisfério Sul. No verão e outono, os alísios de nordeste são dominantes, gerando ondas com maior ocorrência entre NW e NE. Ondulações nessas direções também são formadas com mais frequência nesses períodos em virtude da maior ocorrência de ciclones no Hemisfério Norte.

Ao compararmos os valores das saídas do modelo WW3, com os do ERA-Interim e os dados do ondógrafo do Porto do Pecém, observamos grandes diferenças nas frequências de direção, altura e período do campo de ondas analisado. Esse fato pode estar relacionado a possíveis limitações dos modelos, ou a diferenças em virtude da localização dos pontos mais próximos da grade dos mesmos em relação ao ondógrafo, ou a falta de dados suficientes *in situ* para uma própria validação.

O ERA apresentou menores diferenças quando comparados ao ondógrafo na medição da altura significativa das ondas, embora com valores de diferença ainda altos. O modelo WW3 apresentou melhor desempenho para um número maior de intervalos de direção. Ambos obtiveram resultados semelhantes quanto ao período. Devido a essa alternância de desempenho entre os dois modelos, não foi possível determinar qual melhor representa a realidade para a área de estudo. Faz-se necessário uma maior aquisição de dados *in situ*, especialmente quanto à escala temporal, ou deve-se buscar outros métodos, como a comparação com valores de altimetria, para uma validação eficaz do modelo para a área de interesse do presente trabalho.

Uma vez que os resultados do modelo WW3 não foram representativos para a região da costa, sugere-se que o mesmo não seja utilizado, sem os devidos refinamentos, para estudos e gestão costeira.

O estudo da variabilidade a longo prazo do regime de ondas foi possível por meio da análise de médias mensais e de suas tendências de variação. As maiores variações (positivas ou negativas) encontradas para a altura, período e frequências de direção ao longo dos 36 anos de estudo foram de 25 cm (0,69 cm/ano); 0,5 s (0,014s/ano) e 5% (0,13%/ano), respectivamente. Como ainda são poucos os estudos sobre o assunto, especialmente para a região de interesse, a comparação dos resultados obtidos com trabalhos previamente realizados demonstrou-se limitada, havendo, portanto, a necessidade de novos estudos para conclusões mais precisas das causas dessa variabilidade.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ARINAGA, R. A.; CHEUNG, K. F. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. **Renewable Energy**, v. 39, n. 1, p. 49–64, 2012.
- BRANCO, F. V. **Contribuições de swell gerado em tempestades distantes para o clima de ondas na costa brasileira**. 2005. 154 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Departamento de Ciências Atmosféricas, Int. de Astronomia, Geofísica e C. Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
- CANDELLA, R. N. **Estudo de Casos de Ondas no Atlântico Sul através de Modelagem Numérica**. 93 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Depto. de Engenharia Oceânica, COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 1997.
- 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.
- DEAN, Robert G.; DALRYMPLE, Robert A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. Singapore: New Jersey: c1991. xiii, 353 p.
- DIAS, P. E. **Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica**. 231 p, Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2013.
- FERREIRA, A. G.; MELO, N. G. D. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, p. 15–28, 2005.
- FISCH, C. I. **Caracterização do clima de ondas na costa do Ceará**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.
- HEMER, M. A.; CHURCH, J. A.; HUNTER, J. R. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 4, p. 475–491, 2010.
- DOMINGUEZ, J. M. L.; BITTENCOURT, A. C. DA S. P.; MARTIN, L. Controls on Quaternary coastal evolution of the east-northeastern coast of Brazil: roles of sea-level history, trade winds and climate. **Sedimentary Geology**, v. 80, n. 3-4, p. 213–232, 1992.
- INNOCENTINI, V. et al. A Agitação Marítima No Litoral Nordeste Do Brasil Associada Aos Distúrbios Africanos De Leste. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 367–374, 2005.
- IZAGUIRRE, C. et al. Extreme wave climate changes in Central-South America. **Climatic Change**, v. 119, n. 2, p. 277–290, 2013.
- LEBLOND, P. H. **Waves in the ocean**. Amsterdam: Elsevier, 1978. 602 p.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. 1, p. 53–70, 2010.

POND, S; PICKARD, G.L. **Introductory Dynamical Oceanography**. 2. ed. Oxford: New York, NY: Pergamon Press, 2003.

REGUERO, B. G.; MÉNDEZ, F. J.; LOSADA, I. J. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 70–84, 2013.

SAMPAIO, N. D. E. G. A. **Variabilidade Temporal Do Regime De Ondas Na Porção Sudoeste Do Oceano Atlântico Tropical**. Fortaleza: 2014.73 p.

UNIVERSITY, T. O. Waves. In. _____ **Waves, Tides and Shallow Water Processes**. Second edition. Oxford: Butterworth-Heinemann ,1999. p 11-49.

VAREJÃO SILVA, M. Meteorologia e Climatologia. Brasília: Ministério da Agricultura/INMET, 2000. 515p. Versão Digital 2, 2006, 463p. Disponível em: http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf

VIEIRA, L. A. A.; PITOMBEIRA, E. S.; SOUZA, R. O. Análise estatística do regime de ondas ao longo da região marítima do Porto do Pecém. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007. n. 85, p. 1–20

WANG, X. L.; ZWIERS, F. W.; SWAIL, V. R. North Atlantic Ocean Wave Climate Change Scenarios for the Twenty-First Century. **Journal of Climate**, v. 17, n. 12, p. 2368–2383, 2004.

WOOLF, D.; WOLF, J. Impacts of climate change on storms and waves. **MCCIP Science Review**, n. November, p. 20–26, 2013.