



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS
MESTRADO ACADÊMICO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS

CAIO ERICK BRAGA COSTA

ASPECTOS GERAIS SOBRE PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE
E AVALIAÇÃO DE REANÁLISES NUMÉRICAS NO LITORAL BRASILEIRO

FORTALEZA

2023

CAIO ERICK BRAGA COSTA

ASPECTOS GERAIS SOBRE PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE E
AVALIAÇÃO DE REANÁLISES NUMÉRICAS NO LITORAL BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Marinhas Tropicais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de Concentração: Oceanografia Física

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira

Coorientador: Msc. Iury Tércio Simões-Sousa

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- B793a Braga Costa, Caio Erick.
ASPECTOS GERAIS SOBRE PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE E
AVALIAÇÃO DE REANÁLISES NUMÉRICAS NO LITORAL BRASILEIRO / Caio Erick Braga Costa. –
2023.
63 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-
Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Eduardo Peres Teixeira.
1. Oceanografia física. 2. Ondas superficiais de gravidade. 3. Validação de reanálise. 4. WAVERYS. 5.
Ondas no litoral brasileiro. I. Título.

CDD 551.46

CAIO ERICK BRAGA COSTA

ASPECTOS GERAIS SOBRE PADRÃO DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE E
AVALIAÇÃO DE REANÁLISES NUMÉRICAS NO LITORAL BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Ciências Marinhas Tropicais do Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais do INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR - LABOMAR da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de Concentração: Oceanografia Física

Aprovada em: 31 de maio de 2023

BANCA EXAMINADORA

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

Msc. Iury Tércio Simões-Sousa (Coorientador)
University of Massachusetts Dartmouth (UMassD)

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

Dr. Filipe Pereira dos Santos
Universidade de São Paulo (USP)

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que forneceu recursos para viabilizar essa pesquisa. Serei eternamente grato por essa política pública tão importante e necessária para o incentivo à ciência em nosso país.

Ao Iury Simões e ao Carlos Teixeira, que com sua paciência, conselhos e apoio, foram essenciais no desenvolvimento deste trabalho.

À minha mãe e ao meu pai, Genoveva e Marcos, por todo o suporte não só no mestrado, mas durante toda a vida.

Aos meus avós, Dona Maria, Dona Raimunda e Seu Chico. Obrigado pelo acolhimento. Amo muito vocês.

Aos meus amigos/as que estiveram próximos em vários momentos que precisei de uma companhia pra compartilhar os momentos da vida, Hailla, João, Levi, Manu, Nicolly, Isaias.

A minha companheira Jéssica, obrigado por ser quem você foi e por ter me apoiado quando mais precisei.

Agradeço também os/as professores/as, mentores e colegas que o Labomar (UFC) me trouxe e que cruzaram meu caminho. Pude aprender muito ao longo de todos esses anos. Suas lições e paixão pela ciência dos oceanos ajudaram a moldar o minha ética, meu senso crítico e o profissional que sou hoje.

Ao Geraldo e ao Filipe, por toparem prontamente estar no momento da defesa, agregando ainda mais esse trabalho com suas importantes considerações e pontos de vista.

Aos colegas de consultoria ambiental que conheci no exercício da profissão como Oceanógrafo.

À todos os meus familiares.

Aos amigos/as que o mar me trouxe.

E por último e não menos importante, agradeço a mim mesmo pela força diante de todas as adversidades. Não foi fácil chegar até aqui e me orgulho por persistir nos meus objetivos e sonhos.

RESUMO

O conhecimento do padrão de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento é fundamental para diversas atividades no litoral brasileiro e dados observados ainda são escassos. Neste sentido, este trabalho utiliza dados observados de boias do Programa Nacional de Boias da Marinha do Brasil (PNBOIA) para caracterizar o padrão de ondas e ventos no Brasil. Além disso, três reanálises globais de ondas são utilizadas para investigar o modelo que apresenta melhor desempenho para a costa brasileira: O Multigrid Hindcast (NOAA/NCEP), WW3-ST6 (University of Melbourne) e o WAVERYS (Mercator). Diversos mecanismos atmosféricos influenciam o padrão de ondas, além de eventos meteorológicos distantes como ciclones extratropicais. Também é investigada a qualidade das reanálises na previsão de eventos extremos de *rogue waves* com percentil acima 95%. Ondulações de diferentes períodos e direções distintas ao longo do litoral são observadas, indicando um mar bimodal em todas as regiões. De maneira geral, o WAVERYS apresentou uma acurácia mais satisfatória para previsão de Altura Significativa e Período de Pico. Observou-se que, em geral, modelos numéricos de ondas tendem a errar mais em condições de swell, variando para cada região do litoral e geralmente subestimando as alturas de onda. O presente estudo fornece resultados interessantes e acrescenta uma melhor compreensão sobre as limitações de reanálises globais de ondas para o litoral brasileiro.

Palavras-chave: Oceanografia física. Ondas superficiais de gravidade. Validação de reanálise. WAVERYS.

ABSTRACT

The knowledge of the pattern of gravity surface waves generated by the wind is fundamental for various activities along the Brazilian coast, and observed data are still scarce. This work utilizes observed data from buoys of the Brazilian Navy's National Buoy Program (PNBOIA) to characterize the pattern of waves and winds in Brazil. We also looked at three global wave analyses to find out which model works best for predicting wave conditions along the Brazilian coast: the Multigrid Hindcast (NOAA/NCEP), WW3-ST6 (University of Melbourne), and WAVERYS (Mercator). Different atmospheric factors and far-off weather events like extratropical cyclones affect how waves form. The quality of the reanalyses in predicting extreme rogue wave events with percentiles above 95% is also investigated. We noticed waves of different sizes and directions along the coast, showing that the sea has two main wave patterns in all regions. In general, WAVERYS exhibited a more satisfactory accuracy for forecasting of Significant Wave Height (Hs) and Peak Period (Tp). It was observed that, generally, numerical wave models tend to make more errors under swell conditions, varying for each coastal region and typically underestimating wave heights. This study provides interesting results and contributes to a better understanding of the limitations of global wave reanalyses for the Brazilian coast.

Keywords: Oceanografia física. Ondas superficiais. Validação de reanálise.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Mapa da área de estudo com a localização das boias utilizadas neste trabalho. A linha batimétrica marca a profundidade de 200 m. O gráfico à direita representa o intervalo temporal dos dados de cada uma das boias. Cortesia de Iury Simoes-Sousa. 21
- Figura 2 – Rosa dos ventos obtidas em cada boia apresentando a intensidade do vento associada aos quadrantes obtidos. Cores mais escuras representam velocidades maiores. 26
- Figura 3 – Sazonalidade espacial e temporal de intensidade e direção de ventos encontrados nos dados observados. As setas indicam a velocidade e direção mais frequente naquele mês e as cores representam as intensidades. 27
- Figura 4 – Histograma direcional de Direção (Dp) e Período de Pico (Tp) de onda dos dados observados. Cores mais intensas representam maiores ocorrências de ondas naquela respectiva direção e período. A linha vermelha divide ondas com Tp menores e maiores que 10 s. 29
- Figura 5 – Estimativa de Densidade de Kernel (KDE) para os dados observados de Período de Pico. 33
- Figura 6 – Proporção de registros de ondas com Tp acima de 10 segundos em relação à todos os registros de onda encontrados em cada mês para cada boia. Meses com registros abaixo de 20% foram desconsiderados da análises. 35
- Figura 7 – Variação sazonal e espacial de médias mensais de Hs, Dp e Tp observados em cada boia. Os gráficos correspondem à ondas tipo *swell* (A) e *sea* (B). As setas indicam a Altura Significativa (Hs) e Direção de Pico (Dp), enquanto as cores representam os valores de Período de Pico (Tp) 38
- Figura 8 – Comparação da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em relação ao atraso na previsão dos modelos. 42
- Figura 9 – Comparação entre médias mensais de Hs, Dp e Tp dos dados observados e resultados dos produtos de modelagem numérica para ondas tipo *sea* (em azul) e *swell* (em vermelho). O eixo x representa os dados de reanálise e y os dados observacionais. 43

Figura 10 – Correlação com Lag entre os resultados do WAVERYS e os dados observados para as Variáveis Hs, Tp e Dp. Cada gráfico apresenta a correlação com lag para as respectivas boias, juntamente com os valores a correlação máxima obtida.	46
Figura 11 – Evento extremo identificado na boia de Fortaleza, no Ceará. Os gráficos da direita apresentam as séries temporais do dado observado (azul) e resultado da reanálise (verde), enquanto o gráfico da direita apresenta a Correlação e RMSE pra cada parâmetro. O gráfico superior representa os valores de Hs, o gráfico intermediário apresenta Tp e o gráfico inferior os valores de Dp. Hmax (linha preta), Hs observado (azul) e modelado (verde). O ponto vermelho indica uma <i>rogue wave</i>	50
Figura 12 – Evento extremo identificado na boia de Vitória, em Espírito Santo. Os gráficos da direita apresentam as séries temporais do dado observado (azul) e resultado da reanálise (verde), enquanto o gráfico da direita apresenta a Correlação e RMSE pra cada parâmetro. O gráfico superior representa os valores de Hs, o gráfico intermediário apresenta Tp e o gráfico inferior os valores de Dp. Hmax (linha preta), Hs observado (azul) e modelado (verde). O ponto vermelho indica uma <i>rogue wave</i>	52
Figura 13 – Direção e Intensidade do Vento registrado na boia de Vitória, em Espírito Santo, durante o evento extremo registrado. A figura indica a entrada de um possível sistema frontal, com direção em torno de 210° e velocidades acima de 15 m/s entre os dias 19/11 e 20/11	53
Figura 14 – Evento extremo identificado na boia de Itajaí, em Santa Catarina. Os gráficos da direita apresentam as séries temporais do dado observado (azul) e resultado da reanálise (verde), enquanto o gráfico da direita apresenta a Correlação e RMSE pra cada parâmetro. O gráfico superior representa os valores de Hs, o gráfico intermediário apresenta Tp e o gráfico inferior os valores de Dp. Hmax (linha preta), Hs observado (azul) e modelado (verde). O ponto vermelho indica uma <i>rogue wave</i>	54
Figura 15 – Dados observados da região de Fortaleza, estado do Ceará.	62
Figura 16 – Dados observados da região de Recife, estado de Pernambuco.	62
Figura 17 – Dados observados da região de Porto Seguro, estado da Bahia.	63

Figura 18 – Dados observados da região de Vitória, estado do Espírito Santo.	63
Figura 19 – Dados observados da região de Santos, estado do São Paulo.	64
Figura 20 – Dados observados da região de Cabo Frio, estado do Rio de Janeiro.	64
Figura 21 – Dados observados da região de Itajaí, estado de Santa Catarina.	65
Figura 22 – Dados observados da região de Rio Grande, estado do Rio Grande do Sul. .	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das principais informações das reanálises de ondas	23
Tabela 2 – Classificação quanto ao coeficiente de correlação de Pearson sugerida por Devore e Silva (2006)	23
Tabela 3 – Valores de correlação de <i>Pearson</i> e RMSE entre todos os dados observados e os dados do ST4	40
Tabela 4 – Valores de correlação de <i>Pearson</i> e RMSE entre todos os dados observados e os dados do ST6	40
Tabela 5 – Valores de correlação de <i>Pearson</i> e RMSE entre todos os dados observados e os dados do WEVERYS	40
Tabela 6 – Quantificação de cenários extremos em cada região	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	PERGUNTAS CIENTÍFICAS	14
3	OBJETIVOS	15
3.1	Objetivos Específicos	15
4	ÁREA DE ESTUDO	16
4.1	Ventos e Ondas no Norte e Nordeste	16
4.2	Ventos e Ondas no Sudeste e Sul	18
5	METODOLOGIA	20
5.1	Dados Observacionais	20
5.2	Resultados de Modelos Numéricos	21
5.2.1	<i>Multigrid Hindcast</i>	22
5.2.2	<i>WW3-ST6 Global Wave Hindcast</i>	22
5.2.3	<i>Global Ocean Waves Reanalysis WAVERYS</i>	22
5.3	Comparação entre os dados observacionais e modelos numéricos	23
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6.1	Padrão de Ventos	24
6.2	Direção e Período de Onda	29
6.3	Distribuição de densidade de Período	32
6.4	Proporção de ondas locais e remotas	34
6.5	Relação entre Altura e Período de Pico	36
6.6	Comparação entre dados observados e modelos numéricos	39
6.7	Validação das reanálises para ondas com diferentes Períodos de Pico	42
6.8	Análise da correlação com defasagem temporal	45
6.9	Observação e Previsão de eventos extremos	48
7	CONCLUSÃO	55
	REFERÊNCIAS	58
8	SÉRIES TEMPORAIS DE DADOS OBSERVADOS E REANÁLISE DO WAVERYS	62

1 INTRODUÇÃO

Ondas são causadas pelo movimento de energia proveniente de uma fonte geradora, provocando perturbações na interface entre fluidos com diferentes densidades. No oceano, as ondas superficiais de gravidade podem ter diferentes forças causadoras, ocorrendo em todo o planeta. O objeto de estudo deste trabalho são as ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento, que são formadas através da transferência de *momentum* do vento para a superfície do oceano.

As características das ondas de gravidade geradas pelo vento são determinadas diretamente por três principais fatores: a intensidade do vento sobre a superfície do mar, a pista (ou *fetch*) de atuação do vento, e a sua duração. Assim, a transferência de energia da atmosfera para o oceano é limitada tanto pela área como pela duração de atuação do vento. Um vento com intensidade e direção constantes por um tempo suficientemente longo promoverá a evolução do campo de ondas até alcançar um estágio estacionário, independente do seu tempo de atuação (YOUNG, 1999).

Em relação à classificação, as ondas de gravidade geradas pelo vento que se propagam localmente na região onde são formadas, são denominadas como vagas (ou ondas *sea*). Essas ondas se propagam dentro de sua área de geração e constantemente recebem energia do vento. A medida que essas ondas se propagam para fora de sua região de geração, recebem a denominação de marulho (ou *swell*) e não necessitam da transferência de energia do vento para sua propagação por longas distâncias.

O conhecimento do clima de ondas em uma dada região é fundamental para prover segurança marítima para diversas atividades, tais como pesca, esportes náuticos, transporte, indústria de petróleo e gás, planejamento e gestão da zona costeira, entre outras. A transferência de energia na formação de ondas superficiais de gravidade no oceano possui também uma importância no controle climático do planeta, desempenhando um papel fundamental nas trocas de calor, gases e partículas na interface entre o oceano e atmosfera (BOUWS *et al.*, 2018).

Tradicionalmente, a medição de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento é realizada através de ondógrafos acoplados com sensores que medem o deslocamento horizontal e vertical da superfície do mar, fornecendo os principais parâmetros de ondas em um dado ponto no oceano. O uso de ondógrafos permite a vantagem de oferecer uma medição *in-situ*, oferecendo uma maior precisão quando comparado com métodos indiretos de medição, como o sensoriamento remoto ou mesmo a modelagem numérica.

Apesar do avanço e do constante esforço para ampliação de uma rede de monitoramento de ondas ao longo do litoral brasileiro nas últimas décadas, a tarefa de medição de ondas é dispendiosa e dados de ondas ainda são escassos ao longo do litoral, muitas vezes se restringindo a regiões com intensa atividade de exploração de petróleo e gás ou regiões portuárias. Uma vez que custos operacionais da implementação desse tipo de equipamento ainda são altos e fornecem informações limitadas à uma região específica, o uso de modelagem numérica se torna vantajoso para explorar a distribuição espacial das propriedades de onda e prover informações em maior escala espacial e temporal.

A escassez de dados observacionais de longo prazo e disponíveis abertamente para a comunidade torna o conhecimento do padrão e clima de ondas na costa do Brasil ainda incipiente e restrito a poucos trabalhos encontrados na literatura. Uma alternativa para contornar e preencher a lacuna de conhecimento é o uso de modelagem, com no caso de Alves *et al.* (2009), Pianca *et al.* (2010), Silva (2013) que utilizam dados provenientes de modelagem numérica para descrever o comportamento e padrão do clima de ondas ao longo da costa brasileira.

Na costa brasileira, a determinação do padrão de ondas é fundamental também para oferecer suporte a simulações de modelos numéricos de geração e propagação de ondas, auxiliando na prevenção de riscos associados à atividades portuárias, indústria *onshore* e *offshore* e obras de engenharia e proteção costeira, tendo em vista problemas ocasionados por erosão em diversos municípios do país.

2 PERGUNTAS CIENTÍFICAS

Com base nas lacunas científicas apresentadas, elaboramos algumas perguntas que pretendemos responder neste trabalho:

1. Quais são os padrões sazonais de variabilidade de vento e onda ao longo da costa brasileira?
2. Como as reanálises recentes de ondas de superfície representam os padrões de variabilidade observacionais ao longo da costa brasileira?
3. Qual a acurácia de diferentes reanálises numéricas para o padrão de ondas no litoral do Brasil?

3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é descrever a variabilidade sazonal de vento e ondas ao longo do litoral brasileiro e validar um produto de reanálise numérica de ondas.

3.1 Objetivos Específicos

1. Descrever a variabilidade espacial e temporal do padrão de vento e ondas.
2. Avaliar o desempenho de diferentes reanálises quanto à representação do padrão de ondas observacional.
3. Avaliar resposta de diferentes reanálises numéricas para diferentes regiões do Brasil
4. Investigar o comportamento da previsão para ondas *sea* e *swell* ao longo do litoral.

4 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho abrange toda a costa brasileira, compreendendo as latitudes de 34° S a 4° N. De norte a sul na costa brasileira, a plataforma continental varia consideravelmente em largura e declividade, estando sua quebra a mais de 200 km da costa na zona norte (próximo à foz do Rio Amazonas), alcançando o mínimo de apenas 10 km de largura próximo a Salvador e novamente se alargando em direção a sul (>200 km próximo ao Estado de São Paulo). Especificamente, estamos interessados em analisar dados observacionais e saídas de modelos numéricos próximos ou *offshore* ao talude continental (tendo como referência a isóbata de 200 m), para desconsiderar efeitos locais e batimétricos na propagação de ondas superficiais.

Do ponto de vista climatológico, a área de estudo do presente trabalho engloba duas principais regiões com climas bem definidos. A região Norte e Nordeste do Brasil estão situadas na faixa equatorial, apresentando um clima semiárido com chuvas fortemente influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na circulação atmosférica local (NOBRE; SRUKLA, 1996; SOUZA *et al.*, 2000; CHUNG, 1982; XAVIER *et al.*, 2003; FERREIRA; MELLO, 2005). Por outro lado, as regiões Sul e Sudeste do país apresentam como principal característica meteorológica o domínio da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e a entrada de frentes frias nessa região durante o inverno (RODRIGUES *et al.*, 2004; CAVALCANTI, 2016; DEREZYNSKI; MENEZES, 2015). Estes sistemas atmosféricos são os principais responsáveis pela geração e propagação de ondas no litoral brasileiro e serão melhor abordados na seção 4.1 e seção 4.2.

4.1 Ventos e Ondas no Norte e Nordeste

Alguns sistemas atmosféricos são responsáveis pelo padrão meteorológico na região do Nordeste, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCANs), Linhas de Instabilidade, Brisas marítimas e terrestres (FERREIRA; MELLO, 2005).

O padrão do vento superficial que atua na formação de ondas no setor norte do Nordeste é influenciado principalmente pelos ventos alísios que influenciam o posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e seu deslocamento meridional. A ZCIT, comumente chamada de equador meteorológico, pode ser definida como uma banda de nuvens formada pela convergência dos ventos alísios de nordeste e sudeste (WALISER; SOMERVILLE,

1994; FERREIRA; MELLO, 2005; SCHNEIDER *et al.*, 2014). Alterações na localização e intensidade das células de pressão influenciadas pela dinâmica oceânica e trocas de calor afeta o comportamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e, por consequência, os ventos alísios (SILVA, 2003).

Estudos de Fisch (2008) considerando os sistemas meteorológicos atuantes na região, a variabilidade no regime de ventos e suas flutuações sazonais e impactos sobre a estabilidade direcional de ondas de alta e baixa frequência, propõe uma classificação do mar em que as ondas encontradas na região estariam associadas aos ventos alísios de Nordeste, Sudeste e estados de mar associados a tempestades e eventos meteorológicos distantes. Portanto, além do vento local, extensas pistas formadas pelos alísios de NE e SE que se formam sobre o Atlântico Tropical são capazes de gerar ondas na região. Ondulações com períodos de pico mais curto (2 a 5 s) estariam associados a variações no vento local, enquanto ventos alísios de Sudeste e Nordeste seriam responsáveis pela geração de ondas na faixa de 5 a 11,2 s de período (FISCH, 2008).

