



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA
CURSO DE OCEANOGRAFIA

BRUNA LARISSA RABELO DOS REIS

**REGIME E VARIABILIDADE DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE NA
REGIÃO DO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL OCIDENTAL ADJACENTE
AO LITORAL MARANHENSE**

SÃO LUÍS

2021

BRUNA LARISSA RABELO DOS REIS

**REGIME E VARIABILIDADE DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE NA
REGIÃO DO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL OCIDENTAL ADJACENTE
AO LITORAL MARANHENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão para a obtenção
de Grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Prof^a Dr^a Cláudia Klose Parise.

SÃO LUÍS

2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Rabelo dos Reis, Bruna Larissa.

Regime e Variabilidade de Ondas Superficiais de Gravidade na região do Oceano Atlântico Equatorial Ocidental adjacente ao Litoral Maranhense / Bruna Larissa Rabelo dos Reis. - 2021.

56 p.

Orientador(a): Cláudia Klose Parise.

Monografia (Graduação) - Curso de Oceanografia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Maranhão, 2021.

1. Atlântico Equatorial Ocidental. 2. Clima de Ondas Oceânicas. 3. ERA5. 4. Maranhão. I. Klose Parise, Cláudia. II. Título.

BRUNA LARISSA RABELO DOS REIS

**REGIME E VARIABILIDADE DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE NA
REGIÃO DO OCEANO ATLÂNTICO EQUATORIAL OCIDENTAL ADJACENTE
AO LITORAL MARANHENSE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Oceanografia da
Universidade Federal do Maranhão para a obtenção
de Grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Cláudia Klose Parise.

Aprovado em _____ de _____ de _____.

Prof^ª. Dr^ª. Cláudia Klose Parise
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Orientadora

Prof^º. Dr^º. Denilson da Silva Bezerra
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Membro da banca

Prof^º. Dr^º. Leonardo Silva Soares
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Membro da banca

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço aos meus pais, Loides e Clayton, pelo suporte oferecido nesses 4 anos e 10 meses de graduação, sem vocês essa jornada seria bem mais difícil e complicada, obrigada por tudo! Também agradeço muito aos meus avós, Maria Cléa e Frederico, para os quais eu sempre tive um lugar especial onde eu me sinto acolhida em todos os momentos, apesar da pandemia da COVID-19 ter alterado nossas realidades e nos distanciando um pouco, nada se compara ao amor e carinho que vem de vocês.

Amo vocês, obrigada!

Agradeço imensamente ao meu companheiro, Wilson, que sempre esteve comigo em todos os momentos nesses 4 anos em que estamos juntos. Com você eu pude evoluir em muitos aspectos, tu me proporcionou momentos incríveis. Te amo!

Agradeço aos amigos que fiz na graduação, especialmente aos meus “rolezeiros” e a “galera dos lanches”, que tornaram essa etapa da minha vida mais leve do que realmente foi em muitos momentos, obrigada por tudo! Agradeço a todos aqueles que de certa forma se fizeram presentes na minha vida acadêmica durante todos esses anos, assim como os colegas que ingressaram comigo na turma de de 2016.2. E não poderia faltar também um agradecimento às amigas de escola que eu cultivo até hoje porque vocês são pessoas incríveis!

Agradeço à minha orientadora, Professora Cláudia, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho que é uma das coisas que mais me fascina na Oceanografia, não só por isso como por todo o aprendizado adquirido, obrigada!

Agradeço também ao Gustavo Correia pelos ensinamentos na parte prática deste trabalho, isso foi crucial para que eu conseguisse desenvolver esse estudo. Agradeço aos meus colegas do LaClima pela troca de conhecimentos que me ajudou muito no decorrer deste trabalho.

Agradeço aos colegas do D.A. (Gestão Sonar), da Atlética Netuno e da EJ Marisma, que foram instituições acadêmicas das quais eu fiz parte e que certamente contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Agradeço ao professor Leonardo Lima, pela oportunidade de estágio no LEOG onde eu tive contato com uma das áreas que também me fascina na Oceanografia, bem como pela atividade de monitoria na qual ele me orientou, e ao professor e Walter Muedas pela oportunidade de participação dos campos, atividades e confraternizações do AQUALAB onde eu fiz muitos amigos.

*“Quando a vida te decepciona, qual é a solução?
Continue a nadar! Continue a nadar! Continue a nadar,
nadar, nadar! Para achar a solução, nadar, nadar!”*

Dory, 2003.

RESUMO

Este trabalho buscou entender o clima de ondas superficiais de gravidade na região do Oceano Atlântico Equatorial Ocidental (OAEO) adjacente ao litoral maranhense. Para isso, foi feita a validação pontual da base de dados de reanálise ERA5 através da comparação com dados observacionais medidos *in situ* para os seguintes parâmetros de onda e vento: altura significativa de onda (H_s), período de pico (T_p), direção média de onda (D_m) e as componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}) do vento a 10 m (U_{10}). Posteriormente, foi aplicada a análise de correlação de Pearson (r) e a raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE) entre as séries. Com os dados validados foi calculada a climatologia mensal dos dados da reanálise oceânica de ondas (1979-2019) para H_s , T_p , D_m e U_{10} . Para determinar os modos principais de variabilidade das ondas e ventos atuantes na região aplicou-se a técnica de Funções Ortogonais Empíricas (FOEs) e o cálculo da correlação linear de Pearson (r) entre o Índice Oceânico do Niño e os parâmetros H_s e U_{10} para averiguar se há influência de eventos do El Niño - Oscilação Sul (ENOS) nesses modos. Os resultados para a validação mostram correlação forte para os parâmetros H_s , T_p , D_m e v_{10} , e correlação moderada para u_{10} . O RMSE encontrado para H_s , T_p , D_m , u_{10} e v_{10} foi de 0,12 m, 2,24 s, 12,46°, 2,28 m/s e 2,96 m/s, respectivamente. A análise da climatologia mensal dos vetores da D_m plotados sobre o campo de H_s e T_p mostrou que há um padrão de alteração anual (nordeste-leste-sudeste) na direção média das ondas. Em relação a U_{10} também foi possível visualizar uma mudança (nordeste-leste-sudeste) na direção e intensidade dos ventos. A análise euleriana mostrou que o ERA5 é capaz de representar os padrões e a sazonalidade de onda e vento na região de estudo, com correlações significativas e baixo erro em relação aos dados observacionais. Este estudo concluiu que entre Setembro e Novembro é a época com maior agitação marítima na região, com ondas do tipo *swell* vindas de nordeste, em resposta aos ventos alísios na mesma direção que convergem com os ventos de sudeste. Com base nos resultados obtidos neste estudo, o clima de ondas superficiais de gravidade no OAEO foi classificado como apresentando padrões de dipolos (para H_s e U_{10}) e tripolos (somente para H_s). A análise de correlação revelou que apenas os padrões de H_s são conduzidos por alterações nos padrões de circulação atmosférica causadas pela atuação de eventos de ENOS.

Palavras-chave: Clima de Ondas Oceânicas; ERA5; Atlântico Equatorial Ocidental; Maranhão.

ABSTRACT

This work aimed to understand the climate of surface waves of gravity in the Western Equatorial Atlantic Ocean (WEAO) region adjacent to the Maranhão coast. For this, the punctual validation of the ERA5 reanalysis database was performed by comparing observational data measured in situ for the following wave and wind parameters: significant wave height (H_s), peak period (T_p), mean wave direction (D_m) and zonal (u_{10}) and meridional (v_{10}) components of wind at 10 m (U_{10}). Subsequently, the application of Pearson linear correlation (r) and the root mean squared error (RMSE) was performed between the series. With the data validated, the monthly climatology of ocean wave reanalysis data (1979-2019) for H_s , T_p , D_m and U_{10} was calculated. To determine the main modes of variability of the waves and winds acting in the region, the method of Empirical Orthogonal Functions (EOFs) was applied together with the calculation of the Pearson linear correlation (r) between the Niño Ocean Index and the parameters H_s and U_{10} to investigate if there is an influence of El Niño - Southern Oscillation (ENSO) events in these modes. The results for validation show a strong correlation for the parameters H_s , T_p , D_m and v_{10} , and moderate for u_{10} . The RMSE found for H_s , T_p , D_m , u_{10} and v_{10} was 0.12 m, 2.24 s, 12.46°, 2.28 m/s and 2.96 m/s, respectively. The monthly climatology analysis of the D_m vectors plotted over the field of H_s and T_p showed that there is a pattern of annual change (northeast-east-southeast) in the mean wave direction. In relation to U_{10} it was also possible to visualize a change (northeast-east-southeast) in the direction and intensity of the winds. The Eulerian analysis showed that ERA5 is able to represent the wave and wind patterns and seasonality in the study region with significant correlations and low error in relation to observational data. This study concluded that between September and November is the season with the greatest maritime agitation in the region, with swell waves coming from the northeast, in response to winds in the same direction that converge with the winds from the southeast. Based on the results obtained in this study, the surface gravity wave climate in the WEAO was classified as showing patterns of dipoles (in H_s and U_{10}) and tripoles (only in H_s). The correlation analysis revealed that only H_s patterns are driven by changes in atmospheric circulation patterns caused by the actuation of ENSO events.

Keywords: Ocean Wave Climate; ERA5; Western Equatorial Atlantic; Maranhão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático dos principais aspectos envolvidos na zona de geração de ondas pelo vento	13
Figura 2 - Localização das bóias	16
Figura 3 - Séries temporais (Novembro de 2016 a Dezembro de 2017) de H_s medida pelo PNBOIA (linha preta) e H_s simulada pelo modelo ERA5 (linha vermelha): (a) sem filtro (b) com filtro passa baixa mensal	22
Figura 4 - Séries temporais (Novembro de 2016 a Dezembro de 2017) de T_p medido pelo PNBOIA (linha preta) e T_p simulado pelo modelo ERA5 (linha vermelha): (a) sem filtro (b) com filtro passa baixa mensal	23
Figura 5 - Séries temporais (Novembro de 2016 a Dezembro de 2017) da D_m medida pelo PNBOIA (linha preta) e D_m simulada pelo modelo ERA5 (linha vermelha): (a) sem filtro (b) com filtro passa baixa mensal	24
Figura 6 - Histograma Direcional da D_m : a) D_m simulada pelo ERA5 e b) D_m medida pelo PNBOIA	25
Figura 7 - Séries temporais (Novembro de 2017 a Dezembro de 2018) das componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}) do vento superficial a 10 m simuladas pelo modelo ERA5 e medidas pela bóia PIRATA: (a) e (c) sem filtro; (b) e (d) com filtro passa baixa mensal	27
Figura 8 - Diferenças entre as séries da ERA5-PNBOIA: (a) H_s , (b) T_p e (c) D_m	29
Figura 9 - Diferenças entre as séries da ERA5-PIRATA: (a) u_{10} e (b) v_{10}	30
Figura 10 - Dispersão entre os dados simulados (ERA5) e os dados medidos (PNBOIA e PIRATA) para: (a) H_s , (b) T_p , (c) D_m , (d) u_{10} e (e) v_{10}	32
Figura 11 - Climatologia mensal de H_s (m) (cores) e D_m ($^\circ$) (vetores) para o domínio do OAEO adjacente à PCMA	35
Figura 12 - Climatologia mensal de T_p (s) (cores) e D_m ($^\circ$) (vetores) para o domínio do OAEO adjacente à PCMA	36

Figura 13 - Climatologia mensal da magnitude (m/s) (cores) e direção (°) (vetores) do vento a 10 m para o domínio do OAEO adjacente à PCMA	37
Figura 14 - Diagrama de distribuição da Variância e Variância Cumulativa: a) e b) H_s ; c) e d) U_{10}	38
Figura 15 - Modos principais de variabilidade de H_s para o período de 1979 a 2019: a) FOE ₁ ; b) FOE ₂ ; c)FOE ₃ ; d) FOE ₄	41
Figura 16 - Coeficientes de expansão de H_s para o período de 1979 a 2019 com filtro passa baixa mensal e anual: a) FOE ₁ ; b) FOE ₂ ; c)FOE ₃ ; d) FOE ₄	42
Figura 17 - Modos principais de variabilidade de U_{10} para o período de 1979 a 2019: a) FOE ₁ ; b) FOE ₂ ; c)FOE ₃ ; d) FOE ₄	44
Figura 18 - Coeficientes de expansão de U_{10} para o período de 1979 a 2019 com filtro passa baixa mensal e anual: a) FOE ₁ ; b) FOE ₂ ; c)FOE ₃ ; d) FOE ₄	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da intensidade da correlação de Pearson entre duas variáveis, previamente avaliadas pelo Teste t-Student. Modificado de Sasaki (2014)	19
Tabela 2 - Coeficientes de correlação (r) entre ERA5 e PNBOIA (H_s , T_p e D_m) e ERA5 e PIRATA (u_{10} e v_{10}) durante os respectivos períodos de medições das boias	31
Tabela 3 - RSME entre ERA5 e PNBOIA (H_s , T_p e D_m) e ERA5 e PIRATA (u_{10} e v_{10}) durante os respectivos períodos de medições das boias	33
Tabela 4 - Fração da variância explicada (em %) pelas quatro primeiras FOEs das variáveis H_s e U_{10}	38

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACP	Análise de Componentes Principais
CDO	<i>Climate Data Operators</i>
D_m	Direção Média de Onda
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El Niño - Oscilação Sul
ERSST	<i>Extended Reconstructed Sea Surface Temperature</i>
FOE	Função Ortogonal Empírica
H_s	Altura Significativa de Onda
ION	Índice Oceânico do Niño
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OAEO	Oceano Atlântico Equatorial Ocidental
OAT	Oceano Atlântico Tropical
PCMA	Plataforma Continental do Maranhão
PNBOIA	Programa Nacional de Bóias
PIRATA	<i>Prediction and Researched Moored Array in the Atlantic</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
T_p	Período de Pico
TSM	Temperatura Superficial do Mar
U_{10}	Vento Superficial a 10 m
u_{10}	Componente Zonal do Vento Superficial a 10 m
v_{10}	Componente Meridional do Vento Superficial a 10 m
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 METODOLOGIA	15
3.1 DADOS CLIMÁTICOS	15
3.1.1 Dados de Reanálise de Ondas e Vento	15
3.1.2 Dados Observacionais	16
3.1.3 Índice Oceânico do Niño	18
3.2 MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO DA REANÁLISE ERA5	18
3.3 TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS	20
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	21
4.1 VALIDAÇÃO DOS DADOS DE REANÁLISE DE ONDA E VENTO	21
4.3 CLIMA E VARIABILIDADE DAS ONDAS ADJACENTES AO LITORAL MARANHENSE	33
4.4 PADRÕES DE VARIABILIDADE DAS ONDAS ADJACENTES AO LITORAL MARANHENSE	38
4.4 INFLUÊNCIA DO EL NIÑO NO REGIME DE ONDAS ADJACENTES AO LITORAL MARANHENSE	46
5 CONCLUSÕES	47
6 TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

As ondas oceânicas superficiais de gravidade geradas pelo vento são importantes agentes controladores da dinâmica dos ambientes marinhos. Os principais parâmetros que as caracterizam são a altura, o período e a direção de propagação, as quais variam em função das características do vento, tais como intensidade, duração, pista de atuação e distância da zona de geração (MASSEL, 2017).

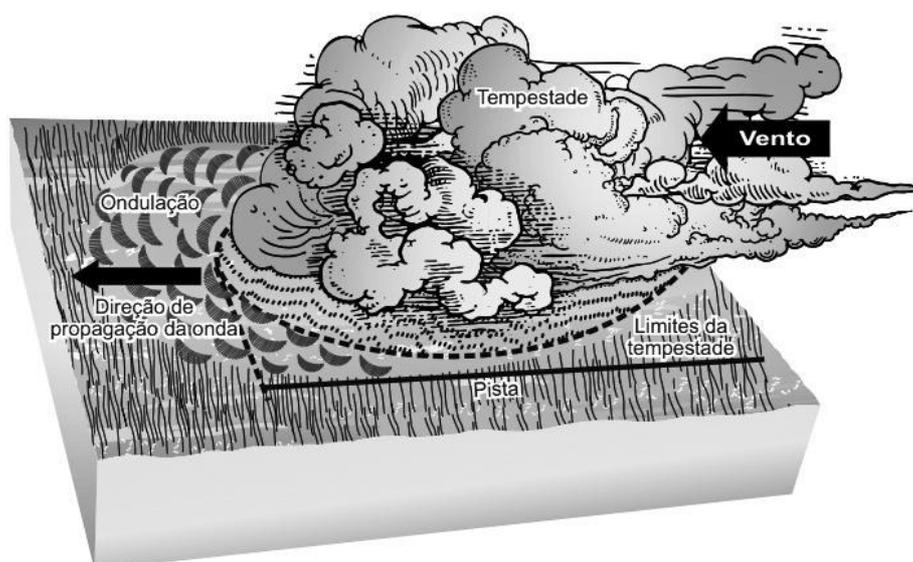
Tanto o clima de ondas de gravidade em mar aberto quanto o estado de agitação marítima junto à costa são de fundamental importância para o entendimento da morfodinâmica costeira, uma vez que a mesma resulta das interações com os processos costeiros de refração, difração, dissipação, reflexão e convergência e/ou divergência do raio de onda (GRIGGS e TRENHAILE, 1994). Através de estudos que busquem entender a dinâmica da propagação e agitação de ondas marítimas nas zonas costeiras, o estudo do clima de ondas pode subsidiar a geração de políticas públicas necessárias para o desenvolvimento de obras costeiras, operações navais, atividades de turismo e lazer, além de projetos que visem a preservação dos ecossistemas presentes, sendo assim fundamental para o gerenciamento costeiro.

As ondas oceânicas de gravidade são ondas mecânicas que são geradas a partir da transferência de momentum linear do ar para a superfície do mar através da tensão de cisalhamento do vento na zona de atuação do vento (*fetch*). A gravidade e capilaridade atuam como forças restauradoras do nível do mar e quando uma perturbação em superfície é maior que o poder de restauração dessas forças, a oscilação atinge amplitudes maiores, passando a ser chamada de onda de gravidade (PEDLOSKY, 2013).

As ondas podem ser classificadas como vagas (*sea*) ou ondulações (*swell*). As vagas são ondas que ainda estão na zona de geração, sendo capazes de receber energia do vento. As ondulações são ondas que já se propagaram para fora da zona de geração, não sendo capazes de receber essa energia. Na zona de *fetch* a tensão de cisalhamento do vento gera ondas de diferentes períodos e frequências, com cristas de onda curtas e pouco definidas. A medida em que as ondas saem da zona de *fetch* e se movem para a zona de dispersão onde agrupam-se com outras ondas devido a interações onda-onda construtivas, destrutivas e mistas, assumindo a mesma direção de propagação, com cristas relativamente menores e mais definidas, e períodos maiores (Figura 1). As ondas passam então a propagar-se de águas profundas para águas rasas, viajando com velocidade de grupo e assumindo características de ondas do tipo *swell* (FERNANDES *et al.*, 2015).

O processo de dispersão das ondas ocorre devido a diferenças de velocidade de grupo das ondas, ou seja, embora estejam em grupo algumas ondas possuem maior comprimento e menor frequência e passando assim a propagar-se na frente do corpo principal das ondas e as ondas menores (de maior frequência) se mantêm atrás destas (SORENSEN, 1993). A medida que as ondas se dispersam para águas rasas ocorrem diversas transformações ocasionadas pela interação da onda com as feições topográficas do leito marinho e com geometria da linha de costa, causando a diminuição da velocidade e mudanças na direção das ondas.

Figura 1 - Desenho esquemático dos principais aspectos envolvidos na zona de geração de ondas pelo vento. Modificado de Komar (1997).



Com o crescente aumento da demanda por obras de engenharia na interface continente-oceano e no ambiente oceânico, tais como a construção de estruturas portuárias, plataformas de petróleo e estruturas de contenção de processos de erosão costeira, cresceu a necessidade de uma maior compreensão do clima de ondas oceânicas e de suas forças atuantes nas zonas costeiras do mundo todo (BROMIRSKI e CAYAN, 2015), assim como no litoral maranhense.

Sabe-se que alguns fenômenos atuam na interface oceano-atmosfera do Oceano Atlântico Tropical (OAT), com periodicidade nas escalas intrasazonal, sazonal, interanual e decenal, influenciando a formação e propagação de ondas de gravidade superficiais e de suas forças. Os principais sistemas atuantes no OAT são a Zona de Convergência Intertropical

(ZCIT), o Sistema de Ventos Alísios e o fenômeno climático acoplado El Niño – Oscilação Sul (ENOS) (UVO *et al.*, 1998; TESSLER e GOYA, 2011; SAMPAIO, 2014; AQUINO, 2016).

Sob o atual cenário climático de aquecimento global, tem-se observado maior atuação de ciclones tropicais e extratropicais ao redor do globo, os quais são responsáveis pela formação de ondas de grande amplitude na superfície dos oceanos, além de alterarem a magnitude e direção dos ventos em superfície (FERNANDES *et al.* 2015; MARQUEZ, 2017). A temporada de furacões na Bacia do Atlântico Norte (entre o Oceano Atlântico Norte, o Mar do Caribe e o Golfo do México) normalmente ocorre entre Junho e Novembro, como o pico ocorrendo de meados de Agosto ao final de Outubro (trimestre ASO). No entanto, furacões mortais podem ocorrer a qualquer momento na temporada de furacões (NHC, 2015).

Análises e modelos estatísticos e matemáticos têm permitido estudos mais aprofundados dos padrões de comportamento e periodicidade de determinado parâmetro, analisados a partir de séries temporais. As análises estatísticas de Semedo *et al.* (2011) mostraram através de um estudo feito com base na reanálise de onda do ERA-40 que o oceano global é fortemente dominado pelas ondas *swell*. Correia (2019), a partir da análise da base de dados do Wave Watch III (1985 a 2015), concluiu que a variabilidade no campo de ondas oceânicas superficiais de gravidade e suas forçantes na região OAEO adjacente à Plataforma Continental do Maranhão (PCMA) é influenciada principalmente por alterações nos padrões de circulação atmosférica ligadas aos Ciclones Tropicais do Atlântico Norte e a fenômenos de interação oceano-atmosfera de mais alta frequência (Oscilação Madden-Julian), frequência interanual (ENOS) e decenal (Dipolo do Atlântico). O autor também classifica o clima de ondas na região em cinco padrões principais: Padrão de Hemisfério Sul, Padrão de Hemisfério Norte, Padrão de Dipolo Meridional, Padrão de Tripolo e Padrão de Onda 2.

A existência de dados observacionais de ondas para o domínio do OAEO adjacente à PCMA é bastante escassa, dado os elevados custos envolvidos na aquisição e manutenção de equipamentos de medição. Dessa forma, faz-se necessário o uso de dados de reanálise para determinar o clima de ondas oceânicas superficiais de gravidade e de suas forçantes, bem como seus modos principais de variabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo sobre o clima de ondas superficiais de gravidade na região do OAEO adjacente à PCMA de modo a determinar os principais sistemas atuantes sobre a formação e propagação das ondas de gravidade superficiais e de suas forçantes na área de estudo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar o clima de ondas oceânicas de gravidade na região do OAEO adjacente à PCMA representado pela reanálise ERA5 a partir da comparação com dados coletados *in situ*;
- Analisar a climatologia mensal (Janeiro a Dezembro) do estado de agitação marítima na região do OAEO adjacente à PCMA para os últimos 40 anos (1979 a 2019);
- Determinar os modos principais de variabilidade do clima de ondas superficiais de gravidade no OAEO para a altura significativa de onda e vento superficial a 10 m;
- Averiguar a influência de eventos de ENOS sobre a variabilidade da altura significativa de onda e do vento em superfície na região do OAEO.

3. METODOLOGIA

3.1 DADOS CLIMÁTICOS

3.1.1 Dados de Reanálise de Ondas e Vento

Reanálise é um produto de modelos numéricos baseado na assimilação de dados de diversas fontes, como radiossondas, navios, satélites, aeronaves, estações meteorológicas e outras, sendo uma ferramenta que auxilia na compreensão dos sistemas atmosféricos e oceânicos (OLIVEIRA, 2017). As análises deste estudo foram aplicadas à base de dados de reanálise ERA5 desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), disponível em <https://apps.ecmwf.int/data-catalogues/era5/?class=ea>. O ERA5

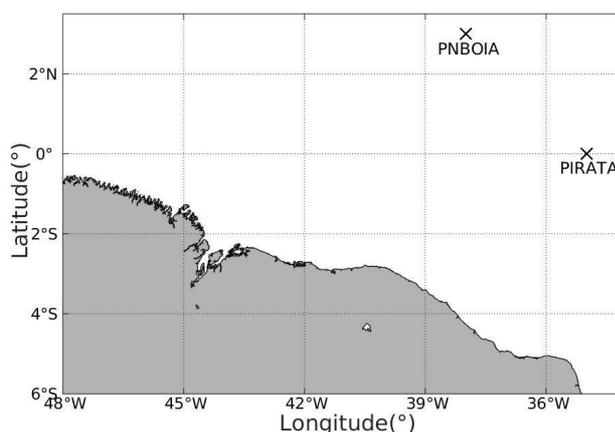
representa a quinta geração de reanálises atmosféricas do clima global desenvolvidas pelo ECMWF, a mais atual até o momento. A reanálise combina informações de observações meteorológicas passadas e presentes com modelos modernos de previsão baseados em técnicas de assimilação de dados desenvolvidas para previsões numéricas do tempo. Os dados de onda utilizados neste estudo possuem resolução espacial de $0,5^\circ$ em latitude e $0,5^\circ$ em longitude, e os dados de vento resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. Ambos os dados possuem resolução temporal de 1h e são atualizados diariamente, com as atualizações médias mensais disponíveis cerca de 5 dias após o final do mês.

Da ERA5 foram obtidas os seguintes parâmetros de ondas oceânicas e vento: altura significativa de onda (H_s), período de pico (T_p), direção média de onda (D_m) e as componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}) do vento superficial a 10 m (U_{10}) para o domínio do OAEO adjacente à PCMA, entre as latitudes de 3°N a 6°S e as longitudes de 48°W a 36°W , para o período de Janeiro de 1979 a Dezembro de 2019 (40 anos completos).

3.1.2 Dados Observacionais

Para fins de validação dos dados da reanálise da ERA5 (ECMWF, Hersbach *et al.*, 2020), foi feita uma análise pontual de comparação entre a série de dados da ERA5 e os dados observacionais medidos *in situ* pelas bóias meteoceanográficas do Programa Nacional de Bóias (PNBOIA) e do Projeto *Prediction and Researched Moored Array in the Atlantic* (PIRATA). Os dados obtidos pela bóia do PNBOIA foram utilizados para validar os dados de onda, enquanto que os dados obtidos pela bóia do PIRATA foram utilizados para fins de comparação com os dados de vento em superfície. As bóias estão situadas nas coordenadas de 3°N e 38°W e 0°N e 35°W , respectivamente (Figura 2).

Figura 2 - Localização das bóias do PNBOIA e do PIRATA utilizadas neste estudo.



Da base de dados da ERA5 obteve-se as séries temporais dos seguintes parâmetros de onda: H_s , T_p , D_m , u_{10} e v_{10} , nas mesmas coordenadas de localização das bóias, que foram comparados temporalmente aos dados medidos por elas. Para a validação dos dados de onda da ERA5, foram utilizadas séries temporais do PNBOIA referentes a H_s , T_p e D_m , que compreendem o período de Novembro de 2016 a Dezembro de 2017, enquanto que para a validação dos dados de vento (u_{10} e v_{10}), foram utilizadas séries temporais do PIRATA compreendidas entre Novembro de 2017 e Dezembro de 2018. Ambos os períodos utilizados são os únicos disponíveis dos dados das bóias. Todas as bases de dados foram utilizadas na frequência horária.

O PNBOIA (disponível em: <http://www.goosbrasil.org/pnboia/dados/>) tem como objetivo fornecer, em tempo quase-real, dados meteorológicos e oceanográficos obtidos nas áreas oceânicas de interesse do Brasil (BRASIL, 2021a). O programa conta com uma rede de bóias de deriva e bóias fundeadas que estão instaladas e estrategicamente distribuídas pela costa do Brasil, sendo rastreadas por satélite (DALANHESE, 2017). As bóias contam com sensores para análise de pressão atmosférica, vento, umidade relativa do ar, temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, radiação solar, temperatura da superfície do mar, correntes oceânicas e ondas oceânicas. A bóia selecionada para este estudo se classifica como bóia de plataforma, por se encontrar a 200 m de profundidade sobre a plataforma, permeando o limite da plataforma continental (BRASIL, 2021b).

O projeto PIRATA (disponível em: <https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdell/>) é um programa de cooperação multinacional entre o Brasil, França e Estados Unidos que conta com uma rede de observação *in situ* composta por bóias fundeadas no oceano Atlântico Tropical. Estes três países dividem as tarefas de implementação e manutenção da rede que tem como objetivo monitorar uma série de variáveis envolvidas nos processos de interação oceano-atmosfera no OAT. Os dados disponíveis incluem vento em superfície, temperatura em superfície, condutividade em superfície (salinidade), temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação de ondas curtas, precipitação, temperatura em subsuperfície (10 profundidades até 500 m), condutividade em subsuperfície (3 profundidades até 500 m), e pressão a 300 e 500 m (BRASIL, 2021c).

Para uma análise visual do ângulo de deslocamento da onda foi calculada a rosa das ondas (*Wave Rose*) para os dados da ERA5 e do PNBOIA individualmente. Para plotar o gráfico foi utilizada a função *Wave Rose* do MATLAB® (licença acadêmica da UFMA: 40981746). Essa função cria um histograma de ângulos e valores agrupados de acordo com a frequência na forma de um gráfico polar.

3.1.3 Índice Oceânico do Niño

O Índice Oceânico do Niño (ION) é a principal medida da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) para monitoramento do El Niño e La Niña, que compõem as fases positiva e negativa, respectivamente, do ENOS. O ION é constituído de uma série temporal de anomalias trimestrais médias da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) no Pacífico Tropical Centro-Leste, elaborada a partir da base de dados (ERSST5) do *International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (ICOADS). A NOAA considera que as condições de El Niño estão presentes quando o ION é $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou superior, indicando que o Oceano Pacífico Tropical Centro-Leste está significativamente mais quente do que o normal. Já as condições para La Niña ocorrem quando o Índice de Niño Oceânico é $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou inferior, indicando que a região está mais fria do que o normal. O ION é constantemente atualizado pela NOAA e encontra-se disponível em https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Para este estudo, o ION foi obtido para o período de Janeiro de 1979 a Dezembro de 2019 (40 anos) para a região do Niño 3.4 (latitudes de 5°N a 5°S e longitudes de 170°O a 120°O).

3.2 MÉTRICAS DE VALIDAÇÃO DA REANÁLISE ERA5

Segundo Matos (2013), a aplicação de parâmetros estatísticos como ferramenta de validação permite de forma quantitativa, avaliar se há concordância entre os valores medidos e os valores estimados numericamente. Sendo assim, os parâmetros estatísticos usados como métrica de validação nesse estudo incluem a correlação linear de Pearson (r) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (em inglês, *Root Mean Square Error – RMSE*).

A fim de buscar correlações entre os dados da ERA5 e os dados medidos *in situ* (PNBOIA e PIRATA) foi calculada a correlação linear de Pearson (r) entre as séries temporais de H_s , T_p , D_m , u_{10} e v_{10} , conforme equação 1. Para determinar a intensidade das correlações obtidas entre as séries analisadas, foi utilizada a classificação descrita por Sasaki (2014) (Tabela 1).

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

Tabela 1 - Classificação da intensidade da correlação de Pearson entre duas variáveis, previamente avaliadas pelo Teste *t-Student*. Modificado de Sasaki (2014).

Valor (r)	Intensidade da Correlação
$ r < 0,3$	Fraca
$0,3 < r < 0,5$	Moderada
$0,5 < r < 0,7$	Moderada para Forte
$ r > 0,7$	Forte

No intuito de saber se a correlação é significativa foi calculada a sua significância dada pelo valor p . Para isso foi utilizado o Teste *t-Student* de hipóteses onde foi estabelecida a hipótese nula (H_0) de que há correlação significativa entre as séries temporais e a hipótese alternativa (H_1) em que não há correlação significativa (FERREIRA e PATINO, 2015). Neste estudo, o valor de corte utilizado para aceitar ou rejeitar a hipótese nula foi de 0,05, de forma que, se $p > 0,05$ aceita-se a hipótese nula e conclui-se que não existe uma correlação e se $p < 0,05$ aceita-se a hipótese alternativa e conclui-se que existe uma correlação.

O RMSE é uma métrica frequentemente usada para calcular diferenças entre os valores simulados por um modelo e os valores observados. Neste estudo, o RMSE foi calculado entre a ERA5 e os valores medidos pelas bóias, sendo obtido pela raiz quadrada do somatório das diferenças entre as séries de dados, conforme equação 2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n \left(X_{ERA5,i} - X_{bóia,i} \right)^2}{n}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

$X_{ERA5,i}$ é a série temporal da variável simulada pelo modelo;

$X_{bóia,i}$ é a série temporal da variável medida;

n é o tamanho amostral;

3.3 TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O programa *Climate Data Operators* (CDO) foi usado para o tratamento inicial dos dados em todas as etapas deste trabalho. O CDO é constituído de um conjunto de operadores para processamento de dados fornecidos por modelos climáticos. Os operadores incluem funções básicas e avançadas de estatística e aritmética, ferramentas de seleção e recorte de dados, de amostragem secundária e de interpolação espacial (MODALI, 2008).

No CDO foi feita a concatenação dos dados, a climatologia mensal, a seleção das séries temporais dessas variáveis nos pontos de validação da reanálise ERA5 e o cálculo de anomalias trimestrais. Após o tratamento inicial dos dados no CDO, as análises estatísticas foram realizadas no software MATLAB® (licença acadêmica da UFMA: 40981746).

Uma análise climatológica requer conjuntos de dados com longas séries temporais, por isso, para estudos de longo termo do clima de ondas de uma região faz-se necessário o uso dados de modelos e reanálises, já que os dados medidos disponíveis ainda são limitados por possuírem séries temporais curtas e por se restringirem a determinados locais. A análise da climatologia mensal das ondas oceânicas de gravidade no OAEO e de suas forçantes foi aplicada à base de dados de H_s , T_p , D_m e U_{10} da reanálise ERA5 para o domínio de estudo.