Além dos ventos alísios, eventos meteorológicos distantes são geradores de ondulações remotas de maior energia e sua compreensão é indispensável para o entendimento do clima de ondas no litoral Norte e Nordeste do Brasil.

Segundo Innocentini *et al.* (2000), um ciclone extratropical formado no Atlântico Norte é capaz de gerar ondas que alcançam o Norte do Brasil com período de pico de cerca de 15 s. Esses ciclones que possuem sua ciclogênese em torno de 60° N, desempenham um importante papel na formação de ondas *swell* que atingem o litoral através de chegadas dispersivas na costa Norte e Nordeste no primeiro semestre do ano (MELO, 1995). Análises de Farias E.G.G; Souza (2012) permitem concluir que ondas *swell* com períodos de 16 s na região foram formadas por tempestades em médias latitudes no Atlântico Norte entre 25°N e 50°N, com intensidades máximas de 19 m/s. Por outro lado, o setor sul do Nordeste recebe ondulações geradas por ciclones extratropicais no Atlântico Sul durante o período do inverno austral (INNOCENTINI ARANTES; MICHELETO, 2005).

O padrão de ondas superficiais geradas pelo vento encontradas na região Norte e Nordeste é influenciado pela ação dos ventos alísios na geração de ondas de maior frequência e menor energia (*sea*), e eventos meteorológicos remotos que geram ondulações de menor frequência e maior energia (*swell*).

4.2 Ventos e Ondas no Sudeste e Sul

A circulação atmosférica no Atlântico Sul exerce influência significativa sobre o padrão atmosférico da região, sendo o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) um dos principais elementos determinantes nesse contexto. O ASAS é o principal sistema meteorológico que atua durante todo o ano na região sobre o oceano que, juntamente com frentes frias, ciclones e outros sistemas de mesoescala, influenciam diretamente o padrão de vento e ondas (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015).

Na região sul, frentes frias associadas a ciclones extratropicais possuem uma frequência de 3 a 4 ocorrências por mês, e se deslocam geralmente de sudoeste para nordeste. Apesar dessas frentes ocorrerem em praticamente todos os meses do ano, estudos de Rodrigues *et al.* (2004) apontam para uma ocorrência ligeiramente maior durante os meses de primavera na região Sul.

Nessa área, é observada uma prevalência de ventos provenientes das direções Norte, Nordeste e Leste, com rajadas de intensidade variável, devido o deslocamento do ASAS. Durante os meses de verão, o ASAS se desloca para sul, chegando em torno de 32° S, quando apresenta ventos de baixa intensidade. No inverno, seu centro de alta pressão se desloca para norte, em torno de 27° S, aproximando-se do continente com ventos mais intensos (DERECZYNSKI; MENEZES, 2015). Os ventos associados ao ASAS nessa região são preponderantes na formação de ondas locais de menor energia que geralmente apresentam mesma direção do vento.

Segundo Alves e Melo (2001), os ventos no Atlântico Sul são altamente influenciados pelo ASAS sobre o oceano, onde os ventos de Nordeste do ramo oeste do giro anticiclônico persistem sobre o litoral Sul do Brasil. Este padrão é constantemente modificado pela passagem de frentes frias que se deslocam de Sul e Sudoeste para Nordeste (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Simultaneamente, ondas de maior energia na região são formadas devido a presença de ciclones extratropicais e pela passagem de frentes frias. Campos (2009), analisando ondas na Bacia de Campos associadas à ciclones extratropicais, concluiu que as maiores ondulações que atingem a região são oriundas de Sudeste, geradas por ciclones durante o inverno e outono. Adicionalmente, estudos sobre padrões atmosféricos apontam a existência de algumas áreas favoráveis à ciclogênese nas latitudes entre 42°S e 57° S, com ciclones que se deslocamento de Oeste para Leste ou para Sudeste (PARISE *et al.*, 2009; TOZZI; CALLIARI, 1999).

Portanto, o padrão de ondas na região Sudeste e Sul do Brasil é influenciado principalmente pela circulação atmosférica do Oceano Atlântico Sul e por ondulações geradas pela

entrada de sistemas frontais e ciclones extratropicais.

5 METODOLOGIA

5.1 Dados Observacionais

Os dados observados de onda e vento utilizados neste trabalho são provenientes de 6 boias do Programa Nacional de Boias (PNBOIA) da Marinha do Brasil (MB) instaladas ao largo da costa brasileira entre 50 e 200 m de profundidade (Figura 1). Essas boias, do modelo *3-Meters* fabricadas pela *Axys Technologies Inc*, são equipadas com um sensor de medição de ondas do tipo *Triaxys*, que determinam os principais parâmetros de ondas através de um conjunto de acelerômetros e sensores angulares que realizam medições das acelerações nos eixos espaciais (x , y e z) e movimentos de *pitch*, *heave* e *roll*.

Foram utilizados os dados disponibilizados publicamente que consistem em medições horárias de Direção e Intensidade de Vento, Altura Significativa (H_s), Período de Pico (T_p) e Direção Média de Onda (Mwd). Estes dados são resultados de um pré-processamento do equipamento e são enviados via satélite a cada 1h.

Uma vez que os dados de Direção Média de Onda (Mwd) representam uma média de todas as direções do espectro de energia, essas informações podem não ser apropriadas para uma região com mar bimodal com ondas de diferentes direções e frequências. Assim, os dados brutos das boias foram solicitados no intuito de realizar uma extração da Direção de Pico (D_p), direção associada à frequência mais energética do espectro direcional de energia de ondas. Esses dados brutos não são transmitidos via satélite, sendo armazenados na memória interna da própria boia e recolhidos em caso de manutenção do equipamento.

O intervalo temporal dos dados observados disponíveis varia em cada boia e pode ser observado na Figura 1. Desta forma, foram utilizadas apenas boias onde houvessem dados suficientes que compreendessem variações sazonais ao longo de um ano, onde a maior série temporal abrange um conjunto de 4 anos de dados referente à boia de Santos e a menor série de dados é proveniente da boia de Porto Seguro, com aproximadamente 1 ano de dados. Para cálculo de médias mensais, foram utilizadas apenas meses onde houvesse pelo menos 360 registros de dados de ondas (aproximadamente 15 dias).

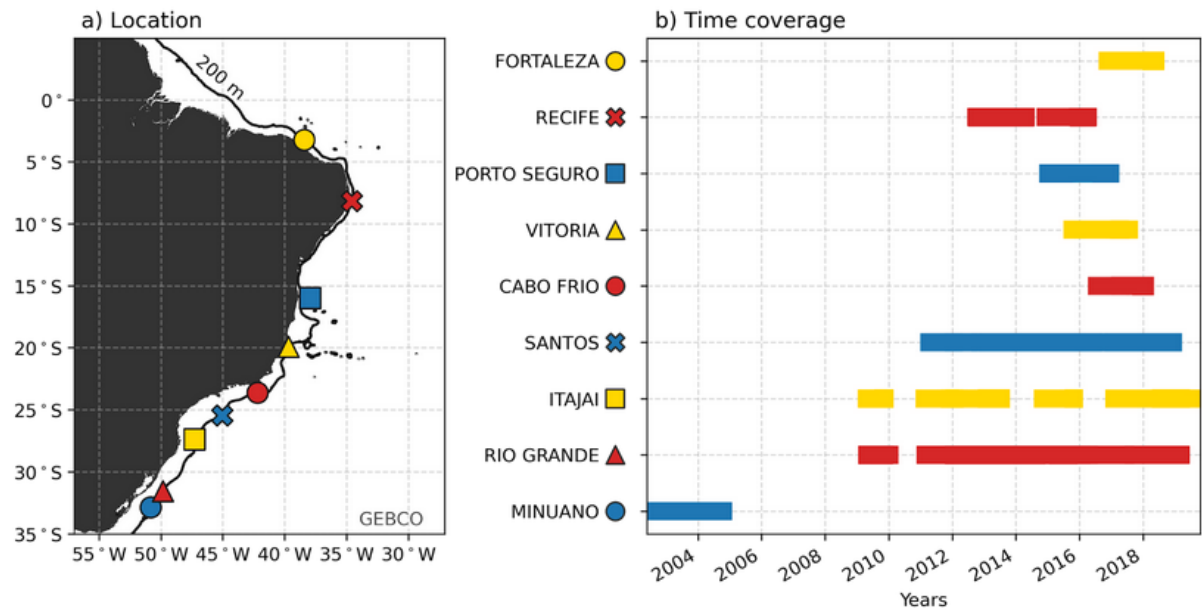


Figura 1 – Mapa da área de estudo com a localização das boias utilizadas neste trabalho. A linha batimétrica marca a profundidade de 200 m. O gráfico à direita representa o intervalo temporal dos dados de cada uma das boias. Cortesia de Iury Simoes-Sousa.

5.2 Resultados de Modelos Numéricos

Os resultados de modelagem numérica utilizados neste trabalho são provenientes de 3 produtos de reanálises globais de ondas. O primeiro conjunto de dados diz respeito ao *Multigrid Hindcast* (NOAA/NCEP), o segundo é resultado de uma simulação realizada por (LIU *et al.*, 2021), pela *University of Melbourne* na Austrália, e o terceiro produto se refere ao *Global Ocean Waves Reanalysis WAVERYS* (CMEMS).

Os parâmetros de onda extraídos dos resultados de modelagem são: Altura Significativa (H_s e H_{m0}), Período de Pico (T_p) e Direção de Pico (D_p). Todas as forçantes, resoluções espaciais, temporais, parametrizações e informações sobre cada uma das reanálises foram sintetizadas e estão disponíveis na Tabela 1.

A comparação de cada produto de modelagem com os dados observacionais busca a determinação da melhor reanálise para as regiões e compreender o erro associado à previsão de ondas com menores e maiores períodos de pico. Todos os dados são de livre acesso e podem ser baixados via internet.

5.2.1 *Multigrid Hindcast*

O primeiro produto corresponde ao conjunto de dados *Multigrid Hindcast*, resultado de uma reanálise global de ondas realizada com o modelo numérico de geração e propagação de ondas WAVEWATCH III, desenvolvido pela *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP/NOAA). Essa reanálise utiliza como input campos de vento e gelo provenientes do *Global Forecast System* (GFS/NCEP) e usa dados de batimetria do ETOPO-1 em sua grade. Suas saídas possuem resolução espacial de $1/2^\circ$ e temporal de 3 h. A reanálise em questão utiliza o pacote físico ST2 (TOLMAN; CHALIKOV, 1996) para os dados até julho de 2015 e, após isso, utiliza o pacote ST4 (ARDHUIN *et al.*, 2010) ¹.

5.2.2 *WW3-ST6 Global Wave Hindcast*

A reanálise WW3-ST6 também utiliza o WAVEWATCH III, mas empregando o pacote físico ST6 (LIU *et al.*, 2021). Esta reanálise utiliza duas forçantes nos campos de ventos provenientes do CFS/NCEP e do ERA5, onde foi escolhida para a modelagem forçada com a reanálise de ventos do CFS/NCEP. Os resultados dessa reanálise cobrem o período de 2011 a 2019. A grade numérica possui resolução espacial de $1/4^\circ$ e temporal de 3 h e utiliza as parametrizações físicas do pacote ST6.

O pacote ST6 possui parametrizações que incluem input de vento (S_{in}), termo de dissipação e quebra de onda (S_{ds}), decaimento de onda baseado em observações (S_{wl}), interações não lineares de onda (S_{nl}) (HASSELMANN, 1962; HASSELMANN *et al.*, 1985), fricção e dissipação de fundo (JONSWAP) (S_{bf}) (HASSELMANN *et al.*, 1973) e quebra de onda induzida pela profundidade (BATTJES; JANSSEN, 1978). O termo de dissipação e quebra (S_{ds}) leva em consideração a inclinação de ondas e a quebra induzida pela propagação de ondas mais curtas. O decaimento de onda (S_{wl}) diz respeito à perda de energia como resultado da turbulência gerada por movimentos orbitais (LIU *et al.*, 2021).

5.2.3 *Global Ocean Waves Reanalysis WAVERYS*

A reanálise global de ondas WAVERYS é um produto do *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS/ECMWF). Esta reanálise utiliza o MFWAM, modelo numérico global de ondas de terceira geração que calcula o espectro de energia direcional de

¹ Os dados de reanálise foram obtidos em <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/hindcasts/prod-multi_1.php>

ondas. Suas forçantes atmosféricas são dados de vento e gelo do ERA5 e sua batimetria é proveniente do ETOPO-2, com assimilação de dados de Altura Significativa de Onda (Hs) obtidos por altímetros em satélites dos programas ERS1, Topex/Poseidon, Sentinel-3, entre outros. Essa reanálise cobre um intervalo temporal de 1993 a 2020, possuindo a maior resolução espacial entre as três reanálises, com $1/5^\circ$ e resolução temporal de 3 h.

Tabela 1 – Resumo das principais informações das reanálises de ondas

	Modelo	Forçante	Período	Física	Resolução
Multigrid Hindcast	WAVEWATCH III	GFS/NCEP	2005-2015	ST4	0,5°
WW3-ST6 Global Wave Hindcast	WAVEWATCH III	CFS2/NCEP	2011-2019	ST6	0,5°
WAVERYYS	MFWAM	ERA5	1993-present	ST4	0,2°

5.3 Comparação entre os dados observacionais e modelos numéricos

Para avaliação da Correlação de Pearson, adota-se aqui os indicadores de correlação sugeridos por Devore e Silva (2006), que considera que os valores de correlação podem assumir classificações conforme observado na Tabela 2

Para efeito de comparação dos resultados obtidos pelas reanálises de ondas com os dados observados, serão utilizados os parâmetros estatísticos Raiz do Erro Médio Quadrático (*RMSE*) e o Coeficiente de Correlação de Pearson (ρ) conforme as equações 5.1 e 5.2 abaixo, onde x e y representam os dados observados e os resultados dos modelos, respectivamente.

Tabela 2 – Classificação quanto ao coeficiente de correlação de Pearson sugerida por Devore e Silva (2006)

Classificação	Intervalo
Muito fraca	0,00 a 0,19
Fraca	0,20 a 0,39
Moderada	0,40 a 0,69
Forte	0,70 a 0,89
Muito Forte	0,90 a 1,00

Fonte: (DEVORE; SILVA, 2006)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - y)^2} \quad (5.1)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5.2)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Padrão de Ventos

A caracterização do padrão de ventos em uma dada região é um fator determinante para a compreensão do clima de ondas. Analisaremos, portanto, os diferentes padrões estatísticos de direção e intensidade do vento apresentados em distintas regiões do litoral brasileiro.

No litoral norte do Brasil, na região de Fortaleza, a análise dos padrões estatísticos de direção e intensidade do vento revela características interessantes em relação às outras boias. A direção do vento nessa região é predominantemente do quadrante Leste e Sudeste, correspondendo 89,3% dos registros. A velocidade média apresentada nessa região foi de 8,8 m/s, com velocidade máxima de 16 m/s. As maiores intensidades de vento nessa boia ocorrem de Sudeste, onde neste quadrante a intensidade do vento geralmente se encontra acima de 9 m/s (Figura 2).

No setor leste do Nordeste, a região de Recife apresenta como principais direções de vento os quadrantes Leste, Sudeste e Sul, totalizando 91% dos registros nessa boia, com destaque para direção Sudeste com 52% dos registros. A velocidade média nessa boia apresentou valor de 6,5 m/s e máxima de 22,3 m/s. A maior ocorrência de registros ultrapassando 9 m/s podem ser observadas do quadrante Sudeste. As velocidades mais baixas são encontradas em todos os quadrantes de maneira uniforme.

Com base nos dados, é possível observar um padrão direcional bem característico da região equatorial observado nas boias de Fortaleza e Recife, com uma influência direta dos ventos alísios de Sudeste influenciando a região.

Em direção à região Sul do Nordeste, próximo do paralelo de 16° S, a boia de Porto Seguro apresentou ocorrências de direções bem dispersas, com quadrantes variando de Norte, Nordeste, Leste e Sudeste correspondendo 86,2% dos registros, com predominância do quadrante Nordeste e Leste, com 27,9% e 28,7% respectivamente. A velocidade média observada foi de 6,4 m/s, com máxima de 22,2 m/s. As ocorrências de maiores intensidades de vento nessa região foram do quadrante Sudeste e Nordeste.

Mais ao sul do Brasil em direção à região Sudeste, a boia de Vitória apresenta um padrão bimodal com valores diametralmente opostas da direção do vento. Em geral, essa região apresenta um padrão bem definido de ventos provenientes de duas principais direções, a primeira correspondendo ao quadrante Norte e Nordeste, com 42,8% dos registros, e a segunda

compreendendo o quadrante Sudoeste com 14% dos registros. A intensidade média do vento observado na região foi de 7,1 m/s e máxima de 19,3 m/s, com maiores intensidades provenientes de Nordeste e Sudoeste.

Ainda na região Sudeste, a boia de Cabo Frio apresenta ocorrências principalmente do quadrante Nordeste e Leste, correspondendo 61,2% dos registros. O quadrante Sudeste, Sul e Sudoeste representam aproximadamente 24,1% das ocorrências registradas nessa boia. A velocidade média foi de 7,9 m/s e máxima de 16,6 m/s. As maiores velocidades são encontradas principalmente de Nordeste, com valores ultrapassando 12 m/s correspondendo quase 9% das ocorrências totais.

Mais ao Sul, a boia de Santos apresenta um padrão relativamente semelhante a da boia de Cabo Frio, com uma incidência mais dispersa em outros quadrantes, mas ainda com predominância de Nordeste e Leste com 41,1% dos registros totais. Em menor escala, mas com ocorrência considerável, os quadrantes Sudeste, Sul e Sudoeste apresentam 11,9%, 10,1% e 7,9% das ocorrências respectivamente. A velocidade média encontrada foi de 6,7 m/s e máxima de 20,1 m/s. As maiores velocidades nessa boia foram prioritariamente do quadrante Nordeste, onde apresentou velocidades acima de 12 m/s.

Na região Sul do país, a boia de Itajaí apresentou direções de incidência mais dispersas, com uma distribuição bem uniforme em praticamente todos os quadrantes. Vale destacar ainda registros levemente mais frequentes do quadrante Norte e Nordeste apresentando 31% das ocorrências dessa boia. Os quadrantes Leste, Sudeste, Sul, Sudoeste e Noroeste apresentam cada um individualmente entre 9 e 11% das ocorrências. A velocidade média nessa região foi de 7,8 m/s, com velocidade máxima de 54 m/s. Nessa boia, velocidades maiores que 9 m/s tendem a adentrar na região provenientes dos quadrantes Norte e Nordeste. Velocidades mais elevadas, acima de 12 m/s são observadas prioritariamente do quadrante Sudoeste, com ocorrência de 3,1% dos registros totais.

No extremo Sul do litoral Brasileiro, apesar da boia de Rio Grande apresentar uma dispersão consideravelmente elevada nas direções de vento, pode-se observar uma maior ocorrência de registros provenientes de Nordeste e Leste correspondendo 35% dos registros. Percebe-se ainda uma ocorrência levemente superior de Sudoeste e Oeste, apresentando 12,5% e 10,5% dos registros, respectivamente. A velocidade média nessa região foi de 8 m/s e velocidade máxima registrada foi de 48,9 m/s. Nessa região, velocidades entre 6 e 12 m/s tendem a incidir do quadrante Nordeste e Leste. Apesar de relativamente raros (menos de 2% das ocorrências),

registros acima de 15 m/s foram registrados provenientes do quadrante Sudoeste e Oeste.