O método de Funções Ortogonais Empíricas (FOE) foi utilizado neste estudo para descrever a variabilidade espacial e temporal dos parâmetros de onda e vento na região do OAEO, permitindo a análise dos seus modos dominantes de variabilidade para o período estudado. O cálculo das FOEs é feito por meio da decomposição das variações espaciais e temporais de um campo geofísico em combinação com os padrões espaciais ortogonais e componentes principais correspondentes de forma linear (LORENZ, 1956). Neste estudo as FOEs foram utilizadas para encontrar os padrões espaciais de variabilidade (ou autovetores) de H_s e U_{10} no domínio de estudo, suas respectivas variações temporais, e dar uma medida de importância (ou autovalores) para cada padrão.

A Análise de Componentes Principais (ACP), como é o caso das FOEs, visa encontrar um novo conjunto de eixos ortogonais que passam pelas maiores variâncias de um conjunto de dados. A ACP estabelece, a partir de uma matriz de variâncias-covariância, um conjunto de eixos perpendiculares onde entre n variáveis, serão calculados n autovetores de comprimento $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ decrescente em função da sua contribuição à variância total dos dados. A variabilidade temporal das FOEs é dada pelo coeficiente de expansão de cada componente. Para estes foram aplicados dois filtros de médias móveis (janelas mensal e anual), para “remover” a alta frequência dos dados e facilitar a identificação da sazonalidade das variáveis

e a periodicidade dos agentes físicos atuantes na determinação dos modos de variabilidade climática. Segundo Parise (2010), quando se pretende obter interpretações físicas dos padrões é desejável rotacioná-los, ou seja, aplicar uma transformação linear no primeiro conjunto de autovetores a fim de encontrar um segundo conjunto de novos vetores chamados de componentes principais rotacionados. Dessa forma, foi utilizada a função *varimax.m* para rotacionar os campos de autovetores.

A fim de se averiguar a influência de eventos de ENOS sobre os padrões de variabilidade sazonal e interanual obtidos foi calculada a correlação linear de Pearson (r) entre as anomalias trimestrais de H_s e U_{10} e o ION. Além do cálculo da correlação também foi calculada a sua significância dada por p com o mesmo teste de hipóteses descrito na seção 3.3.1.

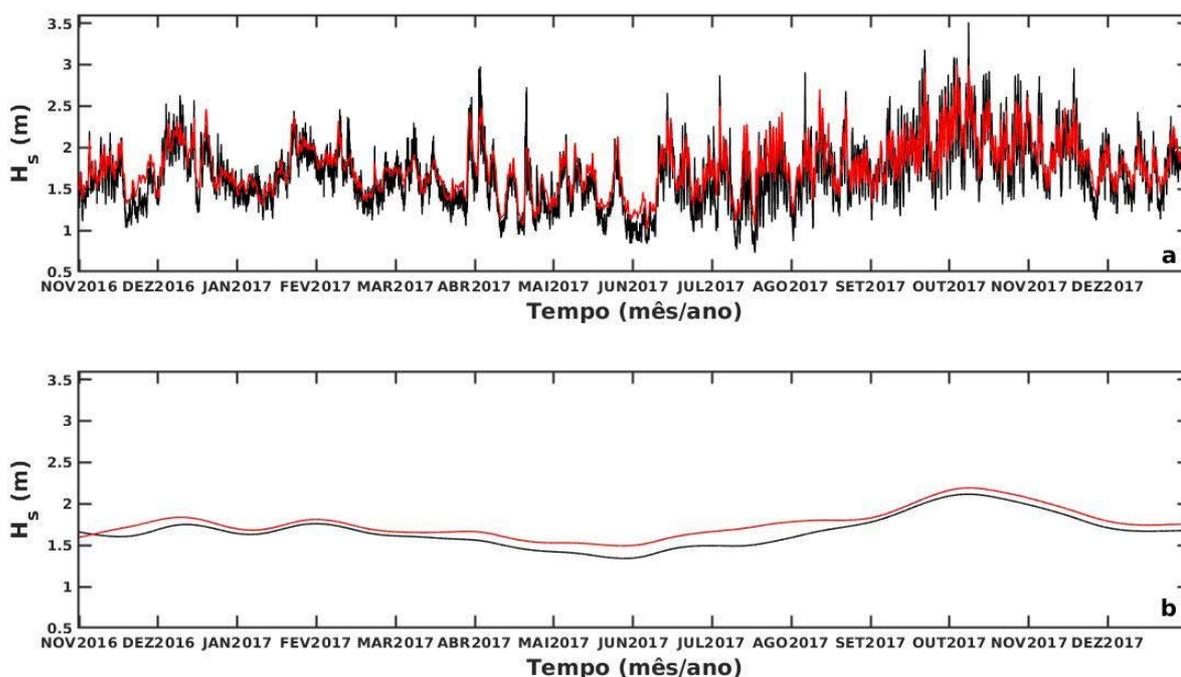
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 VALIDAÇÃO DOS DADOS DE REANÁLISE DE ONDA E VENTO

Altura Significativa de Onda

Os resultados mostraram que a série temporal de H_s da ERA5 (Figura 3a, linha vermelha) apresentou um padrão de variação temporal bastante semelhante aquele do PNBOIA (Figura 3a, linha preta), captando a sazonalidade das ondas e também a maior amplitude das ondas na segunda metade do ano (Junho a Dezembro), conforme mostram os dados *in situ*. Houve períodos, entretanto, em que se observa a superestimação de H_s por parte da reanálise, como pode ser observado entre Maio e Julho de 2017 (Figura 3a), indicando que a reanálise da ERA5 falhou em encontrar um ajuste adequado para H_s nesse período específico. A partir da filtragem mensal dos dados foi possível observar melhor essa sazonalidade e que de fato as séries encontram-se bem ajustadas (Figura 3b). Nota-se também que os valores de H_s simulados pelo ERA5 apresentam, em geral, menor amplitude das ondas em comparação aos dados medições do PNBOIA, o que é esperado por se tratar de uma reanálise, elaborada com base em simulações numéricas onde é feita a assimilação de dados.

Figura 3 - Séries temporais (Novembro de 2016 a Dezembro de 2017) de H_s medida pelo PNBOIA (linha preta) e H_s simulada pela reanálise ERA5 (linha vermelha): **(a)** sem filtro **(b)** com filtro passa baixa mensal.



Período de Pico

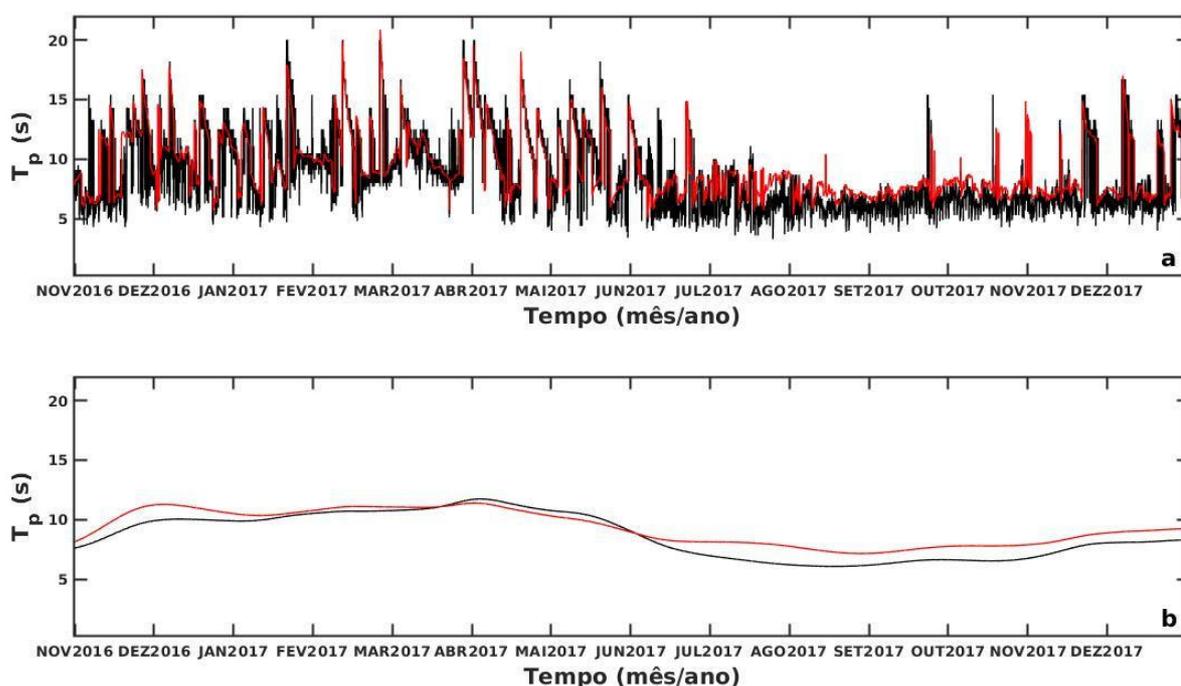
Em relação ao parâmetro de onda T_p , o ERA5 (Figura 4a, linha vermelha) também apresentou um comportamento bastante semelhante às medições do PNBOIA (Figura 4a, linha preta). Percebe-se uma similaridade de forma geral, não sendo identificada nenhuma defasagem mas sim uma superestimação dos dados em alguns momentos por parte da ERA5.

De Fevereiro a Junho e em Outubro de 2017, há a ocorrência de vários picos positivos, indicando que o modelo superestimou os valores de T_p , que foram menores naqueles períodos segundo as medições feitas pelo PNBOIA. Também houveram algumas subestimações em alguns períodos ao longo da série, como em Dezembro de 2016 e Abril de 2017. O intervalo de variação dos dados foi praticamente o mesmo e, com exceção dos momentos supracitados, houve um bom ajuste entre as séries, ilustrando que a reanálise foi capaz de simular o padrão de distribuição desta variável. Isso é confirmado pela filtragem mensal aplicada sobre as séries, que ilustrou a sazonalidade dos dados, mostrando que de fato as séries encontram-se bem ajustadas (Figura 4b).

Os resultados mostraram ainda que, de Novembro a Maio, o T_p apresentou sua maior amplitude, quando o estado do mar oscila em unimodal (quando imperam ondas do tipo *sea*) e bimodal (quando predominam ondas do tipo *swell + sea*). Com a filtragem mensal foi possível visualizar a intensa sazonalidade do dado, que entre os meses de Janeiro a Maio apresenta uma predominância de ondas tipo *swell*, enquanto que de Junho a Dezembro a predominância é de ondas tipo *sea* (Figura 4b).

Em geral, a reanálise de ondas ERA5 foi capaz de simular o padrão de distribuição de T_p na região do OAEO adjacente ao litoral maranhense, conforme ilustra o bom ajuste encontrado entre as curvas (Figura 4).

Figura 4 - Séries temporais (Novembro de 2016 a Dezembro de 2017) de T_p medido pelo PNBOIA (linha preta) e T_p simulado pela reanálise ERA5 (linha vermelha): **(a)** sem filtro **(b)** com filtro passa baixa mensal.



Direção Média de Onda

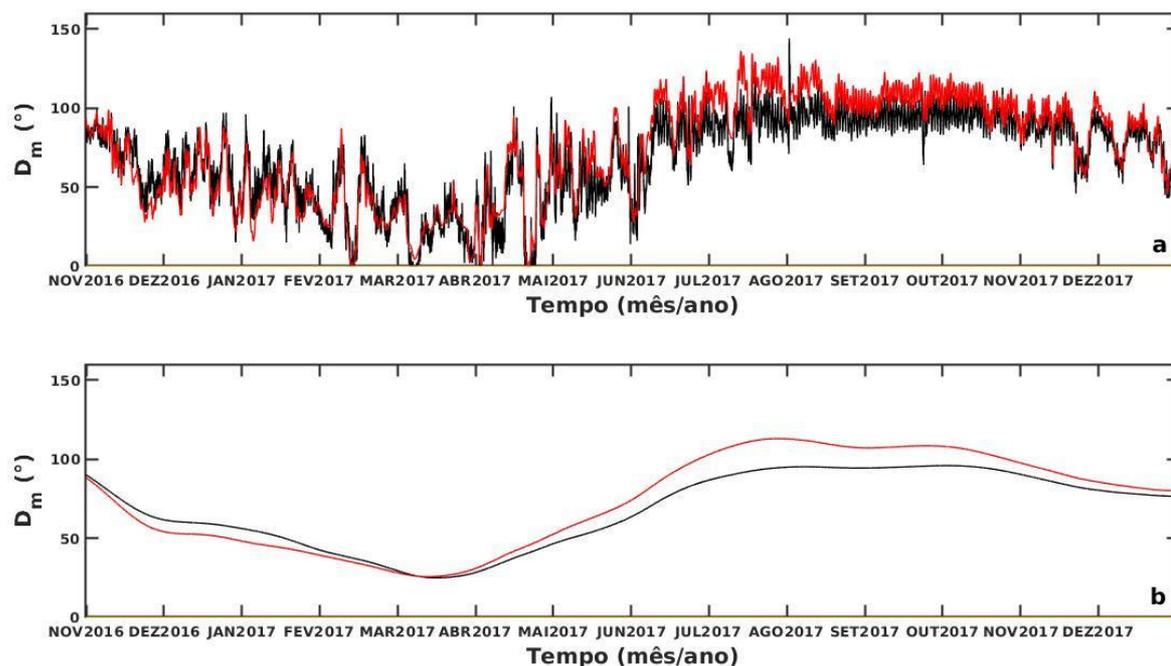
Em relação a D_m , tanto a ERA5 quanto o PNBOIA consideram que 0° significa ondas vindas de norte e 90° ondas vindas de leste. A ERA5 (Figura 5a, linha vermelha) apresentou um comportamento semelhante às medições do PNBOIA (Figura 5a, linha preta), porém de Junho a Novembro de 2017 ocorreu uma ligeira superestimação dos valores de D_m pelo ERA5

em relação aos valores coletados pela bóia. De modo geral, as séries estão bem ajustadas levando-se em consideração que o padrão sazonal foi obtido para série dos dados simulados pelo modelo.

A aplicação de um filtro mensal mostrou que a série da ERA5 não se diferenciou tanto do padrão obtido para os dados observacionais (Figura 5b). Nota-se ainda que de Novembro de 2016 a Maio de 2017 as ondas que se propagam na região de estudo são provenientes de leste/sudeste ($D_m = 100^\circ$), oscilando entre ondas de nordeste ($D_m = 50$ e 45°) e então de norte ($D_m = 0^\circ$). Isso reflete a influência da chegada das tempestades tropicais advindas do Oceano Atlântico Norte na região oceânica adjacente ao litoral maranhense, gerando mudanças de direção de propagação das ondas, quando passam a se propagar do quadrante norte. Isso também foi observado para o T_p (Figura 5), quando nesses mesmos meses observou-se ondas mais longas, com alternância entre ondas do tipo *sea* (com aproximadamente 8 s) e ondas do tipo *swell* (com aproximadamente 12 a 15 s).

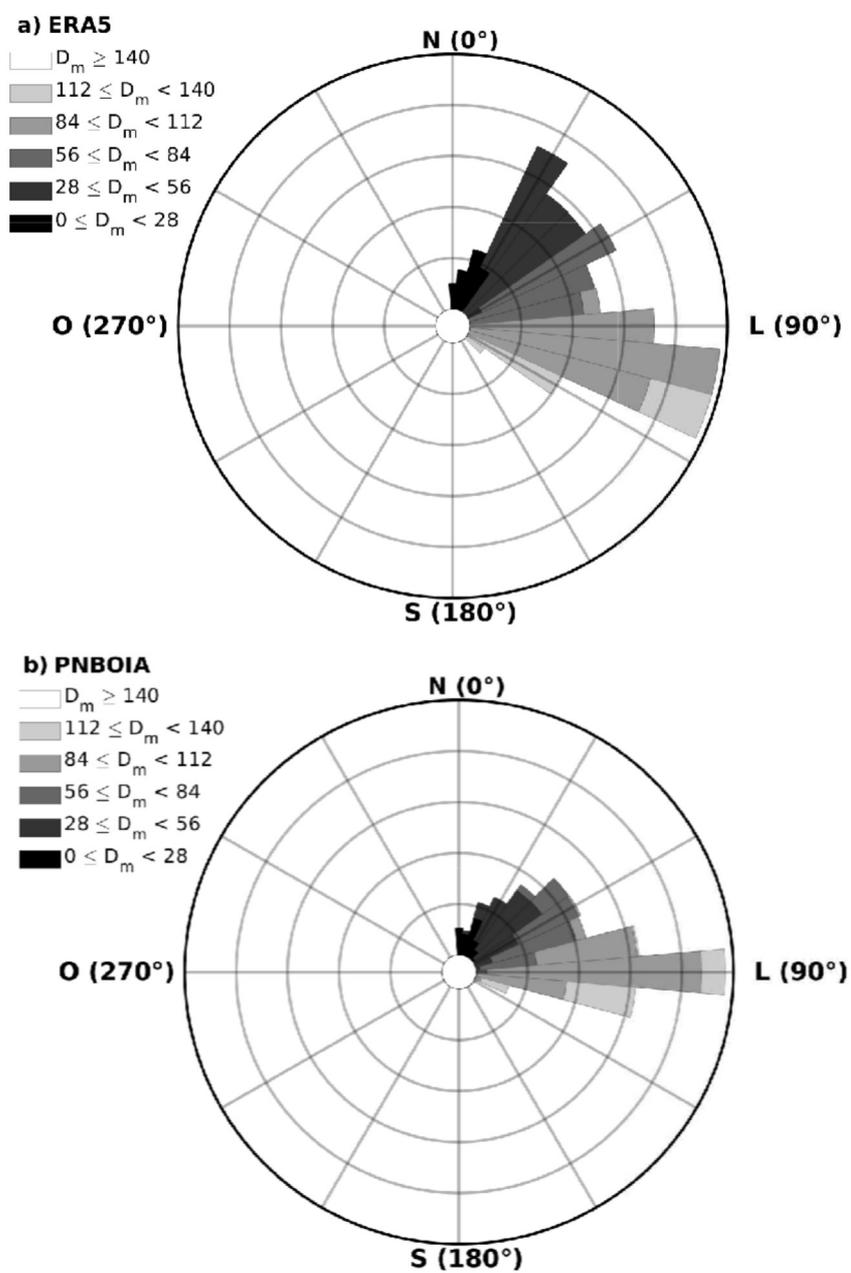
A partir de Junho de 2017 as ondas param de vir de norte (0°) e passam a propagar-se de leste/sudeste (100°) novamente, permanecendo nessa direção até Novembro. Entre Setembro, Outubro e Novembro, a D_m é bastante constante devido aos ventos alísios de leste/sudeste mais intensificados em razão do deslocamento da ZCIT para norte durante a primavera austral. O mesmo ocorre para o T_p que apresenta períodos de ondas *sea* gerados pelos ventos alísios de sudeste. Em Novembro e Dezembro de 2018 reinicia o ciclo sazonal da D_m das ondas, conforme mostra o filtro mensal da Figura 5b. Com isso, fica entendível que há uma bimodalidade do clima de ondas na região, com intensa sazonalidade.

Figura 5 - Séries temporais (Novembro de 2016 a Dezembro de 2017) da D_m medida pelo PNBOIA (linha preta) e D_m simulada pela reanálise ERA5 (linha vermelha): **(a)** sem filtro **(b)** com filtro passa baixa mensal.



A Figura 6 mostra as direções de onda predominantes para a ERA5 e PNBOIA através da rosa das ondas. Nota-se que há uma aproximação entre os resultados, porém a ERA5 (Figura 6a) possui uma maior amplitude de ângulos direcionais (com ondas vindas de norte até, aproximadamente, 135°), enquanto que para o PNBOIA (Figura 6b) a amplitude é menor (ondas vindas de norte até, aproximadamente, 120°), o que reflete o comportamento visto na Figura 5, onde o modelo superestimou os valores de D_m medidos *in situ* em alguns momentos. Nota-se também que nos valores da D_m referentes à reanálise ERA5 há uma predominância de D_m vindas de Sudoeste (entre, aproximadamente, 90° e 118°), já para os valores dos dados medidos *in situ* pelo PNBOIA há uma predominância de D_m vindas de leste (90°).

Figura 6 - Histograma Direcional da D_m : **a)** D_m simulada pela reanálise ERA5 e **b)** D_m medida pelo PNBOIA.



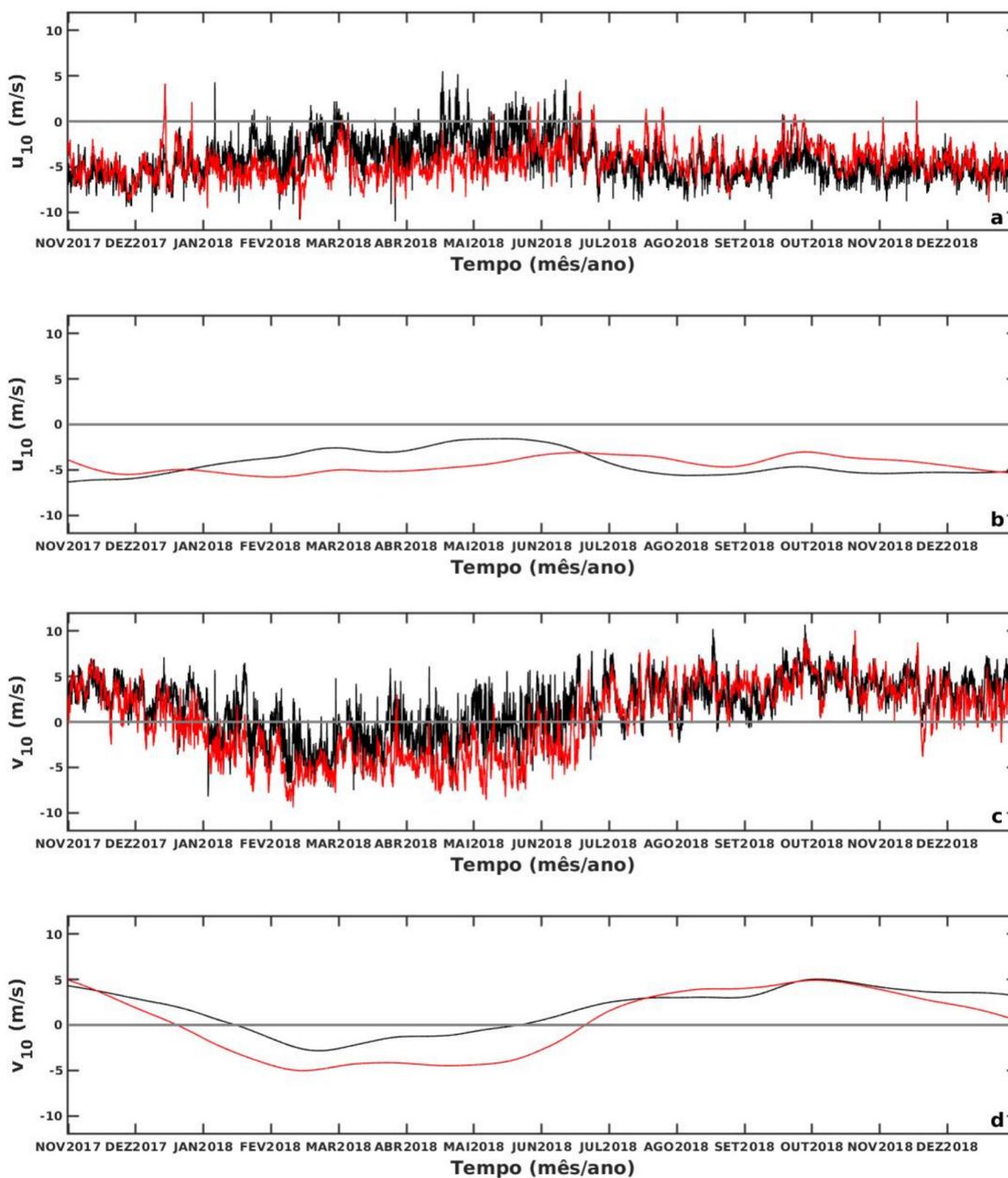
Vento Superficial a 10 m

Em relação ao vento superficial a 10 m, a análise foi feita através das componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}).

Para a componente u_{10} , o ERA5 (Figura 7a, linha vermelha) apresentou um comportamento semelhante às medições do PIRATA (Figura 7a, linha preta), pois um padrão sazonal é representado pelas duas séries, não sendo identificada nenhuma defasagem. A Figura 7b mostra a filtragem mensal do dado que ilustra a obtenção da sazonalidade da variável por parte da ERA5. Nota-se, entretanto, que a reanálise da ERA5 subestimou a componente zonal do vento em superfície na região entre os meses de Dezembro a Junho (Figura 7a). Em Dezembro de 2017 observa-se dois picos na série temporal da ERA5 quando a reanálise simulou ventos mais intensos em relação aos medidos pela bóia. De Julho a Dezembro de 2018 foi possível observar que também houve uma superestimação de u_{10} com pico em Novembro. As séries não apresentaram um bom ajuste de Janeiro a Maio, principalmente, quando o modelo falhou em simular os dados com exatidão, mas embora isso tenha ocorrido, as séries apresentam o mesmo padrão de variabilidade sazonal. Ainda assim, os resultados indicam que o ERA5 foi capaz de capturar a variação do ciclo anual do vento em superfície na região de estudo.

Para a componente v_{10} , o ERA5 (Figura 7c, linha vermelha) também capturou o comportamento sazonal apresentado pelas medições do PIRATA (Figura 7c, linha preta). De Novembro de 2017 a Junho de 2018, todavia, o ERA5 subestimou os valores obtidos pelo PIRATA, enquanto que de Julho a Dezembro de 2018 a série da ERA5 por vezes superestimou por vezes subestimou os valores da componente v_{10} . De forma geral, considera-se que o padrão sazonal da variação dos valores de v_{10} foi obtido pela reanálise, o que é evidente a partir da filtragem mensal do dado (Figura 7d).

Figura 7 - Séries temporais (Novembro de 2017 a Dezembro de 2018) das componentes zonal (u_{10}) e meridional (v_{10}) do vento superficial a 10 m simuladas pela reanálise ERA5 (linha vermelha) e medidas pela bóia PIRATA (linha preta): **(a)** e **(c)** sem filtro; **(b)** e **(d)** com filtro passa baixa mensal.



Diferenças entres os dados simulados e medidos

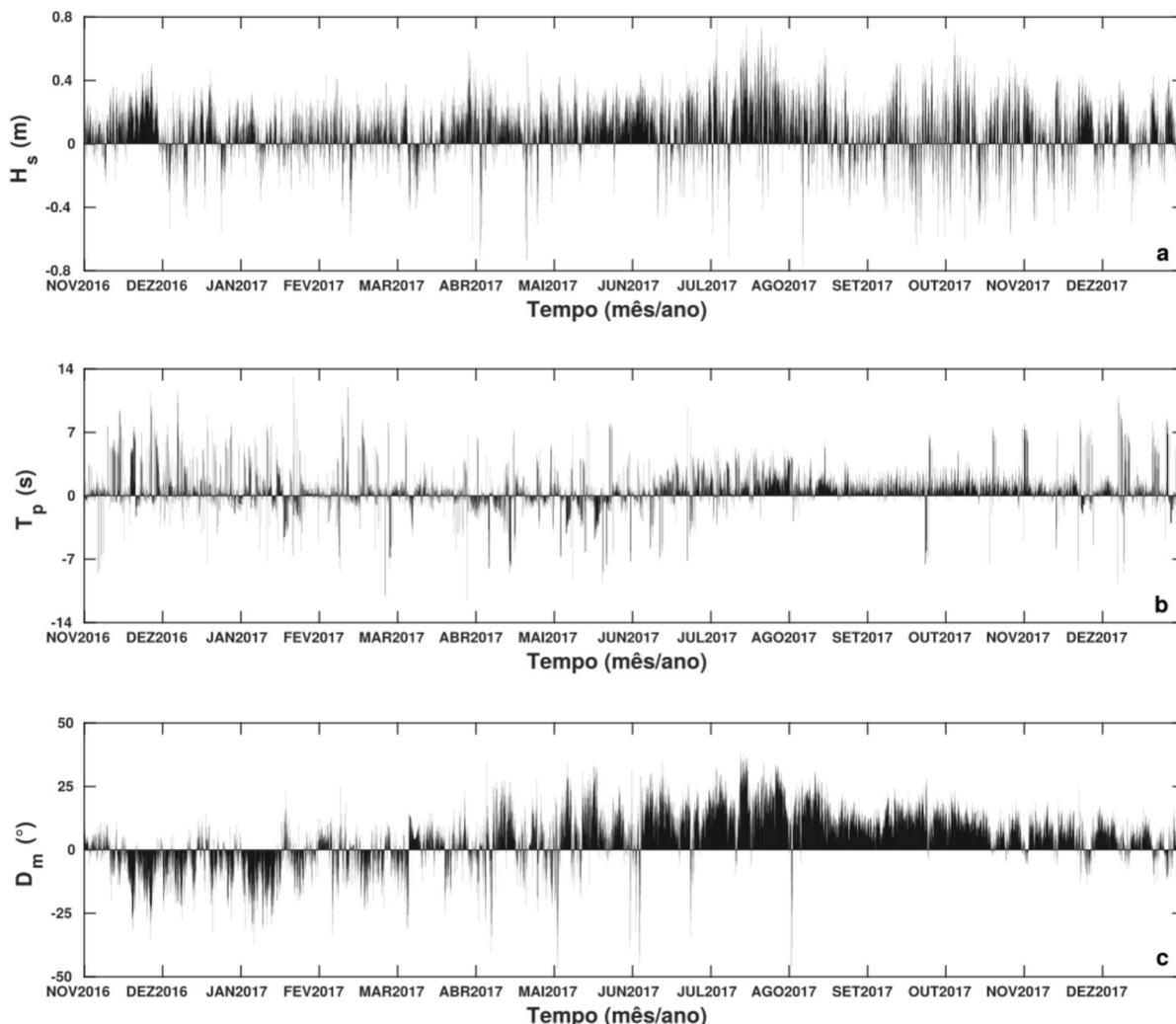
A fim de saber quais os períodos específicos em que a reanálise superestima e/ou subestima o dado medido pelas bóias, foi calculada a diferença simples entre as séries que são mostradas nas Figuras 8 e 9. A Figura 8 mostra as diferenças positivas e negativas entre o ERA5 e o PNBOIA para as variáveis H_s , T_p e D_m . Em relação a H_s (Figura 8a) pode-se observar que o intervalo entre as diferenças foi de 0,8 a -0,8 m, com as maiores diferenças encontrando-se entre os meses de Julho e Agosto de 2017 com valor máximo de 0,78 m. Em relação às diferenças negativas, ou seja, quando a ERA5 subestima as ondas, os maiores valores encontram-se entre Agosto e Novembro de 2017 com máximo de -0,76 m.

Para T_p (Figura 8b), o intervalo entre as diferenças foi de 14 e -14 s. As maiores diferenças ocorreram entre Novembro de 2016 e Fevereiro de 2017, e novamente em Novembro e Dezembro de 2017 com valor máximo de 13,21 s, enquanto que as diferenças negativas foram maiores entre Março e Maio com valores de até -11,47 s.

A D_m (Figura 8c), por ser um parâmetro que varia em escala maior, apresentou um intervalo de 50 a -50 graus, com maiores diferenças positivas ocorrendo entre Maio e Julho de 2017 (com valor máximo de 38,79°) e as maiores diferenças negativas sendo bem evidentes no mês de Agosto (-46,72°). Nota-se que para ambas as variáveis há uma maior quantidade de picos de diferenças positivas do que de diferenças negativas, assim pode-se inferir que a reanálise ERA5 tende mais a superestimar do que subestimar os valores do PNBOIA.

Isso reflete o que é visto nas seções 4.1.1 a 4.1.3 onde observa-se no dado filtrado que o modelo em geral mais superestimou do que subestimou os dados.

Figura 8 - Diferenças entre as séries da ERA5-PNBOIA: (a) H_s , (b) T_p e (c) D_m .

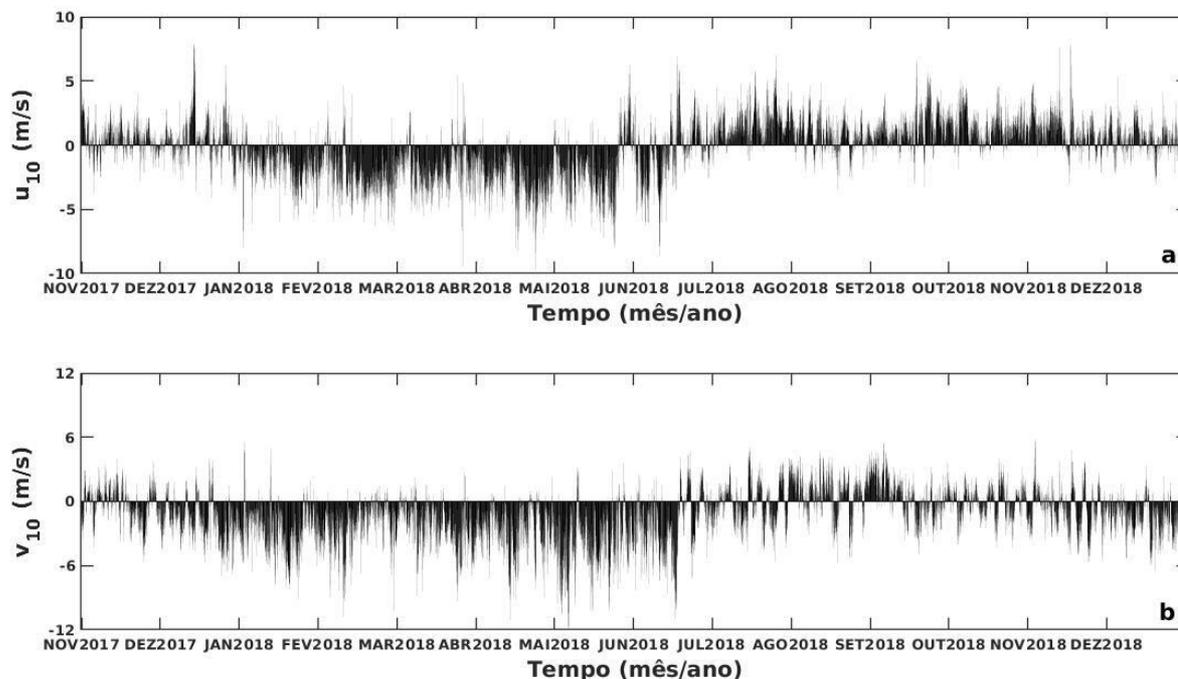


A Figura 9 mostra as diferenças positivas e negativas entre o ERA5 e o PIRATA para as variáveis u_{10} e v_{10} com os intervalos de 10 a -10 m/s e 12 a -12 m/s, respectivamente, entre as diferenças.