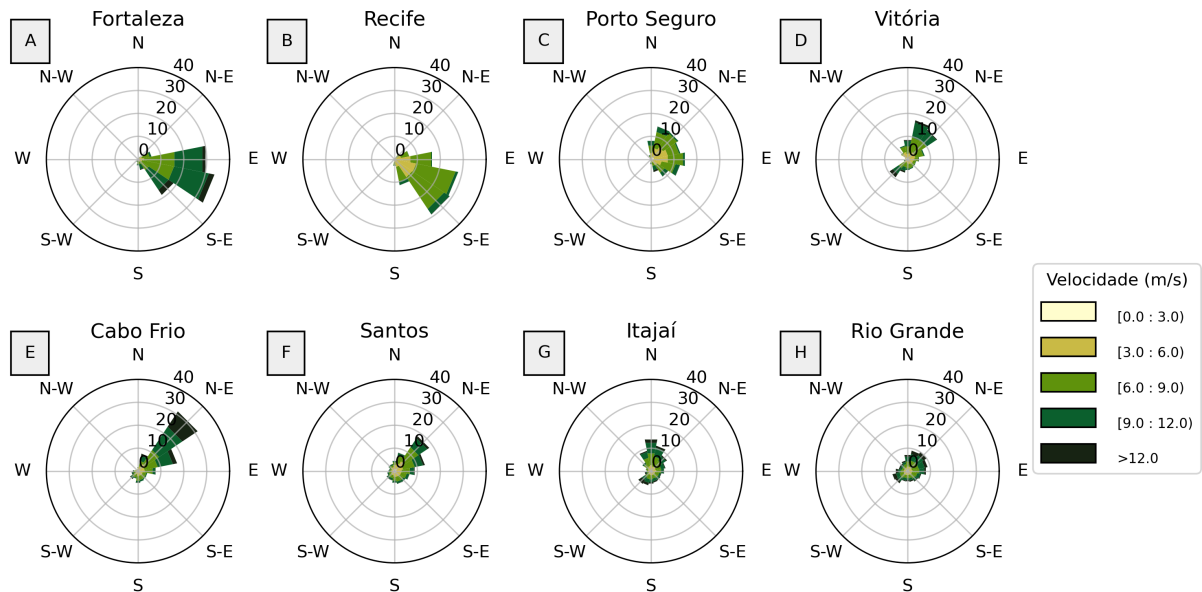


Figura 2 – Rosa dos ventos obtidas em cada boia apresentando a intensidade do vento associada aos quadrantes obtidos. Cores mais escuras representam velocidades maiores.

Analisando as médias mensais de intensidade do vento e as direções mais frequentes naquele mês para todas as boias, percebe-se dois diferentes padrões marcados por uma sazonalidade anual entre as diferentes regiões, de acordo com a Figura 3.

Nas boias de Fortaleza e Recife, situadas em 3.2° S e 8.2° S, respectivamente, nota-se uma variação na direção e intensidade do vento de maneira semelhante. Em Fortaleza, ventos mais intensos apresentam médias entre 10 e 11 m/s nos meses de agosto, setembro e outubro predominantes do quadrante ESE e SE. Por outro lado, durante os meses de dezembro a março, o vento sofre uma variação para o quadrante E e apresenta menores intensidades em fevereiro, março e abril, com médias de 6 a 7 m/s.

Em Recife, situada aproximadamente 5° ao sul de Fortaleza, o vento possui um comportamento de variação semelhante ao encontrado em Fortaleza, apresentando velocidades médias menores com valor máximo de 7 e 8 m/s em julho e agosto e mínimo em abril com 5 m/s. Recife apresenta uma incidência predominante de S/SE em boa parte do ano, variando para SE em junho, julho e agosto.

Essa variação na direção e intensidade na região equatorial parece estar intimamente relacionada à mudança no comportamento dos ventos alísios e ao deslocamento meridional da ZCIT. Durante o verão austral, a ZCIT se encontra em sua posição mais ao sul, enquanto que no

inverno austral, sofre deslocamento para norte, modificando a direção e intensidade dos ventos na região equatorial e influenciando diretamente a pista de ventos na região.

De maneira geral, Recife apresentou ventos menos intensos que Fortaleza, com uma sazonalidade semelhante tanto na direção como na intensidade provocadas pelas oscilações dos ventos alísios como consequência do deslocamento da ZCIT para sul durante o verão austral e para norte durante o inverno, uma vez que as duas boias se encontram próximas da região equatorial.

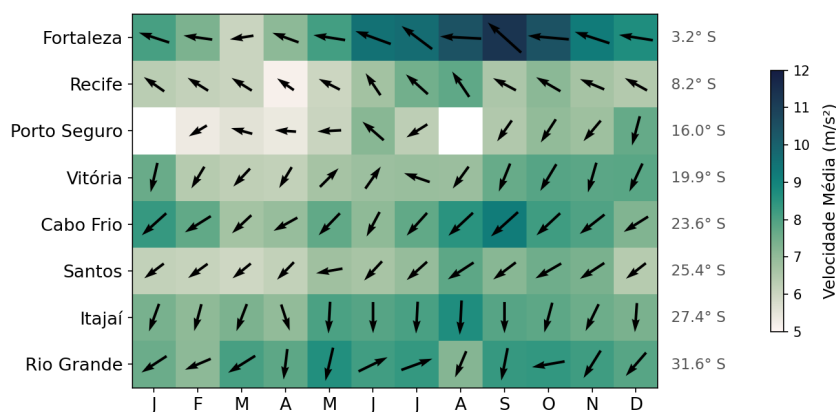


Figura 3 – Sazonalidade espacial e temporal de intensidade e direção de ventos encontrados nos dados observados. As setas indicam a velocidade e direção mais frequente naquele mês e as cores representam as intensidades.

Na região sul do Nordeste, a boia de Porto Seguro (situada em 16° S), apresentou as menores velocidades médias de vento de todo o litoral brasileiro, com pouca variação em intensidade ao longo do ano com média em torno de 5 a 6 m/s nos meses de fevereiro a maio e máxima de 8 m/s em junho. A direção predominante dos ventos nessa região é de E variando para NE e NNE entre setembro e dezembro. Os meses de janeiro e agosto não possuem dados suficientes para realizar uma média mensal.

Na região Sudeste, situada na Bacia do Espírito Santo, a boia de Vitória (em 19,9° S) apresenta uma incidência de ventos do quadrante NE ao longo de quase todo o ano, com uma incidência de S e SW entre os meses de maio e junho. Em termos de intensidade, essa região apresentou poucas variações ao longo do ano. Fevereiro, março e abril apresentou as menores médias, variando de 5 a 6 m/s, enquanto o período entre setembro e janeiro apresentaram intensidades entre 6 e 7m/s. Percebe-se que as maiores médias mensais de intensidade do vento nessa região apresentam maiores frequências do quadrante NE. Em trabalho de Malacarne e

Ribeiro (2018), a região de Vitória apresenta ventos menos intensos provenientes de S em abril, maio e junho e ventos mais intensos de N e NE entre setembro e outubro, corroborando com os resultados aqui encontrados.

As boias de Cabo Frio e Santos apresentaram um comportamento semelhante no que diz respeito às variações de direção do vento. No geral, as duas boias apresentaram maiores frequências na direção NE em quase todo o ano. Em Cabo Frio, ventos mais intensos são encontrados nos meses de janeiro, fevereiro, agosto e setembro com média mensal de 8 a 10 m/s com direção de NE, e menor intensidade em março com média de 6 m/s e direção proveniente de E. Em Santos, os ventos apresentam menores intensidades, apresentando uma intensificação entre agosto e novembro, com velocidades entre 6 e 7 m/s, e menores intensidades entre dezembro e abril, com valores em torno de 5 e 6 m/s.

As boias de Itajaí e Rio Grande apresentam uma sazonalidade semelhante no que diz respeito às variações na intensidade do vento, mas com direções diferentes entre si. Itajaí apresenta uma incidência predominante do quadrante N e NNE durante boa parte do ano. Em Rio Grande as direções mais frequentes foram de NE, com mudanças para incidência de NNE em abril, maio, agosto e setembro. Ventos de SW são mais frequentes em junho e julho, período do ano em que comumente essa região apresenta ventos mais intensos provenientes dessa direção influenciados pela entrada de frentes frias.

Em termos de intensidade, as duas regiões apresentam valores relativamente constantes, com médias mensais entre 7 e 9 m/s. Em Itajaí, é possível observar um aumento nas velocidades médias de vento a partir do mês de maio, com valores ultrapassando 7 m/s com máximo em agosto, com 9 m/s. A partir de agosto, há uma tendência de diminuição na intensidade do vento até o início do verão austral, quando os valores médios mensais alcançam de 5 a 6 m/s. Na boia de Rio Grande, ventos mais intensos ocorrem a partir de março, com uma média de 8 a 9 m/s. O período com vento menos intensos nessa região ocorreu em fevereiro, com valores médios em torno de 6 m/s. Em relação à Itajaí, Rio Grande apresenta uma intensidade média de vento superior em boa parte do ano, com exceção do mês de agosto.

De maneira geral, as boias com ventos mais intensos ao longo do litoral brasileiro são Fortaleza, Cabo Frio, Itajaí e Rio Grande. No norte do Nordeste, estes ventos mais intensos são encontrados principalmente entre agosto e outubro e são influenciados pela intensificação dos ventos alísios de SE. Enquanto isso, do sul do Nordeste em direção à região Sul do país, percebe-se uma tendência de intensificação da magnitude do vento e uma maior variabilidade em

sua incidência entre os meses de maio e agosto possivelmente devido a entrada de frentes frias que ocorrem nessa época do ano, modificando o padrão de circulação atmosférica local com a entrada de ventos provenientes de SW, S e SE.

6.2 Direção e Período de Onda

Para compreendermos a distribuição de frequências de ondas em termos de período e direção, a Figura 4 representa um histograma circular de Direção de Pico (Dp) e Período de Pico (Tp), indicando a porcentagem de ocorrências de ondas em cada uma das regiões. Num primeiro momento, a análise geral da Figura 4 sugere características de um mar bimodal para todas as boias, evidenciando ondas de diferentes períodos com direções distintas em cada região. Analisando individualmente cada região e compreendendo relações de similaridade, podemos observar alguns padrões ao longo do litoral.

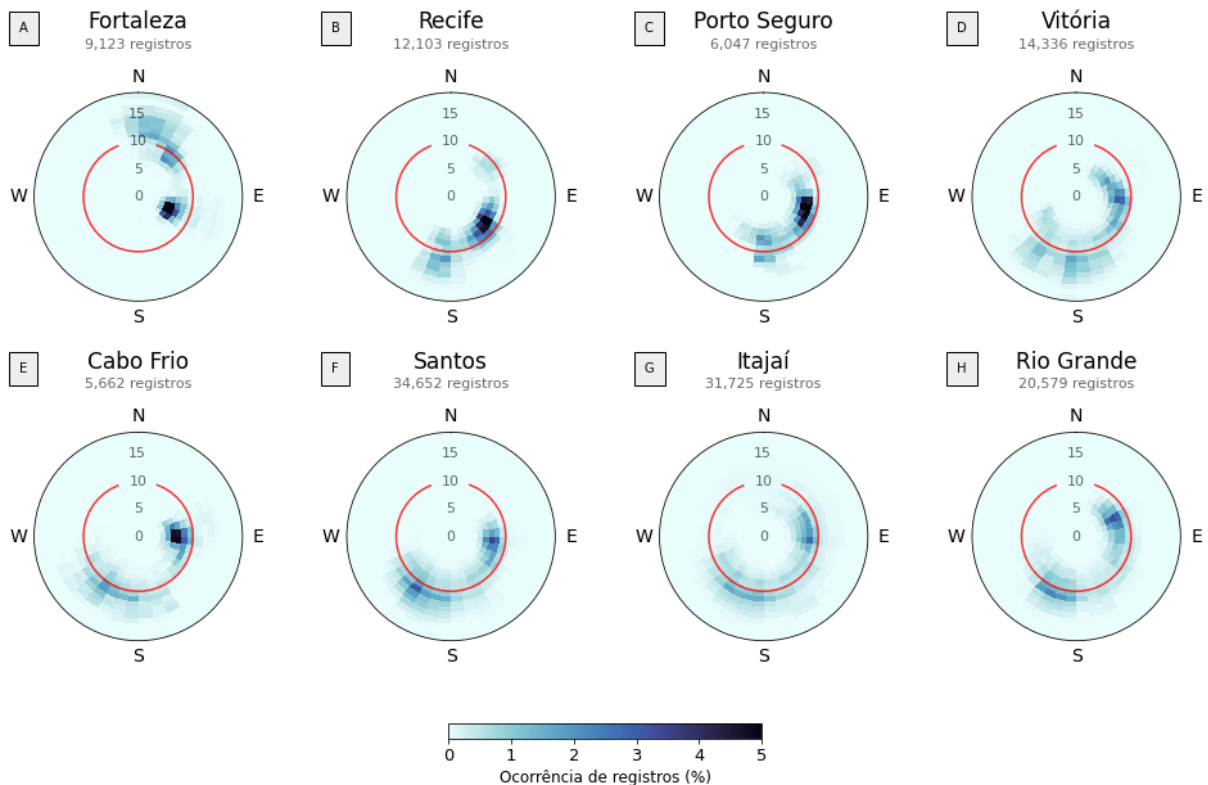


Figura 4 – Histograma direcional de Direção (Dp) e Período de Pico (Tp) de onda dos dados observados. Cores mais intensas representam maiores ocorrências de ondas naquela respectiva direção e período. A linha vermelha divide ondas com Tp menores e maiores que 10 s.

Aproximadamente 70% dos registros de ondas em todo o litoral brasileiro possuem

Tp entre 4 e 9 s, com valores médios em torno de 7 a 8 s, o que indica um regime predominante de ondas de baixo período e formadas localmente, caracterizadas como ondas tipo *sea*. Essas ondas apresentam uma direção de incidência mais uniforme em cada região, com maior frequência de ocorrência e geralmente seguindo o padrão de ventos da região próxima.

Ondulações com Tp acima de 10 s são observadas em todas as regiões e apresentam uma média de aproximadamente 12 s de Tp com uma distribuição direcional ampla variando ao longo do litoral. Em geral, essas características estão associadas a ondulações tipo *swell*, formadas por tempestades ou eventos meteorológicos distantes que formam ondas que alcançam o litoral brasileiro.

Situadas na região Nordeste e próximas à região equatorial, as boias de Fortaleza e Recife apresentam um comportamento semelhante nos registros com Tp menores que 10 s. Neste intervalo, Fortaleza possui uma grande concentração de registros entre 5 e 8 s provenientes de ESE, correspondendo à 40,3% dos registros. Enquanto isso, para o quadrante ESE e SE, Recife apresenta uma maior concentração entre 6 e 11 s correspondendo à 58% dos registros, com uma direção de incidência mais ampla que a boia anterior, mas demonstrando uma certa similaridade na alta frequência de ondulações de ESE. Vale destacar que Porto Seguro também apresenta uma alta frequência de ondulações neste quadrante, com aproximadamente 56% dos registros nessa região.

Segundo Innocentini Arantes e Micheleto (2005), a região de Fortaleza é diretamente influenciada pela ação dos ventos alísios de SE que são responsáveis pela geração de ondas locais na região equatorial. Os alísios de SE são comumente mais intensos na região com o deslocamento meridional da ZCIT para norte durante o inverno do Hemisfério Sul, sendo o principal responsável por ondulações do tipo *sea* na região.

Ondas com direções de SE apresentam maiores valores de Tp em relação à mesma direção de Fortaleza possivelmente pela orientação geográfica de Recife e Porto Seguro estar mais favorável para entrada de ondulações formadas por uma maior pista de ventos de SE. Devido à sua localização geográfica no norte do Nordeste, Fortaleza fica impedida de receber ondulações de SE de forma significativa, resultando em direções mais orientadas para E, NE e N.

Além disso, percebe-se uma concentração de registros de ondas de NE no intervalo entre 7 e 11 s nas duas regiões, com maior frequência em Fortaleza. Em análises de Fisch (2008), a faixa de Tp correspondente ao intervalo de 8 a 11,2 s em Fortaleza representa um estado de mar associado às ondulações de NE predominantemente encontradas durante o verão, quando a

região é dominada pelos alísios de NE. Este intervalo de T_p na região de Fortaleza corresponde 19,7% dos dados, enquanto Recife se encontra em torno de 5,9% dos registros. Possivelmente a menor frequência de ondas de NE na região de Recife se deve à posição latitudinal da boia estar mais distante da área de influência direta dos ventos alísios de NE.

Ondulações provenientes de N, NNE e NNW encontradas na região de Fortaleza com T_p entre 11 e 15 s corrobora outros trabalhos. Fisch (2008) destaca a faixa de 11 a 18 s como o intervalo mais energético de ondas nessa região. Essas ondulações geralmente estão associadas a chegadas dispersivas de ondas *swell*, formadas por ciclones extratropicais no Atlântico Norte que alcançam Fortaleza durante o inverno no Hemisfério Norte, entre dezembro e março (MELO, 1995).

Na boia de Vitória, para as ondulações de menor energia com T_p menores que 10 s, é observado um crescimento no T_p acompanhado de uma mudança de direção de NE para E, com maiores ocorrências entre 8 e 9 s provenientes do quadrante E. Nessa região, ondulações com menores valores de T_p são observadas com mais frequência entre E, ENE e ESE, com T_p entre 5 e 10 s correspondendo 43% dos registros. Por outro lado, ondulações com T_p maiores que 10 s podem ser observadas de SSE, S e SW, com maiores ocorrências entre 11 e 14 s, correspondendo 17,2% das ondas encontradas nessa região.

A região Sudeste do Brasil tem seu clima de ondas caracterizado pela ocorrência de um mar local de NE influenciado pelo deslocamento da ASAS ao longo do ano, com ondulações formadas remotamente com maiores T_p provenientes de S, SE e SW originadas por ciclones extratropicais, passagens de frentes frias e pela ação do anticiclone polar no Hemisfério Sul (NOGUEIRA, 2014; PARENTE *et al.*, 2015). Segundo Nogueira (2014), ondulações provenientes de E e NE com T_p entre 6 e 8 s na região da Baía do Espírito Santo estão geralmente associadas ao domínio do ASAS na circulação atmosférica local com ventos de N e NE, o que corrobora com os registros encontrados neste trabalho.

Ainda na região Sudeste e indo para a região Sul, as boias de Cabo Frio, Santos e Itajaí apresentam comportamentos semelhantes e apresentam uma grande quantidade de ondas com T_p abaixo de 10 s provenientes de E. Essas boias apresentam maiores ocorrências em torno de 6 a 9 s provenientes de E, correspondendo à 39,9% em Cabo Frio, 24,9% em Santos e 20,9% em Itajaí.

Para as ondas com T_p maiores que 10 s, Cabo Frio, Santos e Itajaí apresentam uma concentração no intervalo entre 10 e 12 s provenientes de SSW e SW, com média de 11,8 s

para as ondulações dessa direção. Assim como Vitória (ao norte), essas boias estão sujeitas aos padrões atmosféricos que influenciam o clima de ondas na região Sudeste, predominando um mar local proveniente de E e ENE com ondulações longínquas de S e SW.

A região de Rio Grande apresenta uma alta frequência de ondulações de NE com T_p abaixo de 10 s e ondulações de SW entre 9 e 13 s. No que se refere às ondulações com menores valores de T_p , o intervalo entre 6 e 9 s corresponde à 30,5% dos registros encontrado em toda a região, com uma média de 7,5 s. Para as ondulações com T_p acima de 10 s percebe-se uma maior ocorrência no intervalo entre 10 e 12 s compreendendo 14,8% do total de registros nessa região.

A análise da distribuição de frequências de ondas ao longo do litoral brasileiro revelou padrões interessantes. Em geral, a maioria dos registros apresentou T_p entre 4 e 9 s, indicando a predominância de ondas de baixo período formadas localmente. As direções de incidência das ondas variaram em cada região, seguindo o padrão dos ventos locais. Ondulações de longo período (acima de 10 s) foram observadas em todas as regiões e estão associadas à ocorrência de *swell*.

De maneira resumida, Fortaleza foi a única que apresentou ondulações provenientes do quadrante N, onde neste quadrante apresentou valores de T_p consideravelmente elevados, enquanto o restante das regiões apresentou ondas nos quadrantes SE, S e SW para maiores valores de T_p . Em relação às ondulações com menores períodos de pico, as regiões de Recife e Porto Seguro apresentam semelhanças, com incidências de SSE e S. Vitória, Cabo Frio e Santos apresentaram ocorrências de E e ENE, enquanto Itajaí e Rio Grande apresentaram ondulações principalmente de NE e NNE (Figura 3).

6.3 Distribuição de densidade de Período

O *Kernel density estimation* (KDE) é uma forma não paramétrica para estimar a densidade de uma variável aleatória num conjunto de dados. Utilizando uma função de estimativa de densidade para os valores de T_p (Figura 5), é possível notar um padrão de comportamento semelhante em praticamente todas as boias, indicando um regime de ondas com pelo menos dois picos de T_p . O primeiro pico do gráfico indica que ondas com T_p em torno de 8 s como as ondas mais frequentes, referente às ondas tipo *sea*. O segundo pico se encontra na região entre 11 s e 13 s, indicando um estado de mar associado à ondulações geradas remotamente que alcançam o litoral brasileiro como ondas do tipo *swell*.