Para u_{10} (Figura 9a), os picos com as maiores diferenças positivas ocorreram em Dezembro de 2017 e em Maio, Junho e Novembro de 2018 (com valor máximo de 7,98 m/s), enquanto que as maiores diferenças negativas ocorreram entre Janeiro e Junho de 2018 (com valores de até -9,71 m/s). Já para v_{10} (Figura 9b), as maiores diferenças positivas são observadas em Janeiro, Setembro e Novembro de 2018 (com valor máximo de 5,75 m/s), com maiores diferenças negativas sendo encontradas em Fevereiro e Março de 2018 (com valores de até -12,01 m/s). De modo contrário ao que aconteceu para o PNBOIA, a ERA5 subestimou

os valores medidos pelo PIRATA a maior parte do tempo, principalmente para v_{10} , o que está de acordo com o que foi descrito na seção 4.1.4.

Figura 9 - Diferenças entre as séries da ERA5-PIRATA: (a) u_{10} e (b) v_{10} .



Correlação, Erro Quadrático Médio e dispersão entre os dados simulados e medidos

A seguir será mostrado o coeficiente de correlação, o RMSE e a dispersão entre os dados simulados e medidos. Para as variáveis H_s , T_p e D_m (Tabela 2) a correlação foi forte, com coeficiente de correlação de 0,8845, 0,7481 e 0,9428, respectivamente, mostrando que os valores simulados pelo ERA5 estão bem próximos dos valores observacionais coletados pelo PNBOIA. Para a variável u_{10} a correlação foi moderada, indicando que o ERA5 foi capaz de simular os valores da componente zonal, porém com algumas falhas, como pode ser observado na figura 10a. Para a componente v_{10} obteve-se uma correlação forte ($r = 0,7636$), logo, infere-se que o modelo foi capaz de simular com maior precisão a componente meridional do que a componente zonal do vento.

O valor da significância da correlação mostrou que as correlações encontradas são significativas, uma vez que p foi $< 0,05$ para todas as variáveis, logo aceita-se o que foi estabelecido pela hipótese H_0 .

Tabela 2 - Coeficientes de correlação (r) entre ERA5 e PNBOIA (H_s , T_p e D_m) e ERA5 e PIRATA (u_{10} e v_{10}) durante os respectivos períodos de medições das boias.

Variável	Correlação	
	ERA5 e PNBOIA	ERA5 e PIRATA
H_s (m)	0,8845	-
T_p (s)	0,7481	-
D_m (°)	0,9428	-
u_{10} (m/s)	-	0,3076
v_{10} (m/s)	-	0,7636

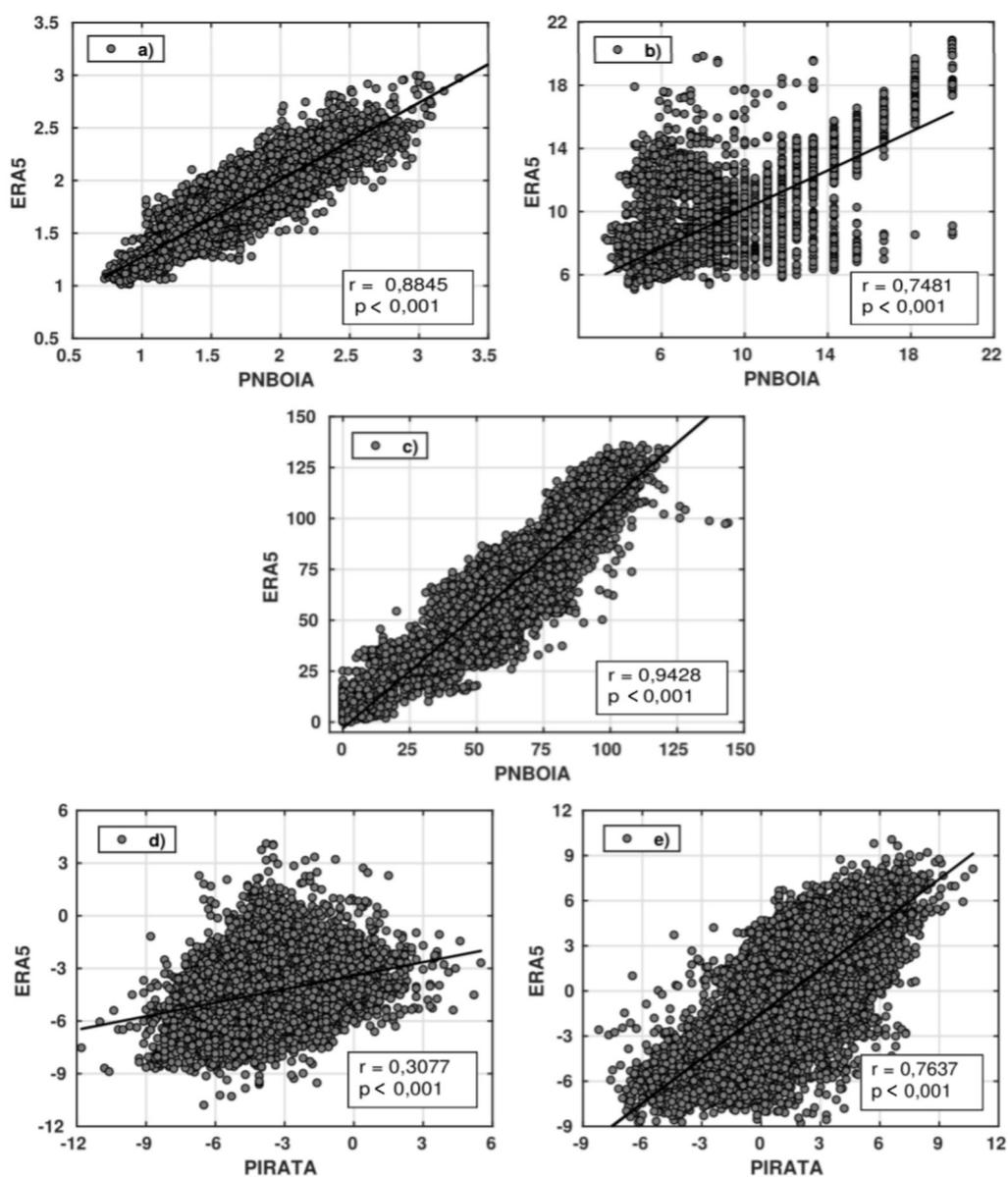
Para completar os indicadores estatísticos, foi elaborado o diagrama de dispersão (Figura 10) dos dados simulados pela reanálise e dados medidos pelas bóias para as variáveis H_s , T_p , D_m , u_{10} e v_{10} , onde a linha preta representa o ajuste visual entre as séries.

A análise de dispersão para H_s mostrou baixa dispersão entre os dados, refletindo o bom ajuste da reanálise em relação aos dados observacionais (Figura 10a). Já para o T_p nota-se uma dispersão maior, com os dados simulados pelo ERA5 se mantendo mais distantes da linha de melhor ajuste (Figura 10b). Nas séries temporais brutas de T_p é possível observar que o modelo subestima o período de ondas em alguns momentos, o que causou maior espalhamento dos dados (ver Figura 4a).

No que se refere a D_m , percebe-se que a maior parte dos dados, tanto do modelo quando da bóia, variaram entre 0 e 150° (Figura 10c), aproximadamente, apresentando menor dispersão neste intervalo.

Em relação a u_{10} (Figura 10d), houve uma grande dispersão entre os valores, o que reflete o que foi discutido nas Figuras 7a e 7b onde houveram diferenças entre as séries. Para v_{10} (Figura 10e) a dispersão dos dados foi semelhante a u_{10} , com uma considerável dispersão dos dados entre os dados, assim como observado nas Figuras 7c e 7d.

Figura 10 - Dispersão entre os dados simulados (ERA5) e os dados medidos (PNBOIA e PIRATA) para: (a) H_s , (b) T_p , (c) D_m , (d) u_{10} e (e) v_{10} .



No que diz respeito ao RMSE, os resultados revelam que para H_s o mesmo foi de 0,12 m, demonstrando que os dados estão pouco dispersos e concentrados na linha de melhor ajuste, com uma baixa diferença entre os valores simulados e os valores medidos *in situ*. Para T_p , o RMSE foi de 2,24 s, o que reflete a maior dispersão vista na Figura 11b. Em relação a D_m , o RMSE foi de 12,46°, um valor elevado em comparação às outras variáveis, em razão de algumas diferenças entre séries. Para u_{10} e v_{10} o RMSE foi de 2,28 e 2,96, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 - RMSE entre ERA5 e PNBOIA (H_s , T_p e D_m) e ERA5 e PIRATA (u_{10} e v_{10}) durante os respectivos períodos de medições das boias.

Variável	RSME	
	ERA5 e PNBOIA	ERA5 e PIRATA
H_s (m)	0,1991	-
T_p (s)	2,2352	-
D_m (°)	12,4564	-
u_{10} (m/s)	-	2,2710
v_{10} (m/s)	-	2,9577

4.3 CLIMA E VARIABILIDADE DAS ONDAS ADJACENTES AO LITORAL MARANHENSE

A análise da climatologia mensal (Figura 11) mostrou que a H_s média no domínio do OAEO adjacente ao litoral maranhense variou de 0,5 a 2,2 m nos 40 anos de dados analisados. De modo geral, as ondas mais altas foram observadas em áreas oceânicas, especialmente na porção norte do domínio de estudo, enquanto que as ondas mais baixas ocorreram próximas à costa. Há uma predominância de valores de H_s entre 1,5 e 2 m ao longo da grade, em praticamente todos os meses.

Entre os meses de Junho a Novembro, entretanto, ondas mais altas também foram observadas próximo à costa, especialmente na porção leste do domínio de estudo. De Dezembro a Maio, um aumento de H_s foi encontrado especialmente sobre a PCMA, que parece ter relação com a estação dos furacões no Atlântico Norte que ocorre de Dezembro a Maio (NHC, 2015) e propicia a ocorrência de ondas mais altas na região a partir do quadrante norte. Em Novembro, os maiores valores de H_s são observados a nordeste da grade e também sobre a PCMA e próximo à costa.

De Dezembro a Maio a D_m no domínio da PCMA é predominantemente de nordeste; em seguida ocorre a transição da direção para sudeste de Junho a Setembro; e entre Outubro e Novembro as ondas propagam-se preferencialmente de leste. Este padrão de propagação é principalmente uma resposta à variabilidade sazonal da ZCIT. Conforme Melo *et al.* (2009) a zona em que os alísios convergem (i.e., ZCIT) apresenta grande variação sazonal e

meridional. Sobre o Oceano Atlântico, a ZCIT desloca-se em média de 14°N (Agosto - Setembro) a 2°S (Março - Abril), chegando até a 5°S em anos mais chuvosos no nordeste brasileiro.

A análise da climatologia mensal do T_p (Figura 12) mostrou que o mesmo variou de 6 a 12,6 s na região de estudo. Entre os meses de Junho a Outubro ocorreram os maiores períodos de onda, sendo Agosto o mês com as ondas mais longas, as quais propagam-se na grade a partir do quadrante sudeste. Os menores valores de T_p são observados em Abril (6 s), principalmente na parte ocidental da área de estudo. De modo geral, é possível observar que em todos os meses os menores valores de T_p ocorrem a oeste da grade, o que em parte está relacionado à maior extensão da PCMA. Nota-se que de Maio a Outubro ocorre um aumento no T_p que é atribuído principalmente ao deslocamento meridional da ZCIT que ocasiona ondas mais longas no domínio de estudo a partir do quadrante nordeste.

A partir dos vetores de D_m é possível visualizar a mudança na direção de propagação das ondas ao longo do ano (assim como ocorreu para H_s) à medida que a intensidade e direção do vento em superfície mudam em resposta ao deslocamento meridional da ZCIT.

Para realizar a análise da climatologia mensal do vento superficial a 10 m (U_{10}) (Figura 13), fez-se o cálculo da resultante a partir das suas componentes, e assim obteve-se a variação dos valores de intensidade deste ao longo da grade computacional, para todos os meses, que se distribuíram entre 0,2 a 8 m/s. Nos quatro primeiros meses nota-se que o vento entra com maior intensidade pela borda norte da grade, e vai diminuindo de forma gradativa durante esses quatro meses. Em Janeiro ocorre a maior intensidade dos ventos e a partir de Junho os ventos mais intensos passam a atuar a sudeste da grade, com um aumento progressivo em sua intensidade até o mês de Setembro, quando então voltam a perder força até Dezembro.

A partir dos vetores das componentes u_{10} e v_{10} , foi possível visualizar uma mudança na direção de nordeste-leste-sudeste dos ventos em superfície, a qual está diretamente relacionada à variabilidade sazonal da ZCIT. Especialmente no trimestre de Março - Abril - Maio, observa-se a zona de confluência dos alísios, também conhecida como a região de calmarias (ou *doldrums*) (Figura 13).

A direção dos ventos no verão austral (entre meados de Dezembro e Março) foi de nordeste, enquanto que no inverno austral (entre meados de Junho e Setembro) a mesma foi predominantemente de sudeste. Com o deslocamento sazonal da ZCIT, no verão (inverno) austral, os ventos alísios de nordeste (sudeste) estão mais intensos (DRUMOND et al., 2008; DURÁN-QUESADA et al., 2009; KOUSKY, 1980), o que está de acordo com os resultados

encontrados no presente estudo. Durante o outono (entre meados de Março e Junho) e a primavera (entre meados de Setembro e Dezembro) austrais a direção predominante dos ventos foi de leste e sudeste, respectivamente.

Figura 11 - Climatologia mensal de H_s (m) (cores) e D_m ($^\circ$) (vetores) para o domínio do OAEO adjacente à PCMA.

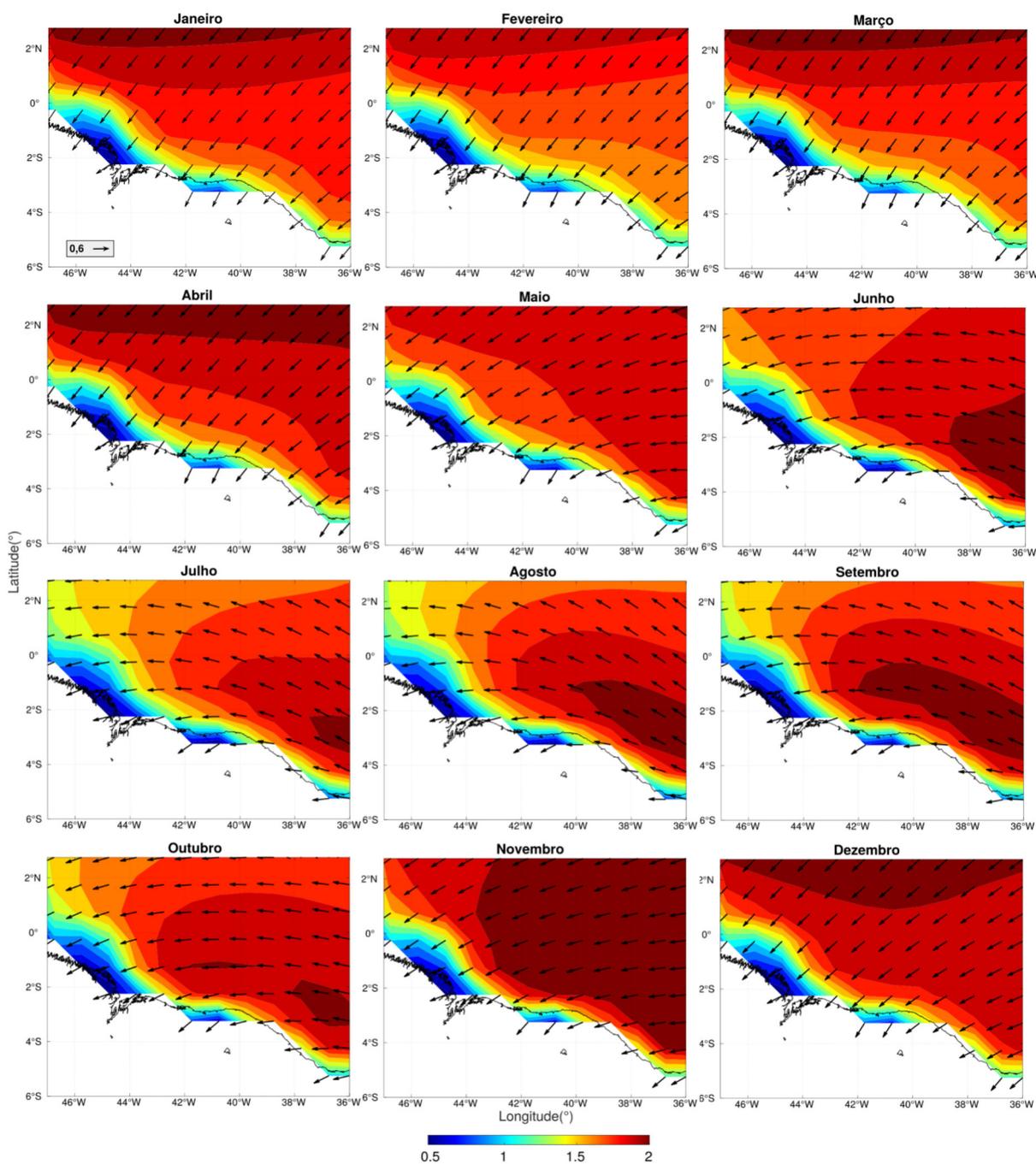


Figura 12 - Climatologia mensal do T_p (s) (cores) e D_m ($^\circ$) (vetores) para o domínio do OAE0 adjacente à PCMA.

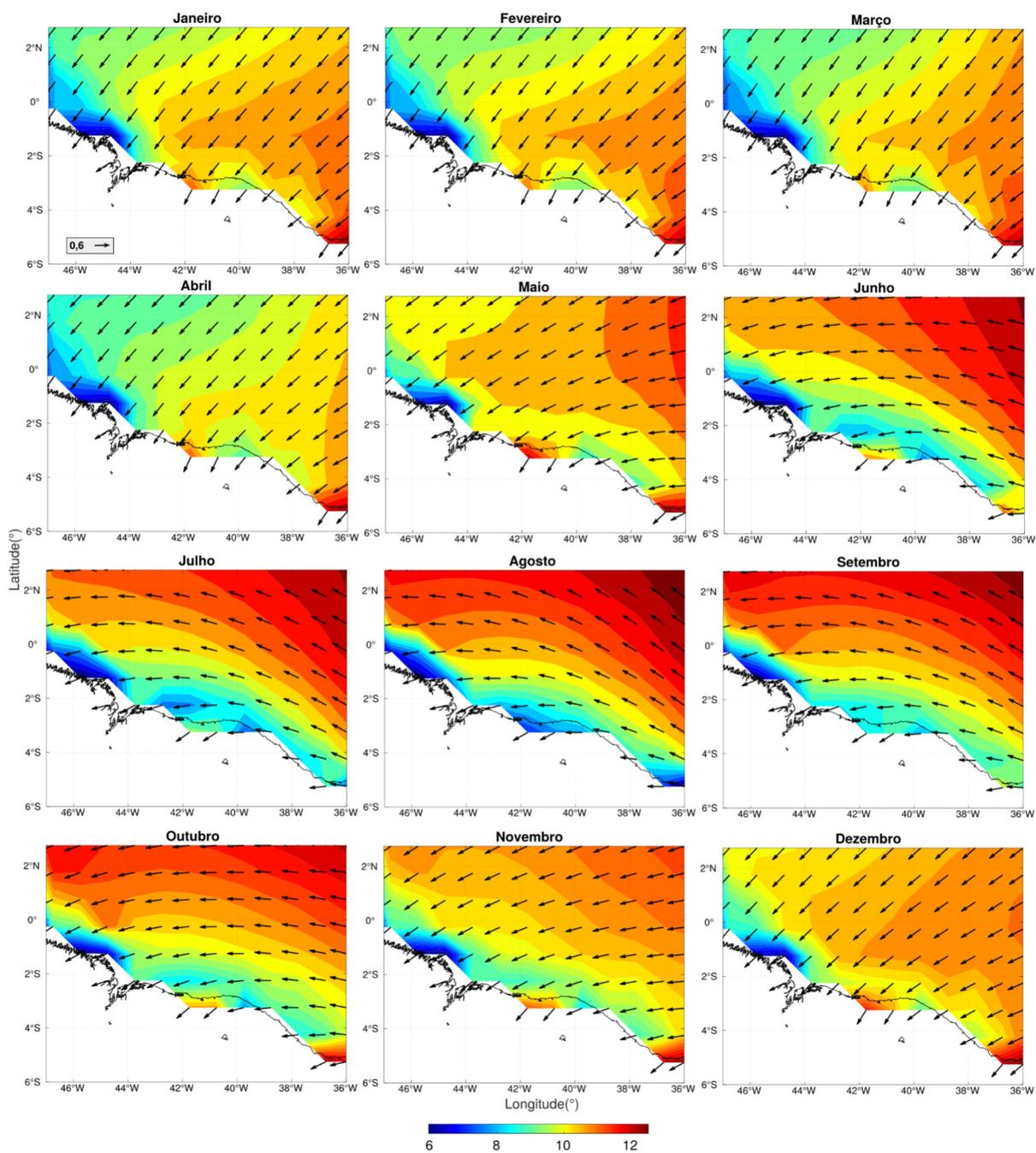
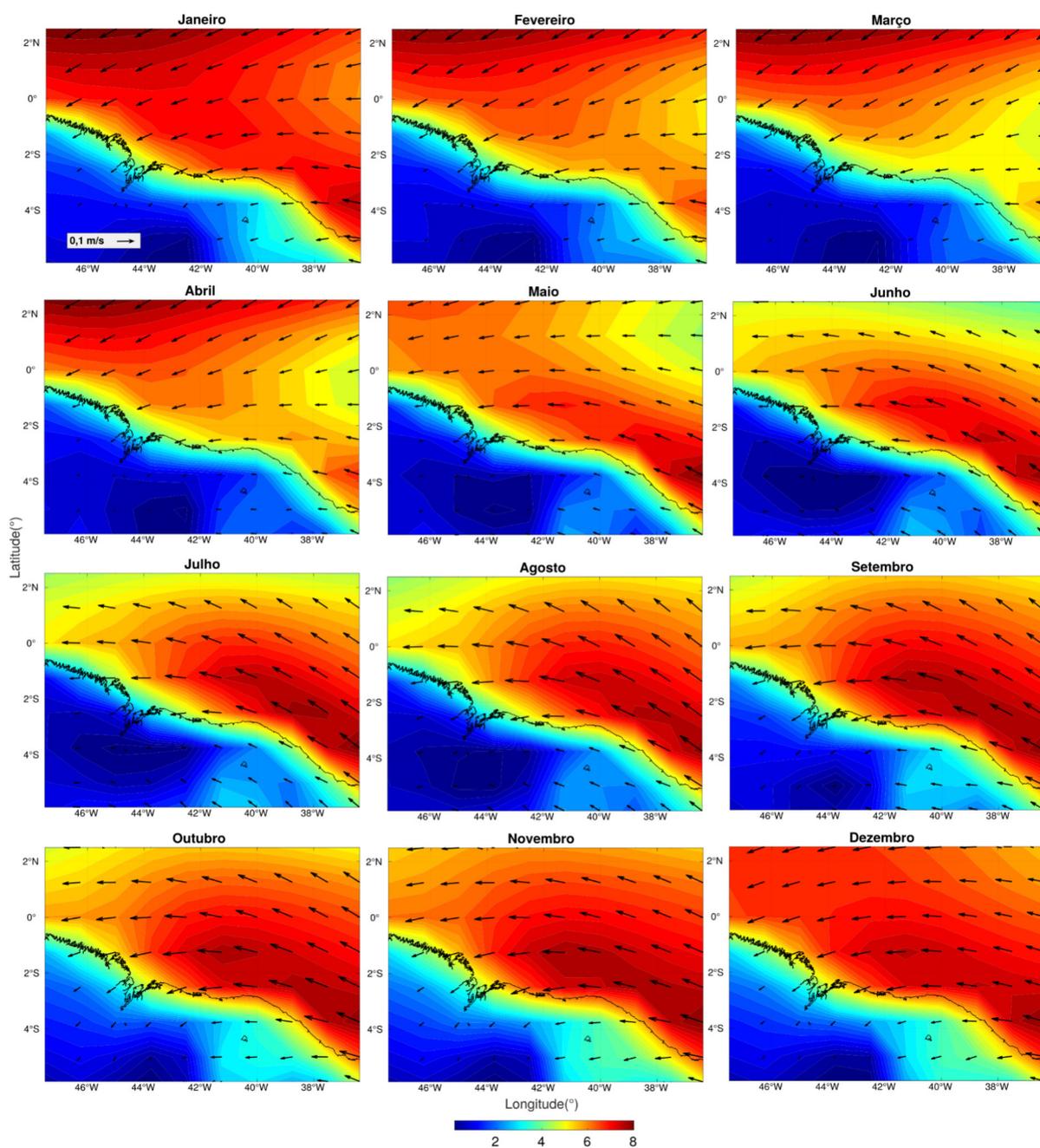


Figura 13 - Climatologia mensal da magnitude (m/s) (cores) e direção (°) (vetores) do vento a 10 m para o domínio do OAEO adjacente à PCMA.



4.4 PADRÕES DE VARIABILIDADE DAS ONDAS ADJACENTES AO LITORAL MARANHENSE

Os modos principais de variabilidade foram obtidos para H_s e U_{10} no período compreendido entre 1979 e 2019. As maiores frações da variância de H_s e U_{10} foram explicadas pelos seus respectivos quatro primeiros modos principais. A Figura 14 mostra a variância e a variância cumulativa das variáveis, onde nota-se que nas quatro primeiras barras há uma curva crescente dos autovetores e da quinta barra em diante essa curva começa a se tornar uma reta o que sinaliza que a partir do quinto modo as diferenças entre as porcentagens começam a ser muito baixas para serem analisadas. A Tabela 4 apresenta as variâncias explicadas.

Figura 14 - Diagrama de distribuição da variância e variância cumulativa: **a) e b)** H_s ; **c) e d)** U_{10} .

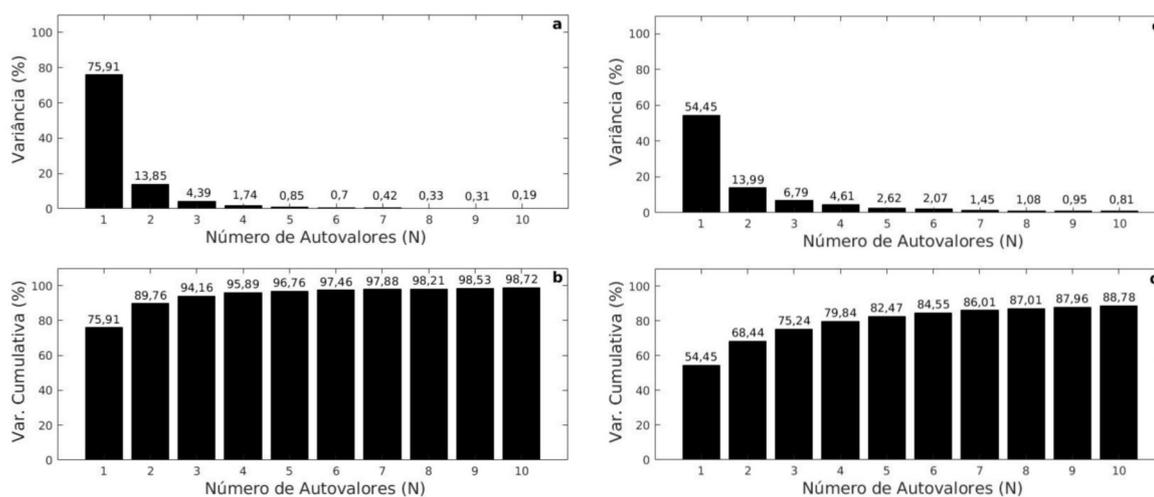


Tabela 4 - Fração de variância explicada (em %) pelas quatro primeiras FOEs das variáveis H_s e U_{10} .

	H_s (%)	U_{10} (%)
FOE₁	75,91	54,45
FOE₂	13,85	13,99
FOE₃	4,39	6,79
FOE₄	1,74	4,61
Total	95,89	79,84

Altura Significativa de Onda

Os campos espaciais e os coeficientes de expansão, ou seja, a amplitude ao longo do tempo de cada FOE para H_s estão representados nas Figuras 15 e 16, respectivamente. Os coeficientes de expansão associados aos valores encontrados nos campos espaciais representam a variabilidade que ocorreu ao longo do período estudado.

A FOE₁ da H_s explica 75,91% da variabilidade, sendo o modo dominante da variância, com um padrão dipolo nas direções norte e sudoeste, sendo o pólo positivo (ao norte) dominante sobre o negativo (a sudoeste) com valores máximos na região oceânica e valores mínimos próximos da costa (Figura 15a). É visível também, o efeito de atenuação da energia das ondas à medida que elas adentram na plataforma continental, reduzindo gradualmente H_s em direção à costa, assim como também mostrado pela climatologia (H_s).

A partir da filtragem mensal (Figura 16a, linha preta), seu coeficiente de expansão revelou um padrão de variabilidade nas escalas intrasazonal e decadal, que é melhor visualizado com a filtragem da sazonalidade na janela anual da série temporal (Figura 16a, linha vermelha), mostrando que de 1979 a 1991 a maior variância dos dados ocorreu no pólo positivo, de 1992 a 2011 oscilou entre os dois pólos e de 2012 a 2019 ocorreu no pólo negativo. A filtragem na janela anual também mostrou um aumento de amplitude da variância entre os anos de 1979 e 1992, e diminuição da mesma entre 1992 e 2011. Os anos de 1989 e 1992 foram anos com dois períodos de ENOS fortes segundo o *Climate Prediction Centre* (NCEP) que possivelmente influenciaram as flutuações de H_s .

O pólo da maior variância da FOE₁ é voltado para região Norte do domínio, logo, infere-se que este modo pode estar sendo influenciado pelos anticiclones semi-estacionários do oceano Atlântico Norte durante a temporada de furacões neste mesmo oceano.

A FOE₂, por sua vez, explica 13,85% da variância e se caracteriza por um dipolo cujos pólos orientam-se nas direções noroeste e sudeste, com os sinais positivos se propagando na região noroeste do domínio e os negativos se propagando na região sudeste, estando fora de fase, ou seja, enquanto um polo tem variância positiva o outro tem variância negativa, caracterizando assim uma situação bimodal (Figura 15b).

Segundo Oliveira (2017), a situação bimodal ocorre quando o pixel e a amplitude do autovetor apresentarem o mesmo sinal, significando que o desvio da variável é positivo naquele momento, em relação ao valor médio encontrado. Por outro lado, quando os pixels e a amplitude apresentam sinais opostos, significa um desvio médio negativo da média, alternando o padrão de ondas ao longo do tempo.

O pólo da maior variância do dado de reanálise voltado para a face noroeste do domínio resulta da alternância entre os regimes de ondas na região, que intercala períodos com predominância de ondas do tipo *sea* (Junho a Novembro) e períodos com predominância de ondas do tipo *swell* (Novembro a Maio), os últimos associados à atuação das tempestades tropicais e do Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte (ASAN), uma vez que os furacões são altamente dependentes da configuração da ASAN (MESSIER, 2018). Este padrão espacial reflete a variabilidade sazonal dos dados, caracterizando o regime de ondas da região como bimodal.

O coeficiente de expansão da FOE_2 comprova sua periodicidade sazonal. Com a aplicação do filtro mensal (Figura 16b, linha preta) obteve-se uma amplitude um pouco menor entre os picos, em relação ao coeficiente de expansão da FOE_1 , mas ambos tiveram um comportamento de inversão de sinal nos meses de transição entre as estações de verão e primavera. Por meio da filtragem anual (Figura 16b, linha vermelha), observou-se que a série se inicia com uma amplitude menor, e aumenta consideravelmente aproximadamente a partir de 1980, e a partir daí apresenta picos positivos e negativos com alta amplitude por praticamente todo o seu período, com um pico positivo que se sobressai entre os anos de 2008 e 2009, que foram anos com evento de ENOS forte em fase positiva e negativa.

A FOE_3 explica 4,39% da variabilidade de H_s , apresentando um dipolo cujos pólos orientam-se nas direções nordeste e sudoeste, com o pólo negativo ocorrendo próximo da costa e o pólo positivo na face nordeste do domínio (Figura 15c). A partir da filtragem mensal (Figura 9c, linha preta), observa-se um pico positivo que se destaca no ano de 2016 no qual ocorreu evento de ENOS em fase positiva (NOAA, 2021). Em relação ao coeficiente de expansão com filtro anual (Figura 16c, linha vermelha), observa-se um padrão semianual com picos positivos durante o verão, bem como uma diminuição da amplitude entre os anos de 1999 e 2007 que foram períodos com eventos de ENOS tanto em fase negativa quanto em fase positiva.

A FOE_4 da H_s explica 1,74% da variância e possui uma feição de tripolo com orientação noroeste-centro-sudeste zonal com dois pólos positivos separados por um negativo, com sinal positivo localizado nas áreas noroeste e sudoeste, e negativo localizado no centro do domínio voltado para norte-nordeste (Figura 15d). O coeficiente de expansão da FOE_4 apresentou-se bastante semelhante aos da FOE_3 (Figura 9d), o que pode estar relacionado a variações da célula de circulação zonal do vento devido a atuação da Oscilação Madden Julian (intrasazonal) e do ENOS (interanual).

Figura 15 - Modos principais de variabilidade de H_s para o período de 1979 a 2019: a) FOE₁; b) FOE₂; c) FOE₃; d) FOE₄.