Diferente das outras boias, Fortaleza (linha azul na Figura 5) apresenta um pico na

densidade de ocorrência no intervalo próximo de 6 s, o que possivelmente indica um estado de mar local menos energético que os encontrados nas outras regiões que giram em torno de 7 a 8 s. Ainda em Fortaleza, o segundo pico por volta de 13 s apresenta uma curva menos acentuada e mais linear em direção aos valores de T_p próximos a 17 s, com uma área abaixo da curva levemente maior que as outras regiões. O comportamento apresentado na distribuição de densidade de T_p para Fortaleza possivelmente indica que essa região apresente maiores ocorrências com valores de T_p mais elevados quando comparado à outras regiões.

Nota-se ainda um outro comportamento interessante. As regiões de Recife (verde) e Porto Seguro (laranja) apresentam uma maior densidade de frequência próximo de 7 e 8 segundos quando comparadas às demais regiões. Isso sugere que essas regiões apresentam ondas com menores valores de T_p mais frequentes do que as demais regiões, e possivelmente, menores ocorrências de ondulações tipo *swell*.

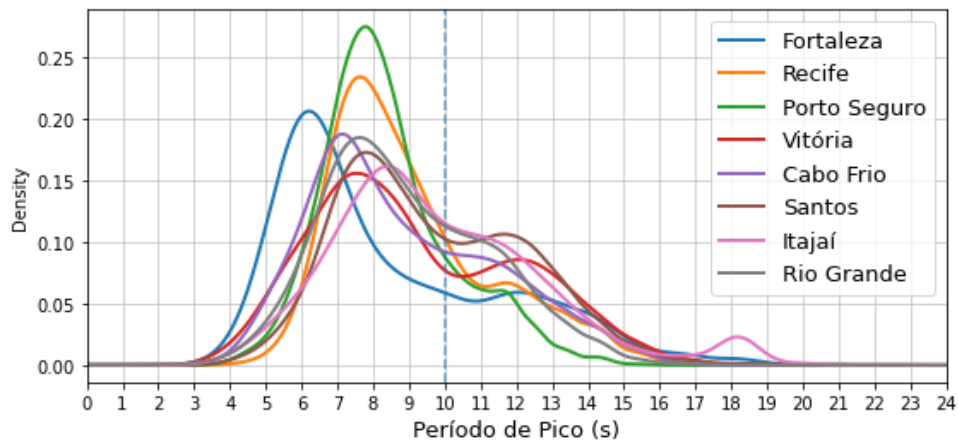


Figura 5 – Estimativa de Densidade de Kernel (KDE) para os dados observados de Período de Pico.

Vale destacar também o comportamento da boia de Porto Seguro, que apresenta um pico de densidade mais elevado em relação às outras regiões, com um T_p de 7,9 s. Essa mesma região não apresentar um pico tão elevado na densidade das ondulações com T_p acima de 10 s, o que pode indicar que essa região possui pouca influência de ondulações do tipo *swell* em seu regime de ondas.

É perceptível através da Figura 5 que o regime de ondas na costa brasileira apresenta um padrão de mar bimodal, onde praticamente todas as regiões possuem pelo menos um estado de mar associado às ondas locais com menores valores de T_p (e menor energia) mais frequentes, e um outro estado de mar associado às ondas remotas com maiores valores de T_p (maior energia)

e menor frequência de ocorrência. Este padrão parece evidenciar um intervalo aproximado de 10 s como a divisão entre os picos de densidade nessas regiões. Portanto, para análise do regime de onda e comparação com os resultados das reanálises, será realizada uma divisão entre duas categorias de ondas, a primeira com períodos de pico menores que 10 s como um padrão de onda local tipo *wind-sea*, e ondas acima de 10 s como ondulações remotas do tipo *swell*.

6.4 Proporção de ondas locais e remotas

Adotando a divisão entre ondulações com T_p abaixo de 10 s como ondas tipo *sea* e ondas com T_p acima de 10 s como *swell*, a Figura 6 apresenta a proporção entre registros de onda do tipo *swell* em relação ao total de registros encontrados mensalmente. Realizaremos uma análise para identificar os meses com maiores ocorrências de ondas do tipo *swell* a fim de compreender a sazonalidade dessas ondulações ao longo do litoral brasileiro.

Em Fortaleza, nota-se que os meses com mais registros de ondulações do tipo *swell* foram os meses de dezembro a março, com maior frequência no mês de fevereiro e abril com 56% e 62% dos registros de ondas nesses meses. Esses meses com maiores ocorrências corroboram os resultados encontrados nos trabalhos de Melo (1995) e Candella (2019). Ainda de acordo com a Figura 6, ondas *sea* com T_p menores que 10 s são encontradas em todos os meses do ano, apresentando maiores ocorrências entre julho e setembro, período do ano onde geralmente eventos meteorológicos distantes geradores de *swell* não são comuns. Segundo Pianca *et al.* (2010), o setor norte do Nordeste, onde está localizado Fortaleza, possui condições mais energéticas durante os meses de verão do Hemisfério Sul, corroborando os resultados aqui encontrados.

Na região de Recife, é possível perceber que os meses com maior ocorrência de *swell* são abril com 35% e julho e agosto com aproximadamente 41%, enquanto o mês com menor ocorrência foi dezembro com 2%. Ondulações de alta energia no outono e inverno austrais que atingem a região Sudeste e Sul do país parecem influenciar também o clima de ondas na região de Recife, que apresentou alta taxa de ocorrência de *swell* nos meses de abril, julho e agosto.

Comparada às outras regiões, Porto Seguro apresenta menor ocorrência de ondas com T_p maiores que 10 s, indicando que possivelmente ondulações geradas remotamente alcançam com menos frequência essa região. O mês com mais ocorrências de T_p acima de 10 s nessa região foi novembro, apresentando 23% de registros. Os meses de janeiro e agosto não possuíam dados suficientes para calcular uma média.

Em geral, é perceptível a menor ocorrência de ondulações tipo *swell* registradas em Recife e Porto Seguro em relação ao padrão de ondas locais. Enquanto isso, as regiões Sudeste e Sul do Brasil apresentam condições mais frequentes de ocorrência de *swell* entre os meses de março e setembro, com maior frequência entre abril e junho.

Na região Sudeste, a boia de Vitória apresenta maiores ocorrências de ondulações com T_p acima de 10 s em maio e junho, com 54% e 44% nesses meses, respectivamente. Por outro lado, o mês de janeiro e dezembro apresentou os menores registros, com cerca de 19% e 16% de ocorrência de ondulações com T_p acima de 10 s.

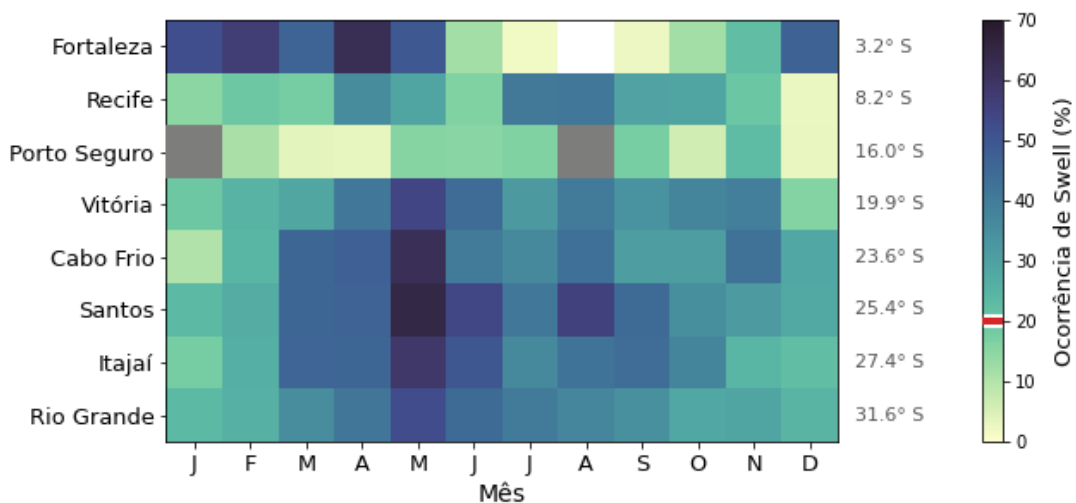


Figura 6 – Proporção de registros de ondas com T_p acima de 10 segundos em relação à todos os registros de onda encontrados em cada mês para cada boia. Meses com registros abaixo de 20% foram desconsiderados da análises.

Cabo Frio, Santos e Itajaí apresentam um comportamento semelhante, com maior taxa de incidência de ondas com T_p acima de 10 s entre março e junho, com mais frequência em maio com 60% a 65% de ocorrência em cada boia. Em Santos, o mês de agosto também apresentou uma elevada concentração de ondulações com T_p acima de 10 s, com 55% dos registros neste mês. Em análises de Pianca *et al.* (2010), ondas com T_p no intervalo entre 10 e 12 s são encontradas com certa frequência no outono ultrapassando 20% dos registros nas regiões próximas à Vitória, Cabo Frio e Santos.

Rio Grande apresenta um padrão bem marcado que acompanha as tendências das outras boias na região Sudeste e Sul, apresentando um aumento de ocorrências de ondulações com T_p maiores à 10 s entre abril e junho, com maior ocorrência em maio com 52% dos registros. As menores ocorrências nessa região são encontradas entre dezembro e fevereiro, com menos de

25% dos registros.

No geral, Recife e Porto Seguro foram as regiões que apresentaram as menores ocorrências de ondas *swell* em relação ao restante do litoral brasileiro. Na região Sudeste e Sul, fica evidente a maior ocorrência de ondulações com T_p acima de 10 s nos meses entre março e junho. De acordo com Pianca *et al.* (2010), a região que compreende as boias de Vitória, Cabo Frio, Itajaí e Rio Grande apresenta ondas mais energéticas principalmente durante o inverno no hemisfério sul (Figura 6).

6.5 Relação entre Altura e Período de Pico

Para uma melhor análise da influência do clima de ondas *sea* e *swell* na costa brasileira, a Figura 7 apresenta as médias mensais de Altura Significativa (H_s) e Direção de Pico (D_p) para cada boia. O gráfico superior em escala de vermelho Figura 7-A sintetiza a média mensal de ondas com T_p acima de 10 s (*swell*), enquanto o gráfico abaixo em escala de azul Figura 7-B apresenta o padrão de ondas com T_p abaixo de 10 s (*sea*). Para o gráfico de ondas tipo *swell*, foram considerados apenas os meses onde os registros com T_p maiores que 10 s corresponderem a pelo menos 20% do total de registros naquele mês. Em Cabo Frio, os meses de abril, maio e junho não possuem dados de D_p disponíveis.

Fortaleza apresenta o padrão mais distinto em relação às outras regiões possivelmente por ser a única boia situada no litoral norte do Brasil. Nessa região, ondulações menos energéticas e com menores valores de T_p foram preferencialmente encontradas entre os meses de junho e novembro, época do ano onde normalmente não há ocorrência de eventos meteorológicos distantes causadores de *swell* que atingem esse litoral. É perceptível a influência do deslocamento da ZCIT nessa região no segundo semestre, favorecendo um padrão de ondas formadas localmente com menor energia influenciadas pela intensificação dos alísios de SE, favorecendo um aumento de H_s entre setembro e outubro com médias de 2,1 e 1,9 m. O menor média de T_p para ondas tipo *sea* nessa região ocorreu em agosto com média de 6,1 s. A maior média de T_p foi em março, com 8,5 s.

Recife apresentou ondas tipo *sea* mais energéticas entre maio e agosto, com média de T_p entre 8,3 e 8,7 s. Maiores médias de H_s foram observadas entre junho e agosto, com valores entre 1,8 e 2 m. Além disso, o regime de ondas *sea* apresentou menor energia entre novembro e fevereiro, com média de T_p de 7,3 a 7,6 s e menores médias de H_s da região. As condições mais energéticas para o regime de *sea* na região, com maiores médias de T_p e H_s nos

meses de julho e agosto, podem ser ocasionadas pela intensificação dos ventos. Diferente de Fortaleza, a linha de costa de Recife permite receber frontalmente ondulações geradas pela pista de ventos alísios de SE que é intensificada nessa época do ano, proporcionando um estado de mar local mais energético de SE com elevados valores de Hs.

A boia de Porto Seguro não apresentou muitos registros com Tp superiores a 10 s na maior parte do ano. Para ondas do tipo *sea*, essa região apresentou um padrão semelhante a Recife, com maiores valores de Tp de 8,7 s encontrados em julho com Hs de 1,5 m e direção proveniente de ESE. A maior média de Hs nessa região foi em novembro, com 1,8 m e Tp 7,9 s com direção proveniente de ESE.

A região de Vitória apresentou um regime de ondas *sea* com menor média de Hs em janeiro, fevereiro e março, com valores próximos de 1,1 m e ondas provenientes de E e ESE com média de Tp de 7,3 s. Nesse intervalo de Tp, as maiores alturas na região foram observadas entre maio e novembro, com média de 1,6 m, com Dp médio do quadrante SE e E, com valores de Tp entre 8 e 9 s. Segundo Nogueira (2014), ondas na região do quadrante SE apresentam valores de Tp entre 8 e 10 s e alturas 1,5 e 2m, classificado pela autora como uma condição de Mau Tempo de SE. Para as ondulações com Tp acima de 10 s, as ondas na região de Vitória apresentam quadrante S e SW. Esse quadrante representa aproximadamente 85% dos registros das ondas com Tp acima de 10 s e apresentam Hs médio de 1,6 m. Nogueira (2014) classifica o intervalo entre 10 e 12 s provenientes de S e SW como estado de Mau Tempo de SW/S, responsável pelas ondas mais severas na região associadas aos sistemas frontais que deslocam-se acompanhados de ciclones e anticiclones móveis.

Em Cabo Frio, a direção predominante das ondas *sea* com maiores Tp são provenientes do quadrante ESE, com Hs entre 1,8 e 2 m e Tp de 8 s. Santos apresentou direções predominantes de SE e SSE em boa parte do ano com maior media de Hs em agosto, setembro e outubro com 2,1 m. Santos também apresentou ondulações de ESE durante os meses de janeiro e fevereiro com menores médias de Hs, com valores em torno de 1,5 m e Tp de 7,4 s. Em estudo de Pereira *et al.* (2000) na região de Arraial do Cabo, próximo a Cabo Frio, ao analisar um ano de dados observados de um ondógrafo, encontrou um pico de energia no quadrante de ESE e SSE com Tp entre 7 e 9 s, corroborando os resultados aqui encontrados.

Cabo Frio, Santos, Itajaí e Rio Grande apresentaram maiores médias Hs nos meses de agosto a novembro com 2 m e incidência de ESE e SE com Tp entre 7,8 e 9 s. Itajaí apresentou maiores médias de Hs de ondas *sea* no mês de maio e entre agosto e outubro, variando entre 2 e

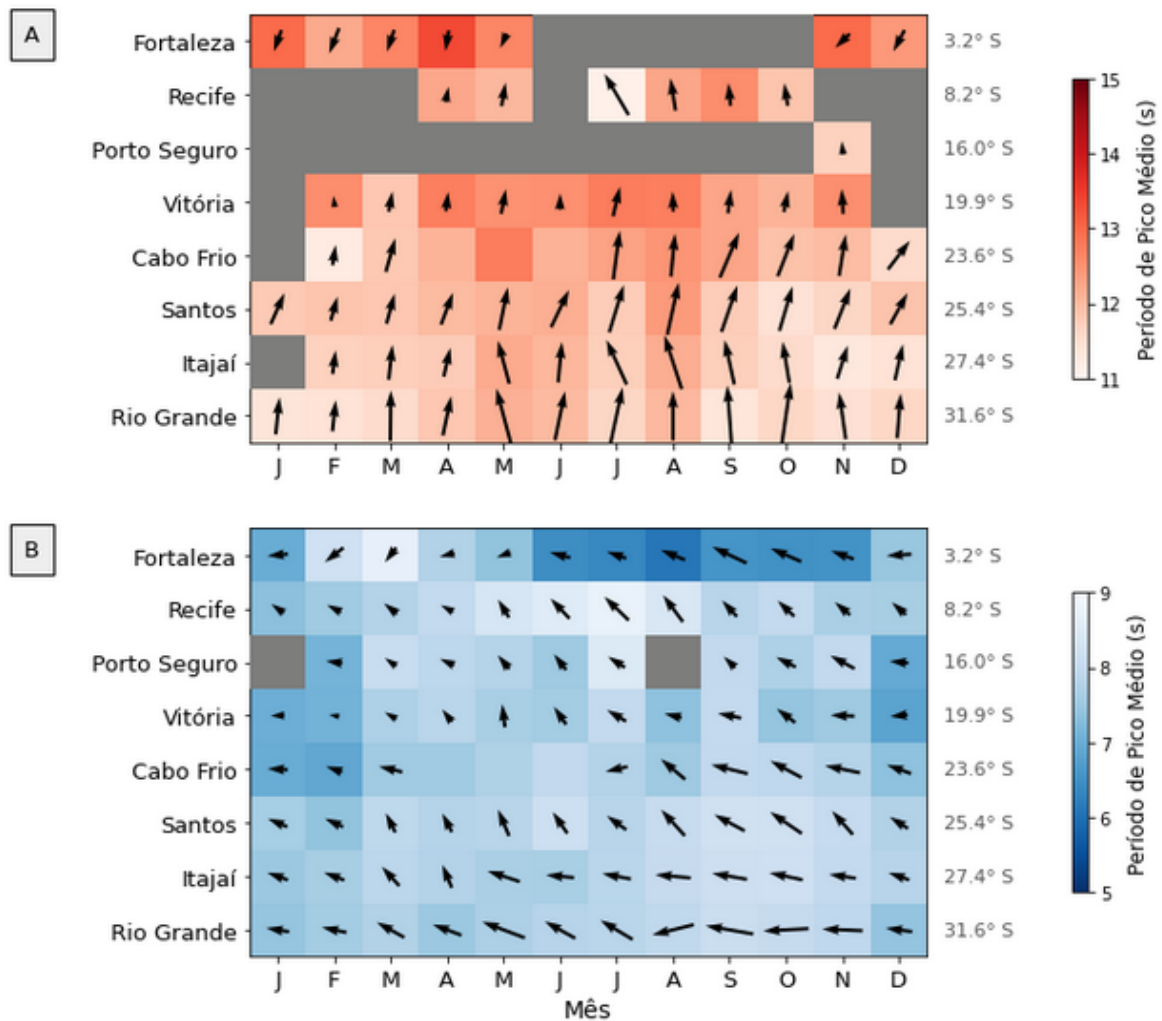


Figura 7 – Variação sazonal e espacial de médias mensais de H_s , D_p e T_p observados em cada boia. Os gráficos correspondem à ondas tipo *swell* (A) e *sea* (B). As setas indicam a Altura Significativa (H_s) e Direção de Pico (D_p), enquanto as cores representam os valores de Período de Pico (T_p)

2,1 m. Com o distanciamento da região equatorial em direção à região Sul da costa brasileira, percebe-se um aumento de H_s e T_p nas ondas tipo *sea* principalmente nos meses de agosto a novembro. Apesar desse aumento de H_s com o distanciamento da região equatorial, os valores médios de D_p apresentaram variações para cada região individualmente, dependendo da latitude em que a boia se encontra.

Além disso, Cabo Frio, Itajaí e Rio Grande apresentaram um aumento expressivo de H_s *sea* no mês de maio, com média entre 2 m e 2,3 m. Esse aumento não foi acompanhado do aumento de T_p nessa região, o que pode indicar que essas maiores alturas podem estar associadas à maiores velocidades do vento local nessa época do ano, como pode ser observado na Figura 3.

Por outro lado, o aumento de Hs e Tp nas boias do Sudeste e Sul entre agosto e novembro pode indicar um prevaletimento de ondulações *quasi-sea*, formadas em regiões próximas à costa.

Segundo Araújo *et al.* (2003), as análises do padrão de ondas em Santa Catarina, sugerem ondulações *sea* de E durante os meses do verão na região Sul, com ondulações tipo *swell* provenientes do quadrante S, corroborando os resultados aqui encontrados. As alturas significativas de ondas variam sazonalmente, sendo o inverno a estação mais energética apresentando uma média de Hs de 1,96 metros, enquanto no verão apresentou média é de 1,46 m (ARAÚJO *et al.*, 2003).

6.6 Comparação entre dados observados e modelos numéricos

Ao analisar os coeficientes de correlação entre todos os dados observados com as saídas das reanálises globais de ondas de todas as boias sem considerar individualmente cada região, pode-se perceber que os modelos apresentam diferenças quanto às variáveis analisadas.

Para essa análise, os dados foram empilhados de modo que cada valor de X (modelo numérico) e Y (dado observado) indicasse um registro de onda na frequência temporal obtida dos dados observados juntamente com seu respectivo resultado obtido das reanálises. Assim, foram geradas três matrizes de comparação. A matriz com os dados observados e resultados do ST4 com 44779 registros, a do ST6 com 43282 e a do WAVERYYS com 44779 registros. As séries temporais dos dados observados e dados provenientes do WAVERYYS para cada boia são encontradas no Capítulo 8.

Em termos de Altura Significativa (Hs), o WAVERYYS apresentou a melhor correlação de *Pearson* (r), indicando uma correlação Muito forte, com r de 0,91. Os modelos ST4 e ST6 apresentaram correlações Fortes, com r de 0,86 e 0,88 respectivamente. Em relação ao RMSE, o erro obtido entre os dados observados de Hs e os resultados de reanálise foi de 0,38 m para o ST4, 0,36 m para o ST6. Entre todos os modelos, o que obteve menor RMSE para Hs foi o WAVERYYS com 0,29 m. Os melhores resultados do WAVERYYS possivelmente se devem ao uso de assimilação de dados de altura de onda a partir da altura da superfície do mar obtida por sensoriamento remoto.

Vale destacar que entre todos os modelos, o WAVERYYS também demonstra melhores resultados na representação de Período de Pico (Tp), apresentando uma correlação Moderada com r de 0,69. Apesar de todos os modelos apresentarem uma correlação Moderada quanto à representação de Tp, os valores de r do ST4 e do ST6 foram 0,62 e 0,58, respectivamente.

O RMSE encontrado para os resultados do WAVERYS foi de 1,9 s, enquanto o ST4 e o ST6 apresentaram, respectivamente, 2,0 s e 2,3 s de RMSE.

Tabela 3 – Valores de correlação de *Pearson* e RMSE entre todos os dados observados e os dados do ST4

	Correlação			RMSE
	Hs	Tp	Dp	
Hs	0.86	0.14	0.25	0,34 m
Tp	0.28	0.62	0.67	2,09 s
Dp	0.22	0.26	0.70	49,6°

Tabela 4 – Valores de correlação de *Pearson* e RMSE entre todos os dados observados e os dados do ST6

	Correlação			RMSE
	Hs	Tp	Dp	
Hs	0.88	0.11	0.24	0,33 m
Tp	0.22	0.58	0.36	2,38 s
Dp	0.20	0.26	0.72	47,3°

Tabela 5 – Valores de correlação de *Pearson* e RMSE entre todos os dados observados e os dados do WAVERYS

	Correlação			RMSE
	Hs	Tp	Dp	
Hs	0.91	0.17	0.20	0,27 m
Tp	0.32	0.69	0.31	1,97 s
Dp	0.25	0.31	0.69	48,5°

Para os valores de Direção de Pico, de acordo com a classificação sugerida por Devore e Silva (2006), o ST4 e ST6 apresentaram correlação Forte com valores de r de 0,7 e 0,72, respectivamente, enquanto o WAVERYS apresentou uma correlação Moderada para com r de 0,69. Para o RMSE, o ST4 apresentou 49°, enquanto o ST6 registrou um erro de 47° e o WAVERYS de 48°. Apesar da classificação indicar uma correlação Moderada para os dados do WAVERYS, a diferença entre os três modelos é relativamente pequena e ambos apresentam um desempenho semelhante para os dados de Dp, principalmente em termos de RMSE. Portanto, a diferença entre as três reanálises não é significativa o suficiente para considerar um modelo melhor que outro em termos de Dp, principalmente quando comparamos os valores de Raiz do Erro Médio Quadrático, que sugere um erro consideravelmente alto para todas as reanálises, de quase 50° entre os dados observados e as reanálises.

A direção mais energética no espectro de ondas, representada pelos valores de D_p em um ponto observado, pode ser afetada por mudanças no campo de ondas pela entrada de um *swell*. Essas mudanças podem desencadear diferentes alterações nos valores de D_p , a depender do clima de ondas na região. Quando a direção mais energética de ondas *sea* é diferente da direção do *swell* (mar bimodal), a entrada de ondulações remotas pode provocar alterações consideráveis nos valores de D_p . Durante eventos de *swell*, algumas das características principais podem ser observadas nas séries temporais, como a diminuição do período de pico linearmente com o tempo, variação nas direções de pico e aumento e diminuição das alturas de onda desde a chegada até a passagem do grupo de ondas (JIANG *et al.*, 2016).

Segundo Babanin e Jiang (2017), o tempo de propagação do *swell* depende, principalmente, da qualidade na previsão do seu período (ou frequência). Uma vez que ondas de baixa frequência (e maior período) possuem comprimentos maiores, essas ondulações tendem a se propagar mais rapidamente, já que a celeridade de onda se dá em função de seu comprimento. Uma das principais fontes de erros está na previsão correta de T_p na formação e propagação dessas ondulações em regiões remotas. Tal imprecisão pode acarretar em atrasos na previsão da chegada de um *swell*, gerando erros de maneira inconsistente de até dezenas de horas na previsão (BABANIN; JIANG, 2017).

Jiang *et al.* (2016), ao comparar um conjunto de dados de ondógrafos com previsões do modelo numérico WAVEWATCH III utilizando o pacote físico ST4 (ARDHUIN *et al.*, 2010), constatou que apesar do modelo apresentar uma boa previsão na representação do campo de ondas, a chegada do *swell* na região observada se deu com um atraso médio de cerca de 4h em relação ao observado.

A título de comparação, apresentamos na Figura 8 os valores de RMSE para dados de D_p com um atraso (ou lag) de até 24 horas para uma previsão ideal de um dado observado (com r de 1,0 e RMSE igual à zero). O atraso de 0 h indica que um modelo hipotético previu, sem atrasos, o mesmo valor de D_p encontrado no dado observado para cada região. Atraso de 3 h indica que um registro de D_p encontrado nos dados observados foi previsto pelo modelo 3 h antes ou depois, e assim por diante. Pode-se perceber que um atraso de até 3 h pode acarretar em um RMSE de 30° nas boias situadas no litoral Norte e Nordeste do Brasil, até 55° em boias mais ao Sul do litoral brasileiro. Com 24 horas, o RMSE pode variar, em média, entre 35° e 70° entre os dados observados e os resultados dos modelos numéricos de onda.

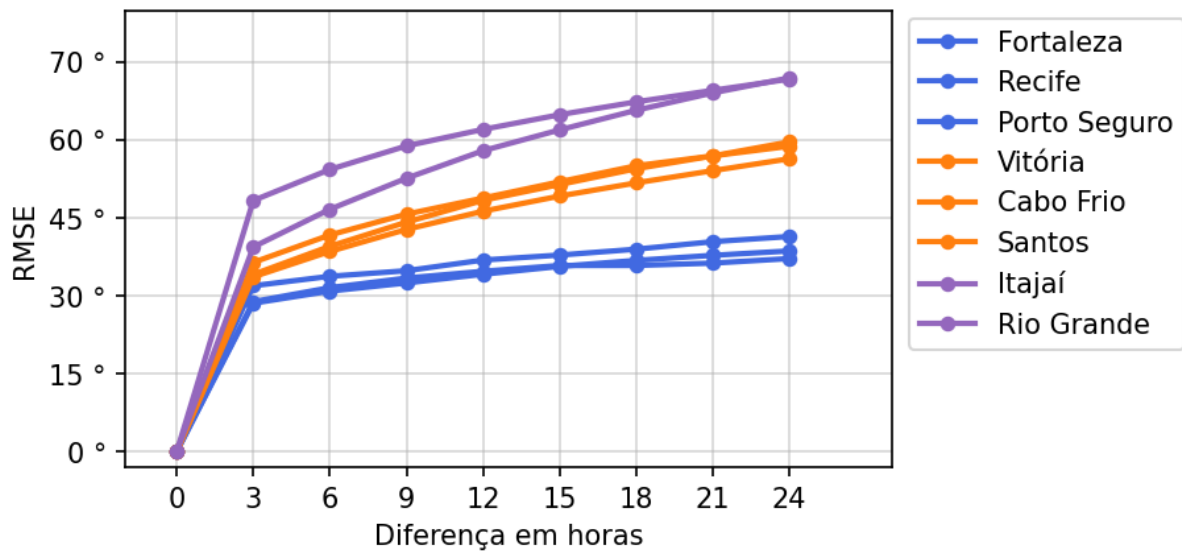


Figura 8 – Comparação da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE) em relação ao atraso na previsão dos modelos.

6.7 Validação das reanálises para ondas com diferentes Períodos de Pico

No intuito de compreender a correção entre os dados observados e as reanálises dos modelos numéricos, optou-se ainda por realizar uma separação entre as correlações para ondas *sea* (em azul) e *swell* (em vermelho), considerando os valores de T_p abaixo e acima de 10 s, respectivamente (Figura 9). Foi levado em consideração os valores de T_p dos dados observados (y) como critério de separação no intuito de avaliar o comportamento dos modelos quanto às ondas formadas localmente e ondas remotas que se propagam por longas distâncias até atingirem a costa. O eixo x representa os dados obtidos pelos modelos numéricos, enquanto o eixo y representa os dados observados. Valores acima da reta de correlação indicam subestimação por parte dos modelos em relação ao dado observado, enquanto valores abaixo da reta indicam superestimação.

Em relação ao H_s de ondas *sea*, nota-se uma tendência de uma boa representação geral em todos os modelos de maneira uniforme, com uma melhor eficiência para os resultados do *WAVERYYS*, com correlação de 0,93 e RMSE de 0,09 m e piores resultados para o *ST4*. Para as ondas tipo *swell*, o *ST6* apresentou melhores condições na representação de H_s com uma correlação de 0,95 e RMSE 0,22 m, apresentando uma tendência de subestimação dos dados observados. Para ondas tipo *swell*, apesar do *WAVERYYS* apresentar uma menor correlação em relação ao *ST6*, o mesmo apresentou um bom desempenho na representação de H_s com uma correlação de 0,89 e um menor RMSE entre os três modelos de 0,14 m. O *WAVERYYS* apresentou

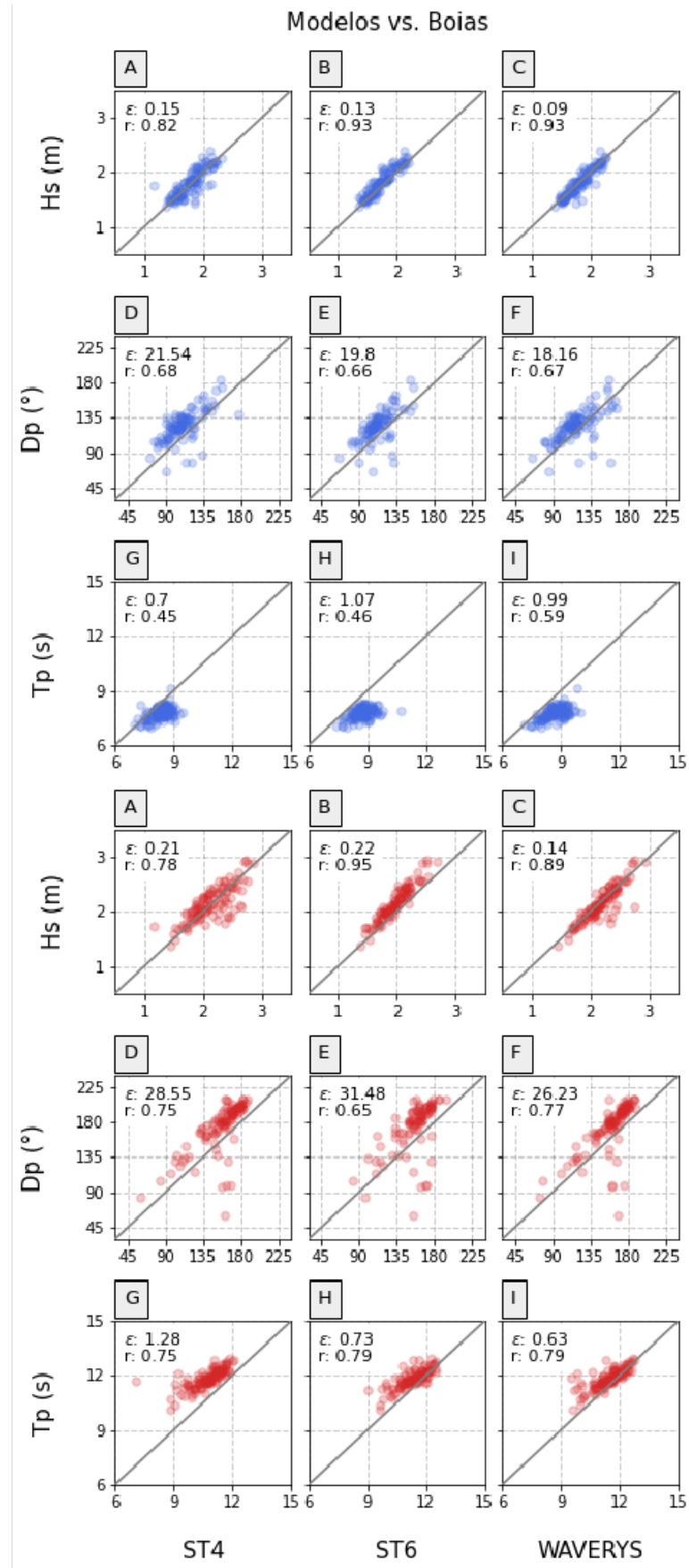


Figura 9 – Comparação entre médias mensais de Hs, Dp e Tp dos dados observados e resultados dos produtos de modelagem numérica para ondas tipo *sea* (em azul) e *swell* (em vermelho). O eixo *x* representa os dados de reanálise e *y* os dados observacionais.

uma leve superestimação principalmente em uma faixa de H_s entre 2 e 2,5 m. Vale lembrar que o *WAVERYYS* utiliza assimilação de dados de altura de onda e este pode ser o motivo do melhor desempenho do mesmo em relação à representação de H_s .

Para os dados de D_p , todos os modelos apresentaram comportamentos parecidos em relação às ondas tipo *sea*, indicando uma subestimação dos dados em torno de 20° para todos os quadrantes de direção. Apesar do comportamento semelhante, uma melhor eficiência pode ser encontrada nos resultados do *WAVERYYS*, que apresenta uma correlação de 0,67 e RMSE de $18,16^\circ$. Em relação às ondas tipo *swell*, a análise indica que o melhor resultado na representação dos dados observados fica por parte do *WAVERYYS*, indicando uma correlação de 0,77 e RMSE de $26,2^\circ$, enquanto o ST4 apresenta correlação de 0,75 com RMSE de $28,5^\circ$ e o ST6 com correlação de 0,65 e RMSE de $31,4^\circ$. Nota-se que em geral, todos os modelos subestimam as direções de pico para ondas tipo *swell*, mas o *WAVERYYS* apresenta uma correlação mais uniforme e menos dispersa em relação aos outros dois modelos.

No que diz respeito aos valores de T_p , todos os modelos apresentaram uma tendência de superestimar os valores de T_p para ondas tipo *sea* e subestimar boa parte do intervalo de T_p para ondas do tipo *swell*. Entre as reanálises, o *ST4* representou melhor os dados observados de ondas *sea*, apresentando uma maior concentração de pontos em cima da linha de correlação principalmente entre 6 e 8 s. Para este modelo, a correlação de T_p das ondas tipo *sea* possui r de 0,45 e RMSE de 0,7 (Figura 9). Em relação às ondulações tipo *swell*, os resultados do *WAVERYYS* apresentaram maior convergência com os dados observados entre as reanálises, subestimando os menores valores de T_p (entre 10 e 11 s) e indicando uma maior concordância com os maiores valores de T_p com um RMSE de 0,63 s e correlação r de 0,79.

Os resultados mostraram que o modelo *WAVERYYS* apresentou o melhor desempenho para previsão dos dados observados. De maneira geral, o *WAVERYYS* apresentou uma acurácia mais satisfatória para previsão de H_s e T_p . Quanto aos dados de D_p , os modelos tiveram desempenho semelhante, com correlações fortes, com melhores resultados para o *WAVERYYS*. Nas análises para ondas com menores T_p (consideradas como *sea*) o *WAVERYYS* apresentou resultados mais satisfatórios para previsão de H_s e D_p , enquanto o ST4 demonstrou prever melhor os dados de T_p . Para ondas tipo *swell*, o *WAVERYYS* demonstrou um desempenho superior na previsão tanto para H_s , T_p e D_p . No entanto, o RMSE para D_p foi consideravelmente alto para todos os modelos. É possível que uma defasagem na previsão da entrada do *swell* possa afetar os valores de D_p , uma vez o RMSE para as direções apresentaram maiores valores.

Para H_s , as reanálises apresentam melhores resultados para *sea*, com melhores resultados para o WEVERYS. Essa análise sugere que todos os modelos subestimam as direções de pico para ondas tipo *swell*, enquanto tendem a representar melhor as condições de D_p para ondas *sea*. Para os valores de T_p , nota-se uma melhor representação para as ondas tipo *swell*, com melhor correlação e menor RMSE também para os dados do WEVERYS.

Portanto, nota-se que mesmo para numa análise para o intervalo de ondas de baixa energia, associadas à ondas tipo *sea*, e para o intervalo de alta energia associado à ondas tipo *swell*, o WEVERYS apresentou um melhor desempenho na representação dos dados.

6.8 Análise da correlação com defasagem temporal

A fim de avaliar o atraso na previsão por parte do modelo, realizamos uma análise de correlação com *lag*, permitindo examinar a relação entre as previsões e os dados observados com uma defasagem temporal. Essa análise foi realizada especificamente para os resultados do modelo WEVERYS, que apresentaram um desempenho superior em comparação às demais reanálises.

A Figura 10 mostra as correlações com *lag* dos dados de H_s , T_p e D_p entre os dados observados e a reanálise do WEVERYS onde cada gráfico representa uma boia. Para cada região, foram testados *lags* de até 15 horas, permitindo avaliar se existe um atraso por parte do modelo em prever determinada variável. As linhas na cor azul indicam a correlação para H_s , verde para correlação de T_p e vermelha para D_p . Atrasos positivos ($Lag > 0h$) indicam que o modelo previu com atraso o dado observado. As melhores correlações com *lag* para H_s , T_p e D_p são observados no canto superior direito em cada gráfico, nas cores azul, verde e vermelho, respectivamente.

Em Fortaleza, em geral o modelo apresentou uma eficácia satisfatória com *lag* igual a zero, sem atrasos na previsão, com correlação Forte e Muito Forte na representação de H_s , T_p e D_p com r de 0,9, 0,76 e 0,76, respectivamente.

Em Recife, percebe-se que o WEVERYS apresenta correlação Forte para a previsão de H_s , com r de 0,79 sem atraso na previsão. Por outro lado, a região apresenta correlação Moderada para os dados de T_p e D_p . Nessa região, apenas os valores de T_p obtiveram melhor correlação com atraso na previsão.

Porto Seguro apresentou as menores correlações para T_p e D_p , indicando uma correlação Moderada para esses parâmetros. Para H_s e T_p , as melhores correlações foram obtidas com *lag* igual a zero, mas para D_p as correlações sugerem um atraso de 3 h na previsão.