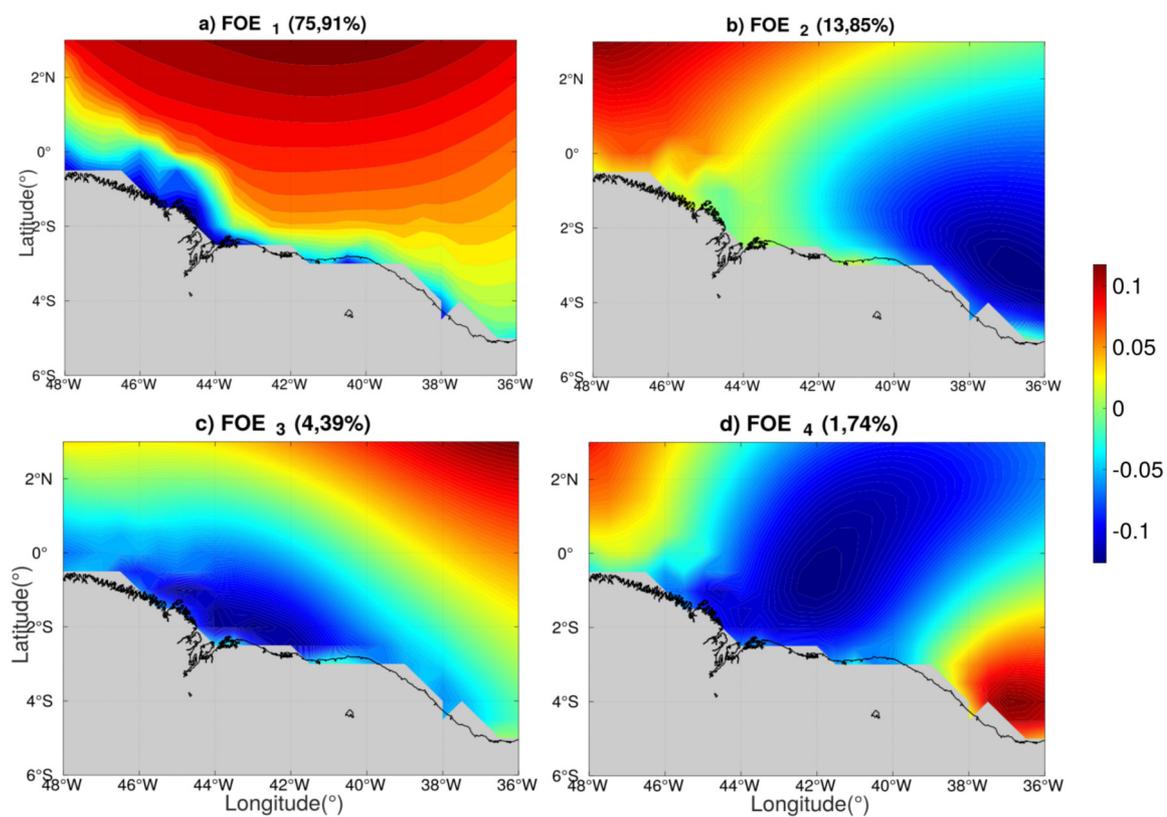
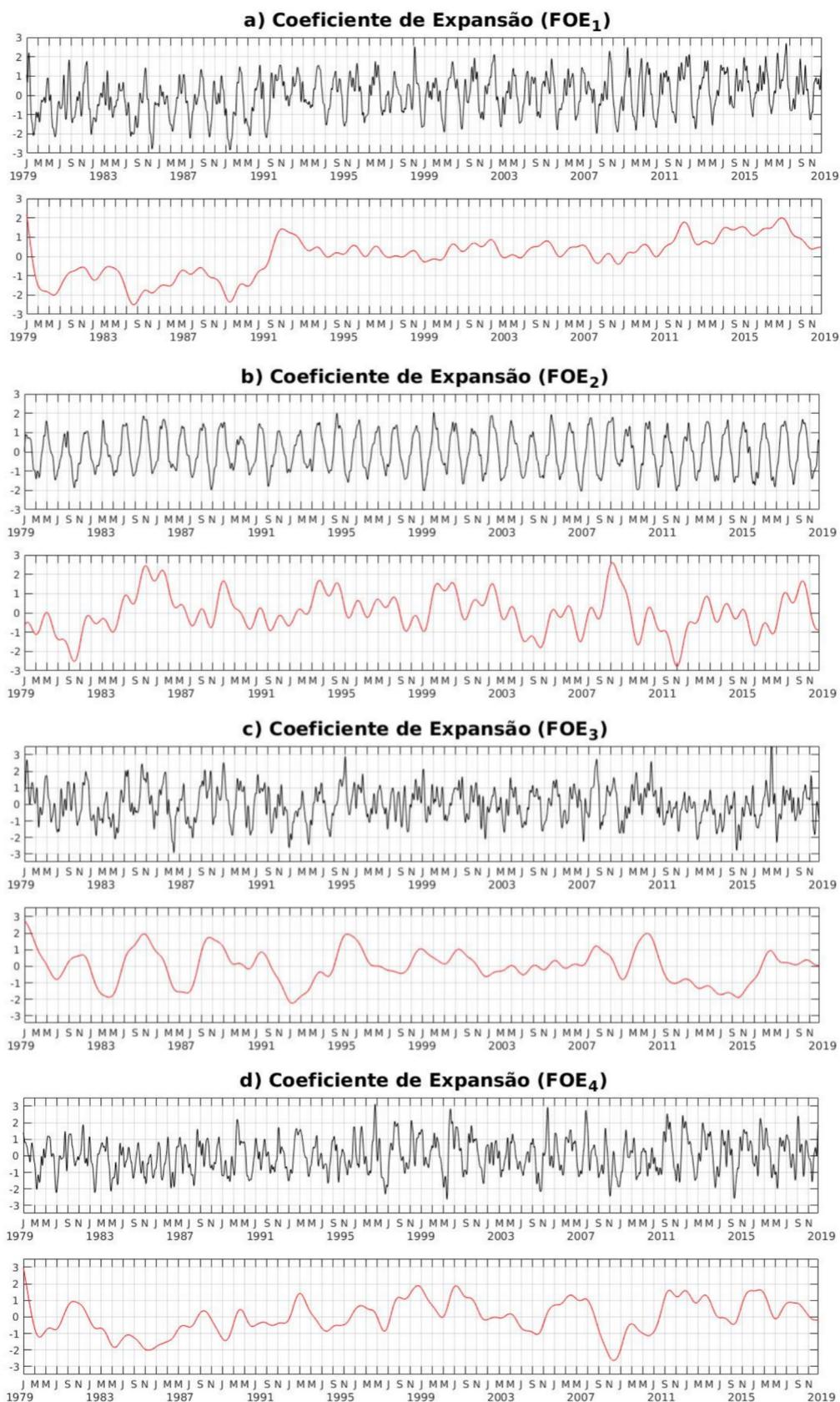


Figura 16 - Coeficientes de expansão de H_s para o período de 1979 a 2019 com filtro passa baixa mensal e anual: a) FOE_1 ; b) FOE_2 ; c) FOE_3 ; d) FOE_4 .



Vento Superficial a 10 m

As Figuras representam os campos espaciais e os coeficientes de expansão, respectivamente, de cada FOE para U_{10} .

A FOE₁ é o modo dominante de variabilidade de U_{10} , explicando cerca de 54,45% da variância total (Figura 17a). Se caracteriza como um padrão dipolo, com pólo dominante na região central do domínio, onde se concentra a sua fase positiva, e um polo nas extremidades a noroeste onde se localiza a fase negativa, ambos na região oceânica. Seu coeficiente de expansão revela oscilações com período mensal (Figura 18a, linha preta) com picos positivos durante o verão austral. A partir da filtragem anual (Figura 18a, linha vermelha) observa-se picos positivos que se destacam nos anos 1983, 1987, 1992 e 2012. Observa-se também que entre os anos 1999 a 2003 e 2013 a 2017 há uma diminuição da amplitude.

A FOE₂ explica 13,99% da variância de U_{10} sendo o segundo modo dominante da variabilidade cujo padrão espacial se apresenta como um dipolo, com um polo de fase negativa localizado na região norte em área oceânica, e um polo de fase positiva localizado na região sudeste do domínio, entre o continente e a quebra da plataforma continental (Figura 17b). Em virtude do padrão espacial encontrado aqui sugere-se que este modo esteja associado ao deslocamento meridional da ZCIT ao longo do ano e a forte atuação dos ventos alísios de sudeste na região, conforme mostram as figuras da climatologia. A FOE₂ mostra uma variação meridional no padrão de ventos. A partir da filtragem mensal (Figura 18b, linha preta), seu respectivo coeficiente de expansão revelou uma variação intrasazonal com picos mais acentuados que os dos coeficientes de expansão anteriores. Com a filtragem anual (Figura 18b, linha vermelha), notou-se que há um pico negativo considerável, ocorrido aproximadamente no ano de 2008.

A FOE₃ apresenta fases negativas e positivas bem determinadas e um padrão de sinais opostos nas componentes principais, com um padrão dipolo, com a fase positiva localizada a noroeste do domínio e negativa localizada na região nordeste do mesmo (Figura 17c). Seu respectivo coeficiente de expansão, com filtragem mensal (Figura 18c, linha preta), diferentemente dos anteriores, apresentou um pico positivo maior em 2015. Também nota-se alguns picos negativos que se destacam como em 1980, 1999 e 2010. A partir da filtragem anual (Figura 18c, linha vermelha) observam-se dois picos positivos mais acentuados nos anos de 1983 e 2009, e um pico negativo mais sobressaído no ano de 1999.

A FOE₄ explica 4,61% da variabilidade de U_{10} , sendo o modo que apresentou um padrão de dipolo com pólos mais afastados mas que ainda continuam evidentes na região,

com a fase positiva localizada a sudoeste do domínio sobre a plataforma continental, e a negativa se propagando para a área oceânica a nordeste do domínio (Figura 17d). A partir da filtragem mensal (Figura 18d, linha preta), observa-se que a série se inicia com uma amplitude maior que diminui entre os anos de 1990 a 2016 e subsequentemente aumenta a partir de 2017, com exceção de um pico negativo no ano de 2008. A filtragem anual (Figura 18d, linha vermelha) mostrou que entre os anos de 1994 e 2007 houve uma diminuição na amplitude com um subsequente pico negativo em 2008.

Figura 17 - Modos principais de variabilidade de U_{10} para o período de 1979 a 2019: a) FOE₁; b) FOE₂; c) FOE₃; d) FOE₄.

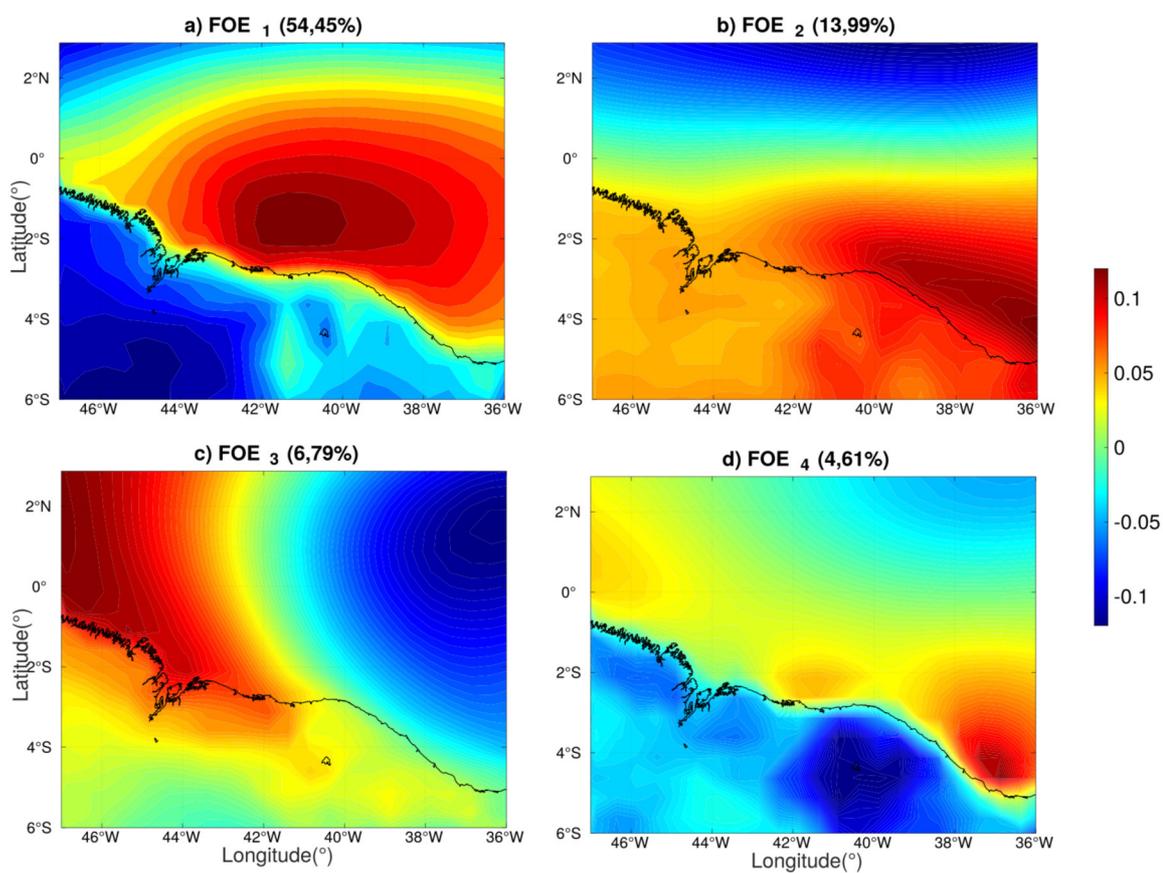
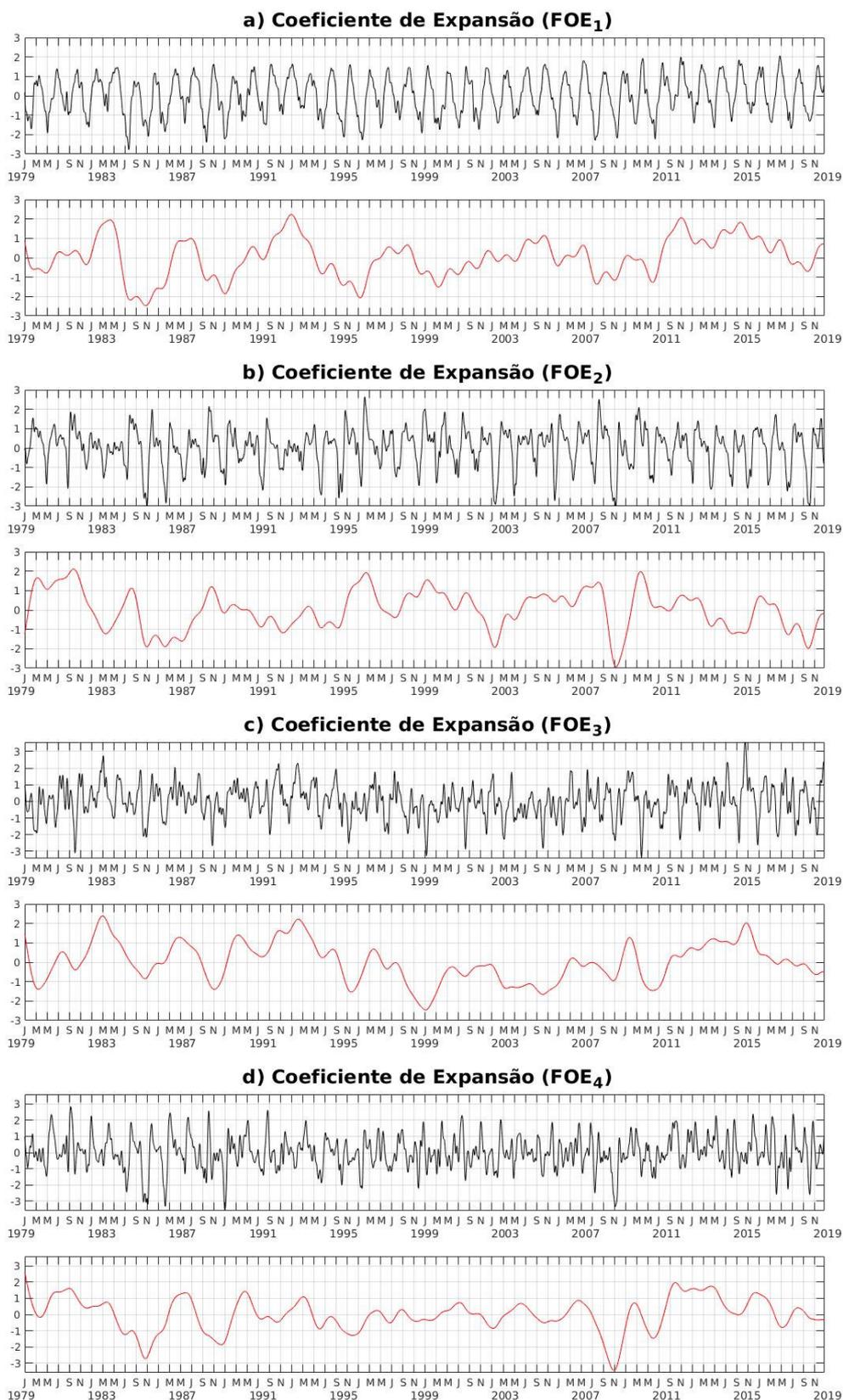


Figura 18 - Coeficientes de expansão de U_{10} para o período de 1979 a 2019 com filtro passa baixa mensal e anual: a) FOE₁; b) FOE₂; c) FOE₃; d) FOE₄.



4.4 INFLUÊNCIA DO EL NIÑO NO REGIME DE ONDAS ADJACENTES AO LITORAL MARANHENSE

O estudo da influência de índices climáticos sobre determinados parâmetros, auxilia no entendimento de eventuais alterações anômalas em padrões já estabelecidos. Esses estudos têm sido conduzidos principalmente para as bacias do Atlântico Norte e Pacífico Norte (ALLAN e KOMAR, 2006, 2000; DODET *et al.*, 2010; GULEV e GRIGORIEVA, 2006; WOOLF *et al.*, 2002) e secundariamente para a região do Pacífico Sul (HEMER *et al.*, 2010; MARSHALL *et al.*, 2018; LAING, 2000). No entanto, estudos sobre as relações entre o clima de ondas do Oceano Atlântico Sul e teleconexões climáticas ainda são poucos e na sua maioria bastante regionalizados (REGUERO *et al.*, 2013; PEREIRA e KLUMB-OLIVEIRA, 2015; DALINGHAUS, 2016; OLIVEIRA, 2017).

A partir da aplicação das FOEs foram observadas, em seus respectivos coeficientes de expansão, flutuações anômalas possivelmente causadas pela atuação de um sinal remoto que influencia os modos de variabilidade das ondas oceânicas na área de estudo, tais flutuações têm correspondência com anos em que foram registrados eventos de ENOS tanto em fase positiva (El Niño) quanto em fase negativa (La Niña) (NOAA, 2021).

Dessa forma, a seguir são mostradas as correlações entre o ION e o parâmetro de onda H_s e a forçante U_{10} e a sua classificação conforme proposto na Tabela 1. O vento superficial a 10 m apresentou uma correlação fraca ($r = 0,0858$) e não significativa ($p = 0,0596$) com o ION. Já para a altura significativa de onda obteve-se uma correlação fraca ($r = 0,0964$) porém significativa ($p = 0,0326$).

O resultado da fraca correlação obtida entre o ION e H_s e não significativa encontrada para U_{10} pode ser explicada pelo fato de o ENOS ser um fenômeno medido no Oceano Pacífico, o que dificulta a observação dos seus efeitos em outras regiões como na costa brasileira (TRENBERTH e STEPANIAK, 2001) considerando-se apenas o $lag = 0$. Além disso, os dados de onda possuem uma alta frequência característica que pode reduzir a correlação com índices climáticos como o ION. Outro fator que enfraquece a correlação é a atuação de outros modos de variabilidade interanual na área de estudo como o Dipolo do Atlântico (NÓBREGA *et al.*, 2016) e a Oscilação Madden-Julian (SILVA e HAAS, 2019), por exemplo, que em conjunto podem estar majoritariamente influenciando o clima de ondas do OAEO. Sendo assim, a variabilidade das ondas é somente parcialmente explicada pelo ION, que por conta disso tende a obter baixos valores de correlação com os parâmetros de onda, no caso de H_s (PEREIRA e KLUMB-OLIVEIRA, 2015).

5 CONCLUSÕES

Ao avaliar a representatividade da base de dados de reanálise, conclui-se que a mesma representa uma fonte bastante viável para ser utilizada para o estudo do regime de ondas do OAEO, podendo também compor as condições iniciais e de contorno em experimentos numéricos de geração e propagação de ondas na região. A reanálise da ERA5 conseguiu representar a sazonalidade dos parâmetros de onda e vento na região do OAEO, com uma correlação significativa, baixo erro e baixa diferença entre os valores simulados e os valores medidos pelas bóias. Com a análise temporal de T_p e D_m ficou evidente que há uma bimodalidade do clima de ondas na região, que entre os meses de Janeiro a Maio apresenta uma predominância de ondas tipo *swell*, enquanto que de Junho a Dezembro a predominância é de ondas tipo *sea*.

Através da análise climatológica este estudo pode concluir que os meses de Setembro a Novembro (SON) demonstraram ser o trimestre de maior agitação marítima na PCMA. As ondas longas provenientes do quadrante nordeste são associadas à zona de confluência dos ventos alísios de sudeste e nordeste, enquanto que as ondas de noroeste estão relacionadas principalmente à estação dos furacões no oceano Atlântico Norte que propicia a ocorrência de ondas *swell* na região do OAEO. Além disso, com base na análise do regime anual das ondas na região adjacente à PCMA, foi possível observar a mudança na direção média de propagação das ondas ao longo do ano, as quais se propagam de nordeste (Dezembro a Maio), em seguida de leste (Outubro e Novembro) e depois de sudeste (Junho a Setembro). Tal mudança é causada principalmente pela variabilidade sazonal da ZCIT, cujo deslocamento meridional resulta em variação na intensidade e direção dos ventos alísios na região tropical. A análise climatológica do vento a 10 m realizada no presente estudo mostrou que os ventos alísios de nordeste e sudeste estão mais intensos e predominantes na região de Dezembro a Março (verão austral) e de Junho a Novembro (inverno e primavera austrais), respectivamente. Durante meados de Março e Junho (outono austral) a direção predominante dos ventos é de leste.

Com a aplicação do método de FOEs foi possível classificar o clima de ondas oceânicas superficiais de gravidade na região do OAEO adjacente à PCMA de acordo com a centralização e sinal da máxima variância. Encontrou-se padrões de dipolos (em H_s e U_{10}) e tripolos (somente em H_s) com localização *offshore* e *onshore*. Ao analisar-se a amplitude temporal das FOEs em seus respectivos coeficientes de expansão, pode-se inferir que os padrões encontrados ocorreram em função de alterações nos padrões de circulação

atmosférica, possivelmente ligadas a propagação dos ciclones tropicais no Atlântico e a fenômenos de interação oceano-atmosfera como o ENOS e o Dipolo do Atlântico.

As correlações de H_s e U_{10} com o ION foram fracas, e não significativa no caso de U_{10} . Sendo assim, isso demonstra a existência de uma influência do ION somente na variabilidade de H_s . Através do teste de hipóteses foi possível aceitar a hipótese H_0 , no caso de H_s , e concluir que existe uma correlação pois o valor de p foi $< 0,05$. Já para U_{10} o valor de p foi $> 0,05$, neste caso rejeita-se a hipótese H_0 e aceita-se a hipótese H_1 de que não existe correlação entre o mesmo e o ION.

No OAT há outros modos de variabilidade atuantes como o Dipolo do Atlântico e Oscilação Madden-Julian, por conta disso o ION é responsável por explicar apenas uma parte da variabilidade das ondas na região, o que torna plausível o resultado obtido nas correlações. Faz-se necessário a aplicação da análise de correlação para outros modos de variabilidade interanual que possam estar influenciando as ondas na região do OAEO.

6 TRABALHOS FUTUROS

- Aplicação de um algoritmo automatizado para remover com maior eficiência os *outliers* dos dados da Direção Média de Onda medidos pelo PNBOIA;
- Avaliar o *Wave Rose* dividido por estações do ano para H_s , T_p , D_m , u_{10} e v_{10} ;
- Calcular o índice de energia acumulada (km/h por m²) para obter os valores da energia transportada pelas ondas na PCMA;
- Aplicar a correlação linear de Pearson entre os índices disponíveis dos demais fenômenos atuantes na região de estudo (i.e., Dipolo do Atlântico, Oscilação Madden-Julian) e os parâmetros de onda e vento;
- Realizar experimentos numéricos com o modelo de ondas *Simulating Waves Nearshore* (SWAN) para eventos extremos de onda simulados pela reanálise da ERA5.

REFERÊNCIAS

- ALLAN, J. C., KOMAR, P. D. Climate Controls on US West Coast Erosion Processes. **J. Coast. Res.**, v. 22, p. 511–529, 2006. <https://doi.org/10.2112/03-0108.1>.
- ALLAN, J. C., KOMAR, P. D. Are ocean wave heights increasing in the Eastern North Pacific? **EOS Trans. Am. Geophys. Union**, v. 81, p. 561–567, 2000. DOI:10.1029/EO081i047p00561-01.
- AQUINO, A. R. **Regime e Variabilidade de Ondas no Atlântico Tropical**. 2016. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2016.
- BRASIL. PNBOIA. **GOOS Brasil**. 2021a. Disponível em: <http://www.goosbrasil.org/pnboia/>. Acesso em: 16/05/2021.
- BRASIL. Departamento de Hidrografia e Navegação (DHN). **Marinha do Brasil**. 2021b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-pnboiaboias/boia-fortaleza>. Acesso em: 16/05/2021.
- BRASIL. PIRATA. **GOOS Brasil**. 2021c. Disponível em: <http://www.goosbrasil.org/pirata/>. Acesso em: 16/05/2021.
- BROMIRSKI, P. D., CAYAN, D. R. Wave power variability and trends across the North Atlantic influenced by decadal climate patterns. **J. Geophys. Res. Oceans**, v. 120, p. 3419–3443, 2015. <https://doi.org/10.1002/2014JC010440>.
- CORREIA, G. S. **Variabilidade do Clima de Ondas Oceânicas no Atlântico Tropical e contribuição energética à região oceânica adjacente à Plataforma Continental do Maranhão**. 2019. 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2019.
- DALANHESE, L. A. **Climatologia de Ondas no Atlântico Sul com base em observações do programa PNBOIA e dados reanalisados do modelo *Wavewatch* III**. 2017. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Biosistemas) - Universidade Federal Fluminense, Niterói - RJ, 2017.

DALINGHAUS, C. **Análise da estabilidade da forma em planta e perfil nas praias da Barra da Lagoa, Moçambique e Ingleses, Florianópolis - SC: aplicações em análise de perigos costeiros.** 2016. 200 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2016. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.

DODET, G., BERTIN, X., TABORDA, R. Wave climate variability in the North-East Atlantic Ocean over the last six decades. **Ocean Model.**, v. 31, p. 120–131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.10.010>.

DRUMOND, A., NIETO, R., GIMENO, L., AMBRIZZI, T. A Lagrangian identification of major sources of moisture over Central Brazil and La Plata Basin. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, D14128, p. 1-9, 2008. DOI:10.1029/2007JD009547.

DURÁN-QUESADA, A. M., REBOITA, M. S., GIMENO, L., NIETO, R. The Role of the Tropics in the Global Water Cycle: Precipitation and Moisture transport in Tropical America. **Proceedings of the Symposium Earth Observation and Water Cycle Science**, held 18-20 November, 2009 in Frascati, Italy. Edited by H. Lacoste. ISBN: 978-92-9221-238-4. ESA-SP, Vol. 674, 2009, id.34.

FERNANDES, E. H. L., JÚNIOR, O. O. M., CUCHIARA, D. C. Ondas. In: CASTELLO, J. P. e KRUG, L. C. **Introdução às Ciências do Mar.** Pelotas: Editora Textos, 2015.

FERREIRA, J. C., PATINO, C. M. O que realmente significa o valor-p?. **J Bras Pneumol.** v. 41(5), p. 485-485, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-37132015000000215>.

GOMES, A. S. **Ondas Marinhas.** Departamento de Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense, 2003.

GRIGGS, G. B., TRENHAILE, A. S. Coastal cliffs and platforms. In: R. W. G. Carter & C. D. Woodroffe, (eds), **Coastal Evolution: Late Quaternary shoreline morphodynamics.** Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. p. 425–476, 1994, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511564420>.

GULEV, S. K., GRIGORIEVA, V. Variability of the Winter Wind Waves and Swell in the North Atlantic and North Pacific as Revealed by the Voluntary Observing Ship Data. **J. Clim.** v 19, p. 5667–5685, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3936.1>.

HEMER, M. A., CHURCH, J. A., HUNTER, J. R. Variability and trends in the directional wave climate of the Southern Hemisphere. **Int. J. Climatol.** v. 30, p. 475–491, 2010. <https://doi.org/10.1002/joc.1900>.

HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., ABDALLA, S., ABELLAN, X., BALSAMO, G., BECHTOLD, P., BIAVATI, G., BIDLOT, J., BONAVIDA, M., DE CHIARA, G., DAHLGREN, P., DEE, D., DIAMANTAKIS, M., DRAGANI, R., FLEMMING, J., FORBES, R., FUENTES, M., GEER, A., HAIMBERGER, L., HEALY, S., HOGAN, R. J., HÓLM, E., JANISKOVÁ, M., KEELEY, S., LALOYLAUX, P., LOPEZ, P., LUPU, C., RADNOTI, G., DE ROSNAY, P., ROZUM, I., VAMBORG, F., VILLAUME, S., THÉPAUT, J. N. The ERA5 global reanalysis. **Q J R Meteorol Soc.** v. 146, p. 1– 51, 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

KOMAR, P. D. **Beach Processes and Sedimentation**. 2.ed. New Jersey, Prentice Hall, 1997. 544p.

KOUSKY, E. V. Diurnal Rainfall Variation in Northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 108, p. 488-498, 1980. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108%3C0488:DRVINB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108%3C0488:DRVINB%3E2.0.CO;2).

LAINING, A. K. New Zealand wave climate from satellite observations. **New Zeal. J. Mar. Freshw. Res.** v. 34, p. 727–744, 2000. <https://doi.org/10.1080/00288330.2000.9516973>.

LORENZ, E. N. Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction. **Scientific Report**, 1956. <http://www.o3d.org/abracco/Atlantic/Lorenz1956.pdf>.

MARQUEZ, A. L. **Projeções futuras das Ondas de Gravidade da superfície dos oceanos para a América do Sul**. 2017. 100 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 2017.

MARSHALL, A. G., HEMER, M. A., HENDON, H. H., MCINNIS, K. L. Southern annular mode impacts on global ocean surface waves. **Ocean Model.** v. 129, p. 58–74, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2018.07.007>.

MASSEL, S. R. **Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction**. 3. ed. Singapura: World Scientific, 2017. 800 p.

MATOS, M. de F. A. de. **Modelagem do Clima de Ondas e seus efeitos sobre as feições morfológicas costeiras no litoral setentrional do Rio Grande do Norte**. 2013. 225 p. Tese (Doutorado em Geodinâmica e Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2013.

MESSIER, H. The Influences of the North Atlantic Subtropical High and the African Easterly Jet on Hurricane Tracks during strong and weak seasons. **Meteorology Senior Theses**. v. 40, p. 1-18, 2018. https://lib.dr.iastate.edu/meteor_sthesis/40.

MELO, A. B. C., CAVALCANTI, I. F. A., SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J., SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. Cap. 2, p. 25-41. ISBN 978-85-86238-92-5.

NHC. **Tropical Cyclone Climatology**. 2015. Disponível em: <https://www.nhc.noaa.gov/climo/>. Acesso em: 13/12/2020.

NOAA. **Cold & Warm Episodes by Season**. 2021. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em: 01/07/2021.

NOAA. **Global Tropical Moored Buoy Array**, Pacific Marine Environmental Laboratory. Disponível em: <https://www.pmel.noaa.gov/tao/drupal/disdel/>. Acesso em: 08/03/2021.

NÓBREGA, R. S., SANTIAGO, G. A. C. F., SOARES, D. B. Tendências do controle climático oceânico sob a variabilidade temporal da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 276-292, 2016. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43657>.

OLIVEIRA, B. A. de. **Variabilidade do Clima de Ondas de Santa Catarina-Brasil utilizando o modelo *Wavewatch* III**. 2017. 105 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2017.

PARISE, C. K. **Estudo da variabilidade de ondas no oceano Atlântico Sul e a contribuição energética de um ciclone extratropical intenso nos espectros das ondas ao largo do Rio Grande do Sul**. 2010. 65 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2010.

PEDLOSKY, J. **Waves in the Ocean and Atmosphere: Introduction to Wave Dynamics**. Springer Science & Business Media, 2003. 263 p. DOI: 10.1007/978-3-662-05131-3.

PEREIRA, N. E. da S., KLUMB-OLIVEIRA, L. A. Analysis of the influence of ENSO phenomena on wave climate on the central coastal zone of Rio de Janeiro (Brazil). **Revista de Gestão Costeira Integrada**. v. 15, p. 353-370, 2015. https://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-570_Pereira.pdf.

REGUERO, B. G., MÉNDEZ, F. J., LOSADA, I. J. Variability of multivariate wave climate in Latin America and the Caribbean. **Glob. Planet. Change**. v. 100, p. 70–84, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.09.005>.

SAMPAIO, N. D. E. G. A. **Variabilidade temporal do Regime de Ondas na porção Sudoeste do Atlântico Norte**. 2014. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Oceanografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2014.

SASAKI, D. K. **Mudanças dos Modos de Variabilidade no Atlântico Tropical no século XX**. 2014. 69 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2014.

SEMEDO, A., SUSELJ, K., RUTGERSSON, A., STERL, A. A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40. **J. Climate**, v. 24, n. 5, p. 1461-1479, 2011. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3718.1>.

SILVA, R. R., HAAS, R. A Oscilação Madden-Julian. **As Ciências Exatas e da Terra e a Interface com vários saberes 2**. Atena Editora, 2020. p. 227-238. DOI: 10.22533/at.ed.080201301.

SORENSEN, R. M. Basic wave mechanics: for coastal and ocean engineers. **Naval Engineers Journal**, v. 103(6), p. 227-284, 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1994.tb03021.x>.

MODALI, K., SCHULZWEIDA, U., MUELLER, R., KORNBLUEH, L., MUELLER, W. **Climate Data Operators for quick look visualization**. Max Planck Institute for Meteorology, Bundesstrasse, Hamburg, Germany, 2008.

TESSLER, M. G., GOYA, S. C. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, p. 11-23, 2011. <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0017.0001>.

TRENBERTH, K. E., STEPANIAK, D. P. Indices of El Niño Evolution. **Journal of Climate**, v. 14, p. 1697-1701, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:LIOENO>2.0.CO;2).

UVO, C. B. **A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e sua relação com a precipitação da Região Norte do Nordeste Brasileiro**. 1989. 82 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos - SP, 1989.

WOOLF, D.K., CHALLENGOR, P.G., COTTON, P.D. Variability and predictability of the North Atlantic wave climate. **J. Geophys. Res. C Ocean**. v. 107, p. 1-14, 2002. <https://doi.org/10.1029/2001jc001124>.