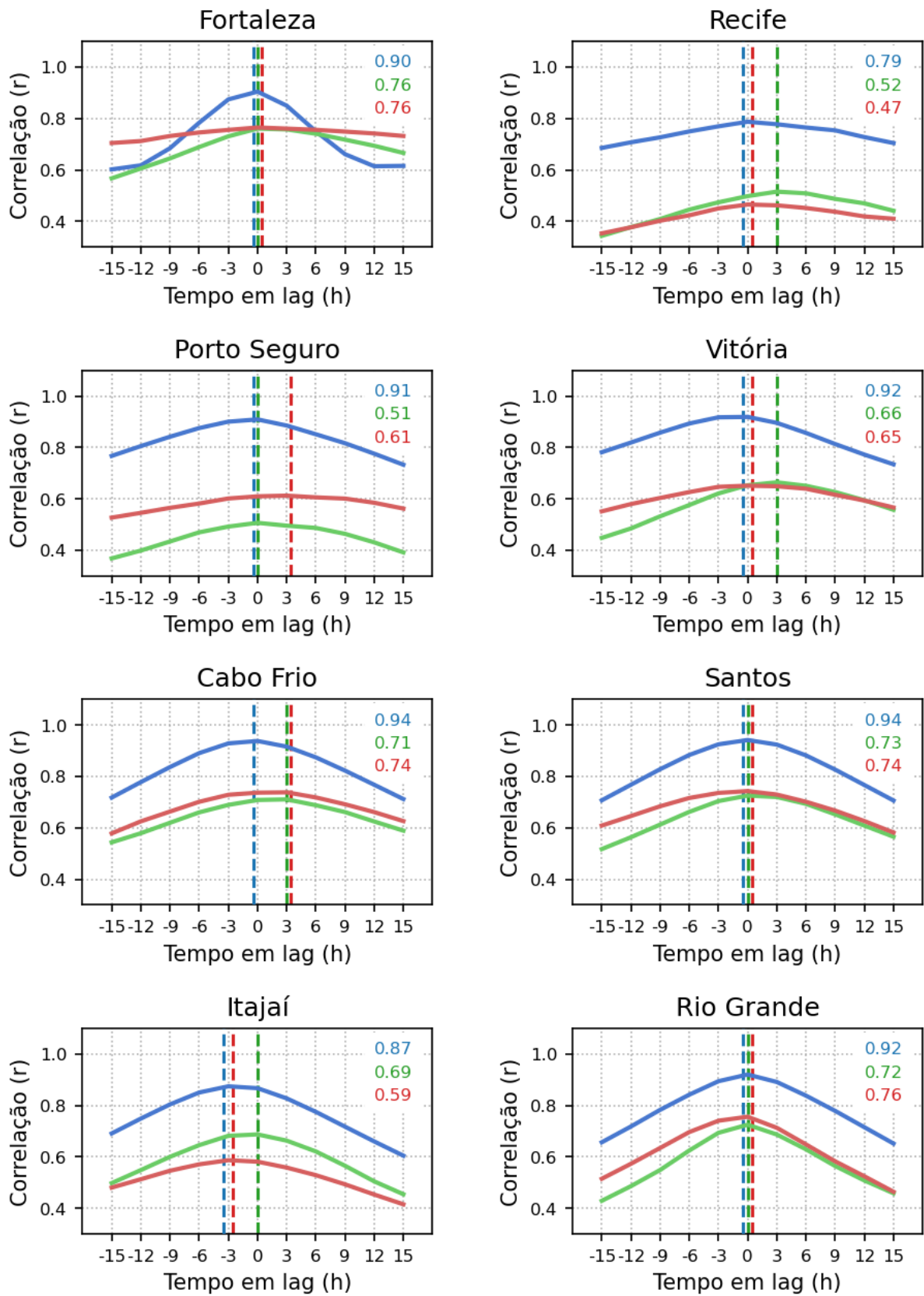


Figura 10 – Correlação com Lag entre os resultados do WAVERYS e os dados observados para as Variáveis Hs, Tp e Dp. Cada gráfico apresenta a correlação com lag para as respectivas boias, juntamente com os valores a correlação máxima obtida.

A região de Vitória apresenta melhor correlação com *lag* igual a zero para os valores de Hs e Dp, com r de 0,92 e 0,66. Apesar disso, o WAVERYS apresenta um atraso na previsão de Dp de 3 h. Nessa região, apenas os valores de Hs obtiveram correlação Muito forte, enquanto Tp e Dp apresentaram correlação Moderada.

Para a região de Cabo Frio percebe-se que o modelo tende à apresentar um atraso de 3h na previsão nos dados de Dp e Tp com valor de r de 0,71 e 0,74 respectivamente. Nessa região, o melhor resultado foi para a previsão de Hs, que apresenta correlação Muito forte com r de 0,94, onde juntamente com Santos, é a maior correlação registrada para Hs entre todas as boias.

Santos, por sua vez, demonstra uma correlação Forte e Muito forte entre a previsão e o observado de Hs (0,94), Tp (0,73) e Dp (0,74) com *lag* igual a zero, sugerindo que em geral essa região não apresenta atrasos por parte do modelo.

Itajaí foi a única região onde, em geral, o WAVERYS realizou a previsão adiantada em relação ao dado observado. A previsão de Hs e Dp apresentam melhor correlação com o *lag* de -3 h, com r igual a 0,87 e 0,69, enquanto Tp apresenta sua melhor correlação com *lag* igual a zero, mas indicando uma correlação Moderada com r de 0,59.

Em Rio Grande as análises sugerem que o modelo consegue prever os dados sem defasagem, com correlação Forte e Muito forte para *lag* igual a zero em todas os parâmetros de onda. Hs apresenta a maior correlação, com r de 0,92, enquanto Tp e Dp foram 0,72 e 0,76, respectivamente.

É possível perceber pela análise dos gráficos que entre os valores de Hs conseguem ser representados pelo WAVERYS com melhor eficiência quando comparado com Tp e Dp, indicando uma correlação Muito forte e sem atraso em 6 das 8 boias analisadas. A melhor correlação foi em Cabo Frio e Santos, com r de 0,94 e em Rio Grande, com 0,92. A correlação mais baixa foi para Porto Seguro e Recife, com 0,74 e 0,79, respectivamente.

O WAVERYS apresentou correlações Forte ou Muito forte na previsão do parâmetro Tp em Fortaleza, Cabo Frio, Santos e Rio Grande. Porém, em Recife e Itajaí, as correlações foram Moderadas.

As melhores correlações para Dp foram em Fortaleza, Cabo Frio, Santos e Rio Grande, apresentando correlação Forte ou Muito forte. Por outro lado, resultados insatisfatórios na previsão de Dp foram em Recife e Itajaí, com r de 0,47 e 0,59.

Em resumo, o desempenho do WAVERYS na previsão dos parâmetros de onda variou

de acordo com a região, apresentando maior precisão em algumas áreas do que em outras.

Foi observado que o modelo teve um desempenho satisfatório na previsão sem atraso nas regiões de Fortaleza, Santos e Rio Grande, onde a correlação máxima foi encontrada com *lag* igual a zero. No entanto, em outras regiões como Recife e Itajaí, as correlações foram moderadas, indicando uma menor precisão na previsão.

Esses resultados parecem sugerir que o modelo tem a capacidade de representar com boa eficácia os dados observados em uma área geográfica considerável, abrangendo desde o Norte do Brasil, em Fortaleza, passando pelo Sudeste, em Santos, até a região Sul, em Rio Grande. Isso sugere que o modelo é eficaz em prever as condições oceânicas em regiões com diferentes mecanismos meteorológicos geradores de ondas.

Considerando esses resultados, pode-se sugerir que o WAVERYS apresenta um eficácia relativamente melhor, tendo em vista o seu melhor desempenho na previsão de H_s e T_p . Em relação à D_p , os três modelos apresentaram correlações semelhantes.

É importante ressaltar que a melhor representação dos dados observados por parte do modelo WAVERYS pode apresentar resultados diferentes para cada região e período analisados. Principalmente em regiões com extensa linha de costa como no caso do Brasil, diferentes modelos numéricos podem apresentar desempenhos satisfatórios a depender da região onde será analisada.

6.9 Observação e Previsão de eventos extremos

No intuito de avaliar individualmente o desempenho do reanálise numérica WAVERYS quanto à previsão de eventos extremos de onda, analisamos os piores cenários em cada região e a capacidade do modelo numérico em representar essas condições. O critério usado para considerar condições extremas e adversas na região foi a presença de um registro de onda com Altura Significativa acima do percentil de 95% de sua região e ao mesmo tempo fosse uma *Rogue Wave*.

Rogue Waves (também conhecidas como ondas anormais, ondas gigantes ou *freak waves*) são ondas repentinas, que apresentam grande esbeltez, frequentemente observadas e responsáveis por inúmeros acidentes marítimos com embarcações em diversas regiões do globo (KHARIF; PELINOVSKY, 2003). Para este estudo, utilizamos como critério de definição para uma *Rogue wave* as ondas onde a razão entre sua Altura Máxima (H_{max}) excedesse 2 vezes o valor de sua Altura Significativa (H_s) (ou seja, $H_{max} > 2H_s$), conforme sugerem estudos

realizados por Olagnon e Athanassoulis (2001), Kharif e Pelinovsky (2003), Pinho *et al.* (2004), Candella e Candella (2010). Em termos proporcionais, 2,2 a 3,7% dos registros de ondas em cada região foram classificados como *Rogue Waves*. A Tabela 6 apresenta uma síntese dos resultados encontrados para cada região a partir dos critérios estabelecidos.

Tabela 6 – Quantificação de cenários extremos em cada região

	<i>Rogue Waves</i>	<i>Rogue Waves (%)</i>	Hs _{95%}	Registros Percentil	Cenários Extremos
Fortaleza	214	2,3%	2,31 m	461	3
Recife	317	2,2%	2,28 m	612	5
Porto Seguro	141	2,2%	2,25 m	323	1
Vitória	341	2,4%	2,39 m	753	5
Cabo Frio	252	3,2%	3,17 m	551	5
Santos	1244	3,3%	3,36 m	2793	15
Itajaí	1675	3,4%	3,40 m	2346	25
Rio Grande	1108	3,7%	3,72 m	2481	11

Portanto, a definição dos cenários extremos foram aqueles que apresentasse registros de Hs superiores ao percentil de 95% e que também fossem *rogue waves* em cada região. Optamos então por apresentar um cenário para cada uma das três regiões (Nordeste, Sudeste e Sul).

O primeiro evento, de acordo com a Figura 11, foi registrado em Fortaleza entre os dias 29/07/2017 até 31/07/2017, apresenta um aumento das alturas de onda acompanhadas com um crescimento dos valores de período de pico, indicando a entrada de um campo de ondas de maior energia na região possivelmente associadas a um *swell*. A *rogue wave* neste caso apresentou Hmax de 5,9 m e Hs de 2,6 m.

Durante o evento, os valores de Tp saíram de 5,8 s para 8 s, voltando a diminuir com o tempo até atingir em torno de 6 s no dia seguinte. Além disso, os valores de Dp sugerem uma mudança na direção de pico de energia de 100° para 120°.

Os gráficos à direita apresentam a correlação com *lag* para a previsão deste evento por parte do modelo. Os dados de correlação de *Pearson* e RMSE sugerem que o WAVERYS conseguiu prever com melhor eficácia sem atrasos, onde as melhores correlações e valores de RMSE se encontram com *lag* igual a zero. A reanálise conseguiu prever com melhor acurácia os valores de Hs, com valores de *r* de 0,82 e RMSE de 0,2 m, conseguindo prever o tempo da chegada das maiores ondulações da série com boa eficácia. As séries temporais indicam uma baixa precisão na representação previsão dos valores de Dp, onde o mesmo não consegue representar Dp de maneira consistente para a região. Para Tp, o modelo consegue prever a

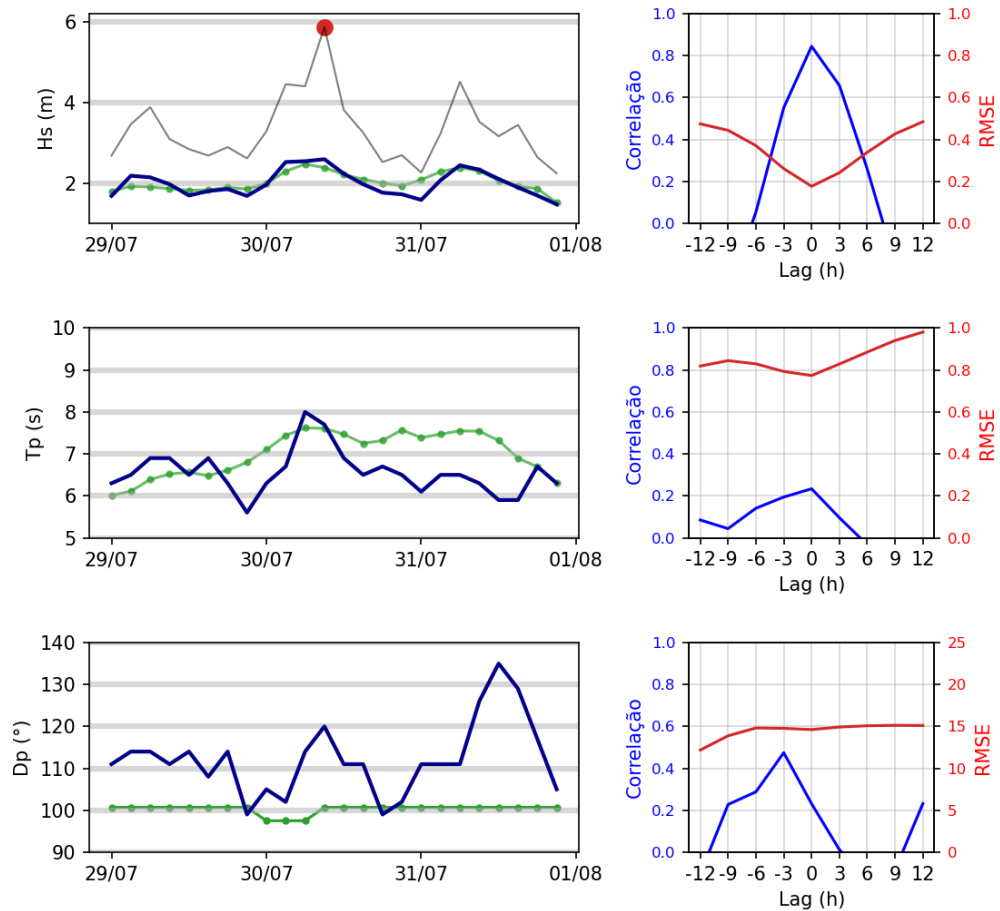


Figura 11 – Evento extremo identificado na boia de Fortaleza, no Ceará. Os gráficos da direita apresentam as séries temporais do dado observado (azul) e resultado da reanálise (verde), enquanto o gráfico da direita apresenta a Correlação e RMSE pra cada parâmetro. O gráfico superior representa os valores de Hs, o gráfico intermediário apresenta Tp e o gráfico inferior os valores de Dp. Hmax (linha preta), Hs observado (azul) e modelado (verde). O ponto vermelho indica uma *rogue wave*.

tendência de crescimento e diminuição deste parâmetro ao longo dos dias.

De acordo com análises de Fisch (2008), o intervalo entre ondas provenientes de E e SE com T_p entre 5 e 8 s e H_s máxima de 2 m correspondem a um estado de mar influenciado pelos alísios de SE. Apesar do pico de H_s ter sido encontrado no valor de 2,6 m, a média durante este evento apresentou H_s de 2,1 m, corroborando os resultados encontrados pela autora. Contudo, apenas uma análise da circulação atmosférica na região equatorial dos alísios poderia classificar com êxito o estado de mar encontrado e indicar a região de formação desse campo de ondas.

De acordo com a Figura 12, o evento encontrado na região de Vitória entre os dias 19/11/2016 e 20/11/2016, apresenta um aumento das alturas de onda acompanhadas com um crescimento dos valores de T_p em dois momentos, indicando possivelmente a entrada de dois campos de ondas na região, o primeiro no dia 19/11 e o segundo no dia 20/11. A altura da *rogue wave* que caracterizou este evento registrou H_{max} de 7,2 m e H_s de 3,5 m.

No dia 19/11, observa-se um crescimento nos valores de T_p de 6 s para 10 s, diminuindo até 8 s ao fim do dia e voltando a aumentar gradativamente nos dias seguintes até atingir a faixa entre 12 e 14 s. Os valores de D_p sugerem uma rápida mudança na direção no início do dia 19/11, variando de Leste (85°) para direções de pico de Sudoeste (220°).

A correlação de *Pearson* e RMSE indicam que o modelo previu a ocorrência do evento com boa eficiência, mas indicando uma chegada antecipada do *swell* em aproximadamente 3h. Para os valores de H_s , o valor de r (com *lag* igual a zero) foi de 0,82 com RMSE de 0,43. Para os valores de T_p , o r obtido foi de 0,92 e RMSE de 0,86 s. Percebe-se que o WAVERYS conseguiu prever relativamente bem a chegada do *swell* e os parâmetros de H_s , T_p e D_p e suas tendências ao longo dos dias, apesar de subestimar as direções de pico em torno de 40° a 50° .

Durante o evento, o valor médio de H_s foi de 3,5 m e D_p foi de aproximadamente 220° (Sudoeste). A classificação de estado de mar proposta por Nogueira (2014) sugere que ondulações com intervalo de T_p entre 10 e 14 s provenientes de Sul correspondem à categoria de Mau Tempo ou *Swell* de Sul, dependendo da direção do vento. Ao analisar a direção do vento registrado pela boia (Figura 13), é possível observar que possivelmente a classificação para as condições observadas correspondem a uma situação de Mau Tempo, uma vez que o vento registrado apresentou direções de Sul/Sudoeste durante os dias 19/11 e 21/11, com intensidades que ultrapassaram 18 m/s.

De acordo com a Figura 14, o evento encontrado na região de Itajaí entre os dias

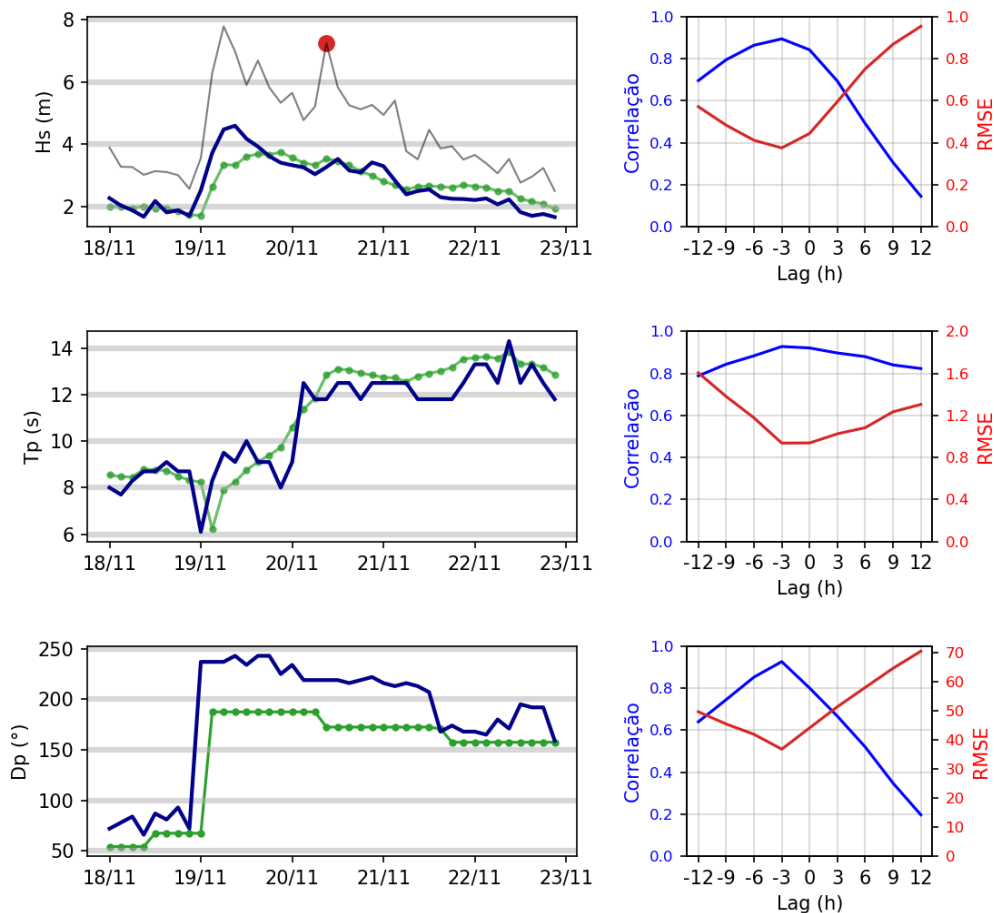


Figura 12 – Evento extremo identificado na boia de Vitória, em Espírito Santo. Os gráficos da direita apresentam as séries temporais do dado observado (azul) e resultado da reanálise (verde), enquanto o gráfico da direita apresenta a Correlação e RMSE pra cada parâmetro. O gráfico superior representa os valores de Hs, o gráfico intermediário apresenta Tp e o gráfico inferior os valores de Dp. Hmax (linha preta), Hs observado (azul) e modelado (verde). O ponto vermelho indica uma *rogue wave*.

28/05/2015 e 02/06/2015 é caracterizado por um aumento das alturas de onda, com dois picos neste evento. O aumento de Hs nessa situação ocorre simultaneamente com uma elevação nos valores de Tp e uma mudança na direção de pico de onda, indicando possivelmente a entrada de um *swell* na região. A *rogue wave* que caracterizou este evento foi registrada no dia 28, apresentando Hmax de 7,9 m e Hs de 3,7 m.

A partir do dia 25/05, observa-se um crescimento nos valores de Tp de 7,5 s para um pico de 14,5 s no dia 28/05. Percebe-se ainda uma diminuição dos valores de Tp no dia 28, alcançando entre 7 s voltando a ganhar um aumento até 12,5 s e apresentar uma diminuição gradativa até atingir a faixa de 10 s no dia 02/06. Essa rápida diminuição de Tp também é

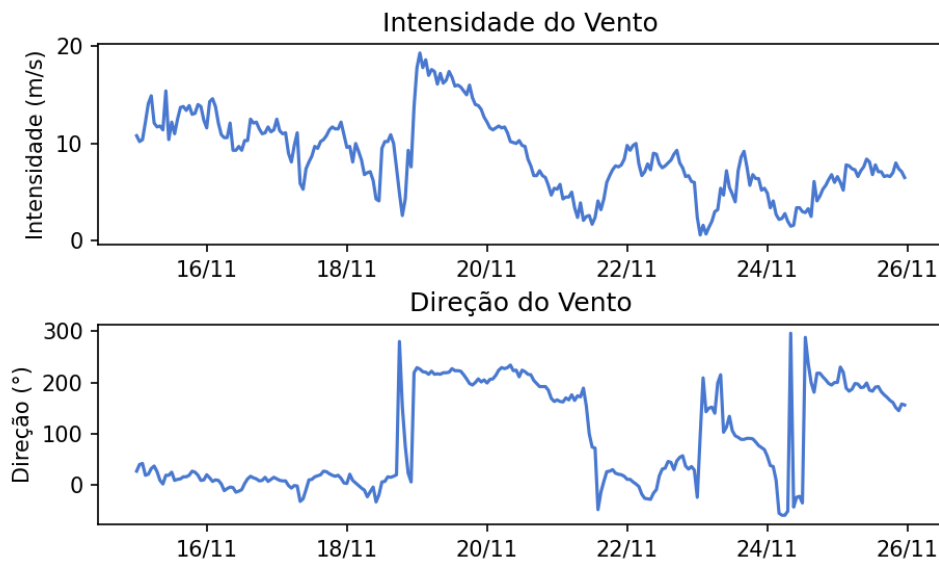


Figura 13 – Direção e Intensidade do Vento registrado na boia de Vitória, em Espírito Santo, durante o evento extremo registrado. A figura indica a entrada de um possível sistema frontal, com direção em torno de 210° e velocidades acima de 15 m/s entre os dias 19/11 e 20/11

observada nas alturas de onda. Possivelmente este evento está associado à presença de duas ondulações, conforme sugere os valores de H_s ao apresentarem dois picos no gráfico (28/05 e 29/05), apresentando também uma assinatura nas variações de D_p . Os valores de D_p sugerem uma rápida mudança na direção no dia 24/11, variando de Nordeste (70°) para direções de pico de Sudoeste (240°).

A correlação de *Pearson* e RMSE indicam que o modelo previu o evento indicando uma chegada antecipada em aproximadamente 3h a 9h dependendo do parâmetro analisado. Para os valores de H_s , o valor de r (com *lag* igual a zero) foi de 0,89 com RMSE de 0,5 m. Para os valores de T_p , o r obtido foi de 0,75 e RMSE de 2,2 s. Percebe-se que o WAVERYS conseguiu prever relativamente bem a chegada do *swell* e os parâmetros de H_s , T_p e D_p e suas tendências ao longo dos dias, apesar de subestimar as direções de pico em torno de 40° a 50° .

Durante o evento, o valor médio de H_s média de 3,6 m e máxima de 4,9 m, com D_p de aproximadamente 200° (Sul/Sudoeste). Eventos com alturas de onda consideravelmente mais altas que a média da região foi observada também por Melo *et al.* (2006), analisando dados de uma ressaca ocasionada em Santa Catarina que apresentou H_s máxima de 7,2 m de quadrante Leste/Sudeste. Em estudos de Araújo *et al.* (2003), foi observado que ondas com H_s acima de 4 m foram encontradas ao longo de todo o ano, principalmente durante o inverno, com quadrante Sul, corroborando os resultados encontrados neste estudo.

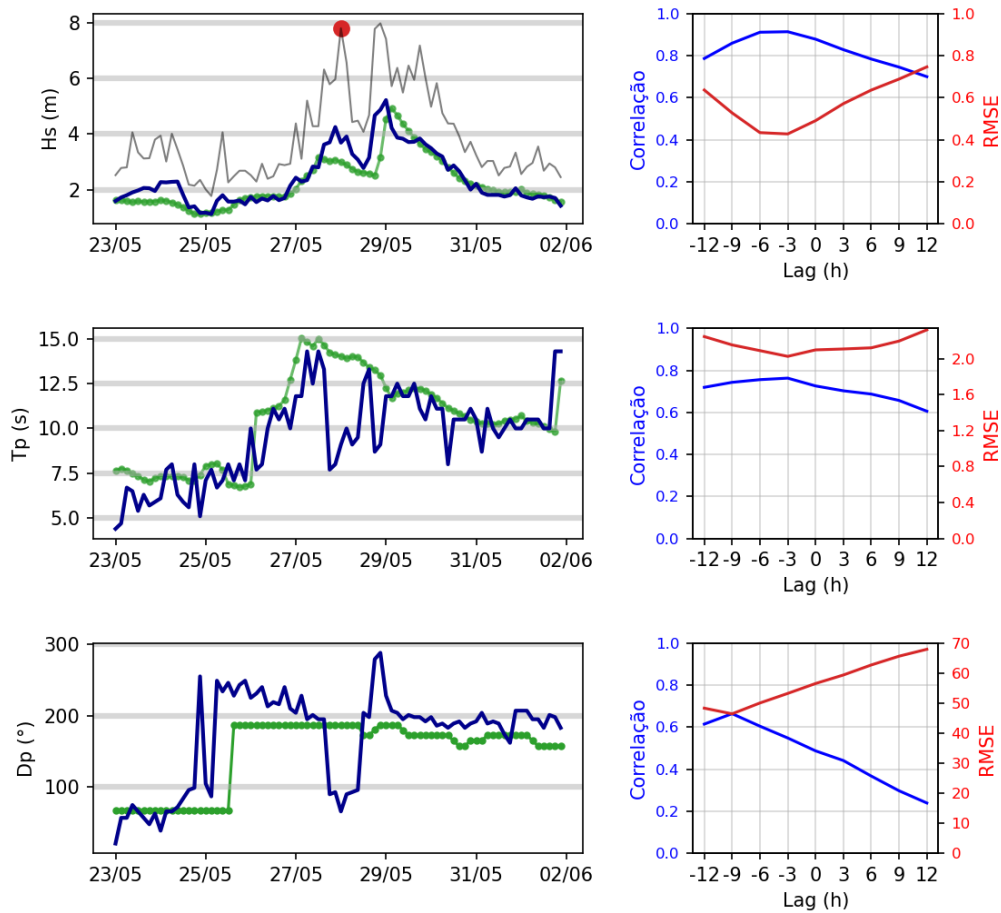


Figura 14 – Evento extremo identificado na boia de Itajaí, em Santa Catarina. Os gráficos da direita apresentam as séries temporais do dado observado (azul) e resultado da reanálise (verde), enquanto o gráfico da direita apresenta a Correlação e RMSE pra cada parâmetro. O gráfico superior representa os valores de Hs, o gráfico intermediário apresenta Tp e o gráfico inferior os valores de Dp. Hmax (linha preta), Hs observado (azul) e modelado (verde). O ponto vermelho indica uma *rogue wave*.

7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram estudados os padrões de ondas e ventos no litoral do Brasil a partir de dados observados de boias do Programa Nacional de Boias da Marinha do Brasil (PNBOIA). No intuito de avaliar a performance de modelos globais de ondas, três produtos de reanálises são utilizadas para investigar seu desempenho na representação do padrão de ondas na costa brasileira: O Multigrid Hindcast (NOAA/NCEP), o WW3-ST6 (Universidade de Melbourne) e o WAVERYS (Mercator/Copernicus).

Foi observado que a intensidade média do vento em todas as regiões apresenta uma variação entre 5 e 11 m/s, com mudanças significativas nas direções dependendo da região do litoral. Destaca-se um padrão direcional bem característico da região equatorial observado nas boias de Fortaleza e Recife, com uma influência direta dos ventos alísios de Sudeste e do deslocamento da ZCIT. Na região Sudeste, observa-se uma predominância de ventos de Norte, Nordeste e Leste influenciada pelo domínio do ASAS, com variações para Sul em situações de entrada de sistemas frontais.

De maneira geral, as boias localizadas em Fortaleza, Cabo Frio, Itajaí e Rio Grande registraram os ventos mais intensos entre os dados analisados. Em geral, à medida que se distancia da região equatorial para altas latitudes, os ventos apresentam-se mais intensos e com direções mais dispersas.

Para os dados observados de onda, as análises evidenciam características de um mar bimodal em todas as regiões. Analisando individualmente cada região, relações de similaridade foram observadas, sugerindo um padrão de ondas similares em algumas boias. Em Fortaleza e Recife, há uma característica semelhante para ondas com T_p entre 5 e 8 s e para o intervalo de 7 e 11 s, com direções de Sudeste e de Nordeste, respectivamente. Vitória, Cabo Frio e Santos apresentam ocorrências de Leste e Leste-Nordeste, enquanto Itajaí e Rio Grande apresentam ondulações principalmente de Nordeste e Norte-Nordeste para ondulações de menores períodos, corroborando com a direção do vento observado na região.

Ao analisar a sazonalidade das ondas de alto período de pico, foi observado um padrão distinto ao longo do litoral brasileiro. As regiões Sudeste e Sul apresentam maiores ocorrências de *swell* entre os meses de março e agosto, enquanto o litoral Norte do Brasil registra maior frequência dessas ondulações entre dezembro e março.

Nas análises de distribuição de densidade para Período de Pico (T_p), a região de Fortaleza apresenta maior densidade para valores próximos de 6 s, enquanto outras regiões

apresentam maiores densidades na faixa de 7 a 8 s. Recife e Porto Seguro apresentam uma densidade acima da média para os valores de T_p entre 7 e 8 s comparado às demais regiões.

Em termos de Altura Significativa (H_s) para ondulações de menores períodos, menores alturas são observadas no litoral Norte e Nordeste, com exceção dos meses onde a intensidade do vento tende a ser maior (entre julho e outubro). Percebe-se ainda um aumento nas alturas de onda em direção à região Sul em quase todo o ano, com destaque para os meses entre março e outubro.

Para ondulações com T_p acima de 10 s, o litoral Norte apresenta o padrão mais distinto entre as demais regiões, possivelmente por ser a única boia situada no litoral norte do Brasil, apresentando maiores alturas da região entre dezembro e março com direção de Norte e Nordeste. Na região Sudeste e Sul, as maiores alturas apresentam-se em quase todo o ano com direção de Sul, Sudeste e Sudoeste.

Em relação às reanálises, o WAVERYS apresentou a melhor eficiência entre os três modelos para os valores de H_s , com melhor correlação ($r = 0,91$) e menor RMSE (0,29 m). Os melhores resultados do WAVERYS possivelmente se devem à assimilação de dados de altura da superfície do mar a partir de sensoriamento remoto.

Para os dados de T_p , o WAVERYS também apresentou os melhores resultados, com r de 0,69 e RMSE de 1,9 s. Para previsão de D_p , a diferença entre os três modelos é relativamente pequena e todos apresentam um erro semelhante para os dados de direção de pico. Em geral, os valores de D_p são previstos com mais erros por parte dos modelos, principalmente em situações de ondas com T_p acima de 10 s, geralmente associadas à swell.

É importante ressaltar que a previsão da direção de pico (D_p) pode ser bastante sensível a pequenos atrasos na previsão, especialmente em regiões mais ao Sul e Sudeste do Brasil. Observou-se que um atraso de até 3 horas na previsão poderia resultar em erros consideráveis nos valores de D_p , com RMSE de aproximadamente 30° nas boias do litoral Norte e Nordeste, e de até 55° nas boias mais ao Sul do Brasil.

Em uma análise regional, o WAVERYS apresenta maior eficiência na representação de H_s , mostrando uma correlação Muito Forte e sem atraso em 6 das 8 boias analisadas. Este modelo também apresentou correlações Forte ou Muito Forte na previsão de T_p , principalmente nas regiões de Fortaleza, Cabo Frio, Santos e Rio Grande. Porém, em Recife e Itajaí, as correlações de T_p foram Moderadas. As melhores correlações para previsão de D_p foram em Fortaleza, Cabo Frio, Santos e Rio Grande, apresentando correlação Forte ou Muito Forte.

Em resumo, o desempenho do WAVERYS na previsão dos parâmetros de onda variou de acordo com a região, apresentando maior precisão em algumas áreas do que em outras, com melhor eficiência para Hs e Tp e para ondulações com períodos de pico abaixo de 10 s.

No intuito de avaliar o desempenho do WAVERYS quanto à previsão de eventos extremos, foi analisada a capacidade do modelo numérico em representar as condições mais extremas de ondas em algumas regiões. Para isso, investigou-se a qualidade da reanálise na previsão de eventos extremos considerando a presença de *rogue waves* com Hs acima do percentil de 95%.

Ao todo foram identificadas 5292 *rogue waves*, onde 70 delas estavam acima do percentil 95%. Nesses cenários, foram observadas características semelhantes com eventos já estudados e conhecidos na literatura. Os valores de correlação de *Pearson* e RMSE sugerem que o WAVERYS consegue prever com boa eficácia a chegada de eventos de swell, mas prevendo antecipadamente em até 3h em alguns eventos. Apesar de subestimar as direções de pico em torno de 40 a 50 ° e subestimar levemente as alturas de onda, o WAVERYS consegue representar com boa eficácia as tendências de evolução nas alturas significativas e período de pico durante os eventos.

Entre as três reanálises globais de ondas forçados com dados de ventos de diferentes bases de dados, o WAVERYS (forçado com dados do ERA5) foi o que apresentou melhores resultados na representação do padrão de ondas no litoral brasileiro. Contudo, é importante exercer cautela na utilização de dados de reanálises globais de ondas devido às variações nos resultados na representação do padrão de ondas ao longo do litoral.

As análises aqui apresentadas proporcionam uma base de conhecimento adicional para a compreensão dos padrões sazonais de ondas no litoral brasileiro. Esses resultados destacam a complexidade e os desafios associados à previsão de ondas, especialmente quando se trata de condições de *swell*.

Recomendamos, portanto, uma investigação mais minuciosa dos eventos atmosféricos responsáveis pela geração de diversos cenários de ondas no litoral brasileiro. Além disso, como sugestão para trabalhos futuros, aconselhamos também uma análise de agrupamento de padrões das diversas condições de onda e vento encontradas no litoral brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J.; MELO, E. Wind waves at the northern coast of santa catarina. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 49, n. 1/2, p. 13–28, 2001.
- ALVES, J. H. G. d. M.; RIBEIRO, E. O.; MATHESON, G. S. G.; LIMA, J. A. M.; RIBEIRO, C. E. P. Reconstituição do clima de ondas no sul-sudeste brasileiro entre 1997 e 2005. **Revista Brasileira de Geofísica**, SciELO Brasil, v. 27, n. 3, p. 427–445, 2009.
- ARAÚJO, C. E.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave regime characteristics of the southern brazilian coast. In: **Proceedings of the sixth international conference on coastal and port engineering in developing countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper**. [S.l.: s.n.], 2003. p. 15.
- ARDHUIN, F.; ROGERS, E.; BABANIN, A. V.; FILIPOT, J.-F.; MAGNE, R.; ROLAND, A.; WESTHUYSEN, A. van der; QUEFFEULOU, P.; LEFEVRE, J.-M.; AOUF, L.; COLLARD, F. Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. part i: Definition, calibration, and validation. **Journal of Physical Oceanography**, American Meteorological Society, v. 40, n. 9, p. 1917–1941, set. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/2010jpo4324.1>>.
- BABANIN, A. V.; JIANG, H. Ocean swell: How much do we know. In: **Volume 3A: Structures, Safety and Reliability**. American Society of Mechanical Engineers, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/omae2017-61692>>.
- BATTJES, J. A.; JANSSEN, J. P. F. M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. In: **Coastal Engineering 1978**. American Society of Civil Engineers, 1978. Disponível em: <<https://doi.org/10.1061/9780872621909.034>>.
- BOUWS, E.; DRAPER, L.; SHEARMAN, E.; LAING, A.; FEIT, D.; MASS, W.; EIDE, L.; FRANCIS, P.; CARTER, D.; BATTJES, J. Guide to wave analysis and forecasting. wmo-no. 702. **World Meteorological Organization**, 2018.
- CAMPOS, R. Análise dos extremos de onda no rio de janeiro associados a ciclones extratropicais no atlântico sul. masters dissertation. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de . . . , 2009.
- CANDELLA, R. N. Characteristics of ocean waves off fortaleza, CE, brazil, extracted from 1-year deep-water measured data. **Ocean Dynamics**, Springer Science and Business Media LLC, v. 69, n. 10, p. 1239–1251, ago. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10236-019-01293-z>>.
- CANDELLA, R. N.; CANDELLA, M. V. Investigações sobre a ocorrência de ondas anormais em arraial do cabo, rj. **Revista Brasileira de Geofísica**, SciELO Brasil, v. 28, p. 551–561, 2010.
- CAVALCANTI, I. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de Textos, 2016. ISBN 9788579752346. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=6sYjDAAAQBAJ>>.
- CHUNG, J. C. Correlations between the tropical atlantic trade winds and precipitation in northeastern brazil. **Journal of Climatology**, Wiley, v. 2, n. 1, p. 35–46, jan. 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/joc.3370020104>>.
- DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. 1 - meteorologia da bacia de campos. In: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. (Ed.). **Meteorologia e oceanografia**.

Rio de Janeiro: Campus, 2015. p. 1–54. ISBN 978-85-352-6208-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535262087500088>>.

DEVORE, J.; SILVA, J. da. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. Pioneira Thomson Learning, 2006. ISBN 9788522104598. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=1JOIPgAACAAJ>>.

FARIAS E.G.G; SOUZA, J. Chegada dispersiva de campos de ondas swell na costa oeste do estado do ceará-brasil. **Arquivos de Ciências do Mar**, FapUNIFESP (SciELO), v. 45, n. 1, p. 69–74, jun. 2012.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS ATUANTES SOBRE a REGIÃO NORDESTE DO BRASIL e a INFLUÊNCIA DOS OCEANOS PACÍFICO e ATLÂNTICO NO CLIMA DA REGIÃO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, dez. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>>.

FISCH, C. I. Caracterização do clima de ondas na costa do ceará. **Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, Brazil**, 2008.

HASSELMANN, K. On the non-linear energy transfer in a gravity-wave spectrum part 1. general theory. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press (CUP), v. 12, n. 04, p. 481, abr. 1962. Disponível em: <<https://doi.org/10.1017/s0022112062000373>>.

HASSELMANN, K.; BARNETT, T.; BOUWS, E.; CARLSON, H.; CARTWRIGHT, D.; ENKE, K.; EWING, J.; GIENAPP, H.; HASSELMANN, D.; KRUSEMAN, P.; MEERBURG, A.; MULLER, P.; OLBERS, D.; RICHTER, K.; SELL, W.; WALDEN, H. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap). **Deut. Hydrogr. Z.**, v. 8, p. 1–95, 01 1973.

HASSELMANN, S.; HASSELMANN, K.; ALLENDER, J. H.; BARNETT, T. P. Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. part II: Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. **Journal of Physical Oceanography**, American Meteorological Society, v. 15, n. 11, p. 1378–1391, nov. 1985. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1985\)015<1378:capotn>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015<1378:capotn>2.0.co;2)>.

INNOCENTINI ARANTES, F.; MICHELETO. 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.

INNOCENTINI, S.; CS, A. F. P.; IN, B. Marulhos no litoral norte do brasil gerados por furações: Caso de 24 de outubro de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, v. 16, n. 2, p. 177–186, 2000.

JIANG, H.; BABANIN, A. V.; CHEN, G. Event-based validation of swell arrival time. **Journal of Physical Oceanography**, American Meteorological Society, v. 46, n. 12, p. 3563–3569, dez. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1175/jpo-d-16-0208.1>>.

KHARIF, C.; PELINOVSKY, E. Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, Elsevier, v. 22, n. 6, p. 603–634, 2003.

LIU, Q.; BABANIN, A. V.; ROGERS, W. E.; ZIEGER, S.; YOUNG, I. R.; BIDLOT, J.-R.; DURRANT, T.; EWANS, K.; GUAN, C.; KIREZCI, C.; LEMOS, G.; MACHUTCHON, K.;

- MOON, I.-J.; RAPIZO, H.; RIBAL, A.; SEMEDO, A.; WANG, J. Global wave hindcasts using the observation-based source terms: Description and validation. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, American Geophysical Union (AGU), v. 13, n. 8, ago. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2021ms002493>>.
- MALACARNE, M.; RIBEIRO, F. K. ANÁLISE DA FREQUÊNCIA e DO PADRÃO DOS VENTOS NA REGIÃO DA GRANDE VITÓRIA ENTRE 2006 e 2016. **REVISTA GEONORTE**, Revista Geonorte, v. 9, n. 32, p. 137–159, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.21170/geonorte.2018.v.9.n.32.137.159>>.
- MELO, E. Instrumental confirmation of the arrival of north atlantic swell to the ceará coast. In: . [S.l.: s.n.], 1995.
- MELO, E.; HAMMES, G.; FRANCO, D. Estudo de caso: a ressaca de agosto de 2005 em santa catarina. anais. In: **2º Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, FURG, Rio Grande**. [S.l.: s.n.], 2006.
- NOBRE, P.; SRUKLA, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical atlantic and south america. **Journal of Climate**, American Meteorological Society, v. 9, n. 10, p. 2464–2479, out. 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<2464:vosstw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<2464:vosstw>2.0.co;2)>.
- NOGUEIRA, I. **Caracterização do Clima de Ondas na Bacia do Espírito Santo Através de Modelagem Numérica**. [S.l.]: M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- OLAGNON, M.; ATHANASSOULIS, G. A. **Rogue Waves 2000: Proceedings of a Workshop Organized by Ifremer and Held in Brest, France, 29-30 November 2000, Within de Brest SeaTechWeek 2000**. [S.l.]: Editions Quae, 2001. v. 32.
- PARENTE, C. E.; NOGUEIRA, I. C. M.; MARTINS, R. P.; RIBEIRO, E. O. 2 - climatologia de ondas. In: MARTINS, R. P.; GROSSMANN-MATHESON, G. S. (Ed.). **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Campus, 2015. p. 55–98. ISBN 978-85-352-6208-7. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978853526208750009X>>.
- PARISE, C. K.; CALLIARI, L. J.; KRUSCHE, N. Extreme storm surges in the south of brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, v. 57, n. 3, p. 175–188, Jul 2009. ISSN 1679-8759. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/bjoce/a/WfxcWmTHgq6pctypbZtYS9p/>>.
- PEREIRA, J.; CANDELLA, R.; CARVALHO, J. Wave climate at the south coast of arraial do cabo, rio de janeiro, brazil: Distribution of wave parameters o clima de ondas na costa sul de arraial do cabo, rj: Distribuição de parâmetros de onda. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, UNIVALI, 2000.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on nww3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, SciELO Brasil, v. 58, n. 1, p. 53–70, 2010.
- PINHO, U.; LIU, P.; EDUARDO, C.; RIBEIRO, C. Freak waves at campos basin, brazil. **Geofizika**, v. 21, 01 2004.
- RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de santa catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, SciELO Brasil, v. 22, n. 2, p. 135–151, 2004.

SCHNEIDER, T.; BISCHOFF, T.; HAUG, G. H. Migrations and dynamics of the intertropical convergence zone. **nature**, Nature Publishing Group, v. 513, n. 7516, p. 45–53, 2014.

SILVA, G. **Caracterização do vento na região nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas**. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003, 2003.

SILVA, P. **Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica**. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado. São José dos Campos, SP: Meteorologia, Instituto . . . , 2013.

SOUZA, E. B. de; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the el niño, la niña and atlantic dipole paterni on the amazonian rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, FapUNIFESP (SciELO), v. 30, n. 2, p. 305–318, jun. 2000. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1809-43922000302318>>.

TOLMAN, H. L.; CHALIKOV, D. Source terms in a third-generation wind wave model. **Journal of Physical Oceanography**, American Meteorological Society, v. 26, n. 11, p. 2497–2518, nov. 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<2497:stiatg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<2497:stiatg>2.0.co;2)>.

TOZZI, H.; CALLIARI, L. Trajetórias e distribuição das tempestades extratropicais eo impacto na costa do rio grande do sul. In: **CONGRESSO LATINOAMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR**. [S.l.: s.n.], 1999. v. 7.

WALISER, D. E.; SOMERVILLE, R. C. Preferred latitudes of the intertropical convergence zone. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 12, p. 1619–1639, 1994.

XAVIER, T.; XAVIER, A. F. S.; DIAS, M.; DIAS, P. Interrelações entre eventos enos (enso), a zcít (itcz) no atlântico e a chuva nas bacias hidrográficas do ceará. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 111–126, 2003.

YOUNG, I. R. **Wind generated ocean waves**. [S.l.]: Elsevier, 1999.

8 SÉRIES TEMPORAIS DE DADOS OBSERVADOS E REANÁLISE DO WAVERYS

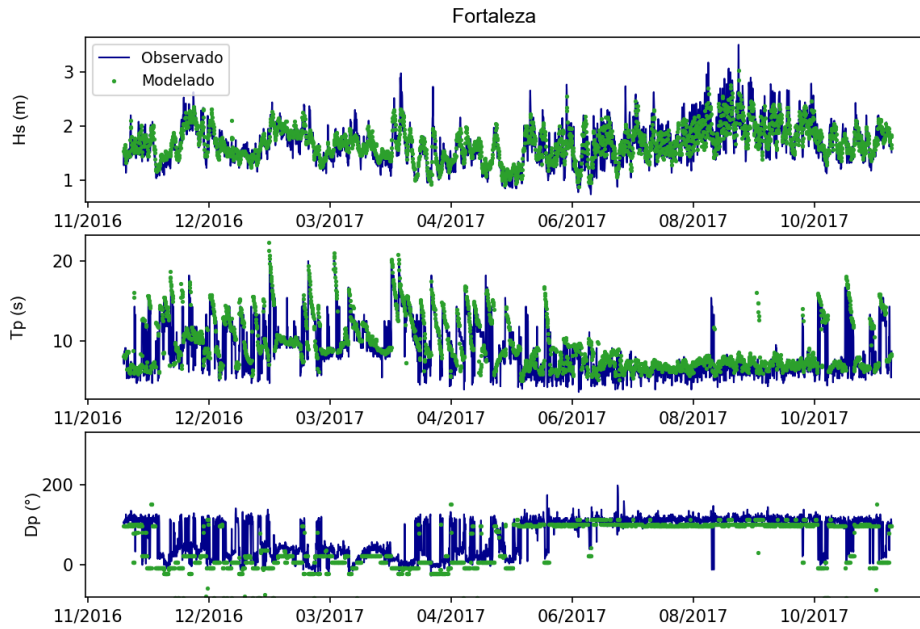


Figura 15 – Dados observados da região de Fortaleza, estado do Ceará.

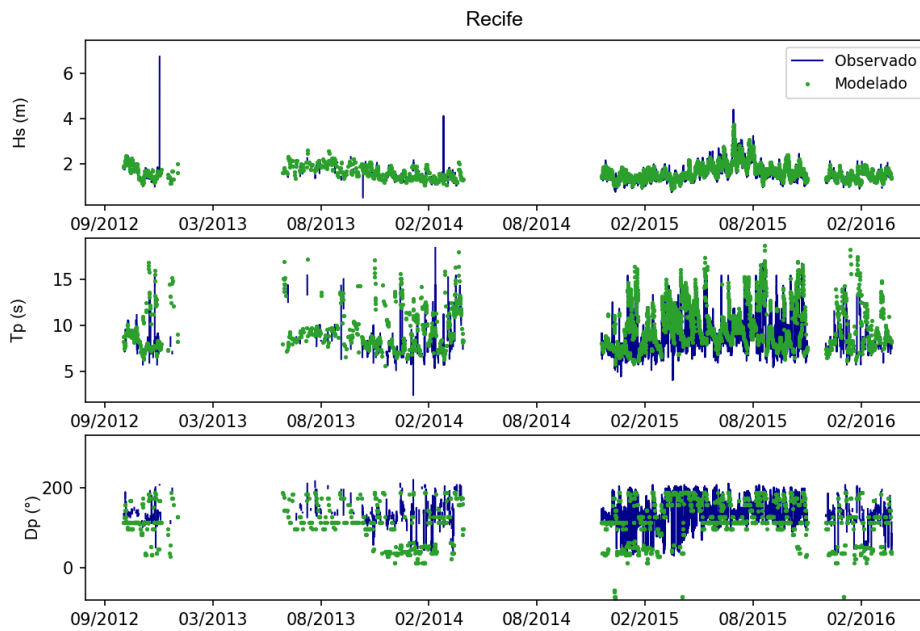


Figura 16 – Dados observados da região de Recife, estado de Pernambuco.

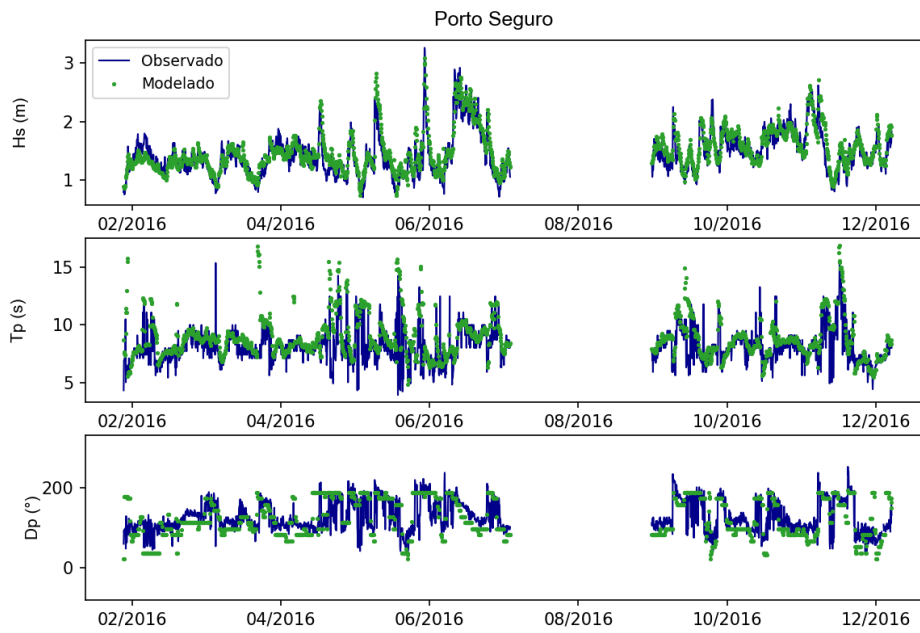


Figura 17 – Dados observados da região de Porto Seguro, estado da Bahia.

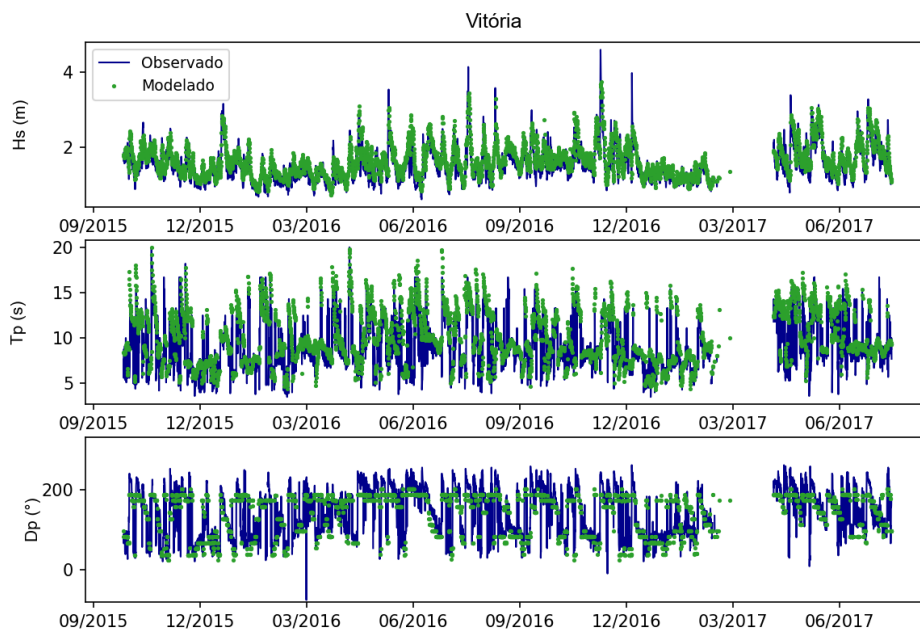


Figura 18 – Dados observados da região de Vitória, estado do Espírito Santo.

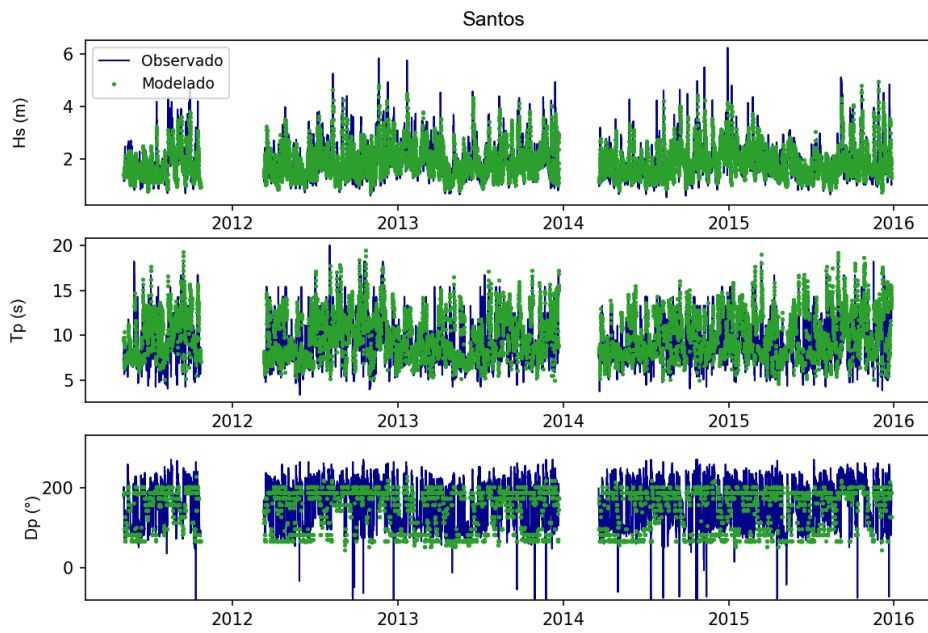


Figura 19 – Dados observados da região de Santos, estado do São Paulo.

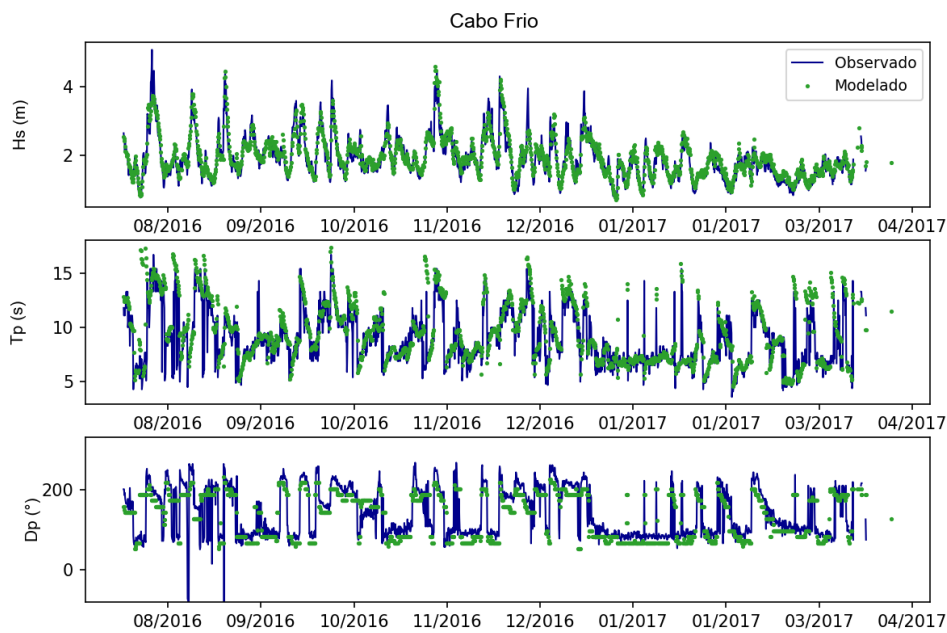


Figura 20 – Dados observados da região de Cabo Frio, estado do Rio de Janeiro.

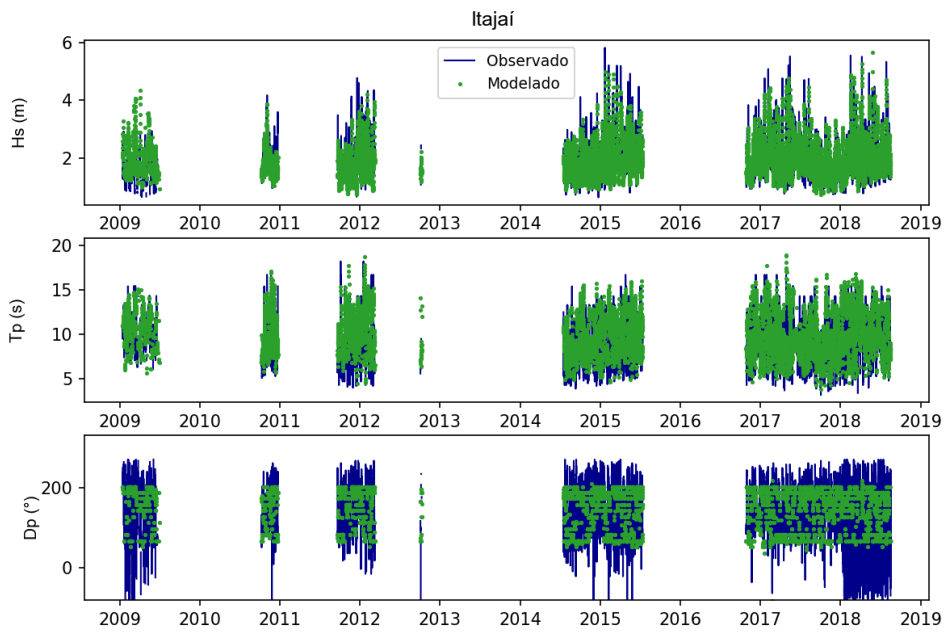


Figura 21 – Dados observados da região de Itajaí, estado de Santa Catarina.

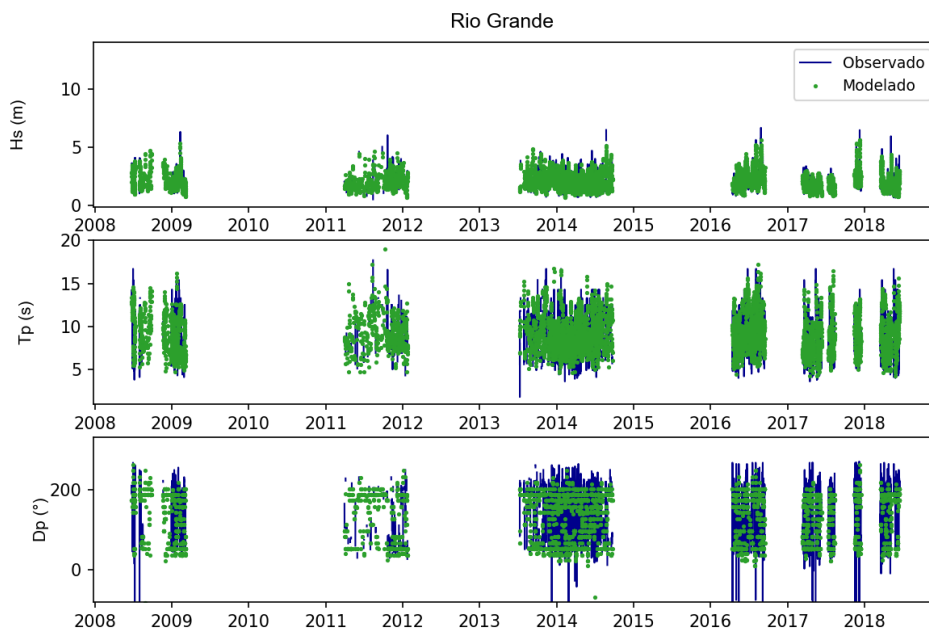


Figura 22 – Dados observados da região de Rio Grande, estado do Rio Grande do Sul.