

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Ciências Atmosféricas

Renan de Freitas Pimentel dos Anjos

**Impacto da correção do vento de superfície e
da regionalização dinâmica na representação
de eventos extremos de vento e onda no
oeste do Atlântico Sul**

São Paulo

2023

Renan de Freitas Pimentel dos Anjos

**Impacto da correção do vento de superfície e
da regionalização dinâmica na representação
de eventos extremos de vento e onda no
oeste do Atlântico Sul**

Dissertação apresentada ao Departamento de
Astronomia do Instituto de Astronomia, Geofísica
e Ciências Atmosféricas da Universidade de
São Paulo como requisito parcial para a ob-
tenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

São Paulo

2023



COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

LISTA DE ASSINATURAS

MESTRANDO: Renan de Freitas Pimentel dos Anjos

PROGRAMA: Meteorologia

TÍTULO: "Impacto da correção do vento de superfície e da regionalização dinâmica na representação de eventos extremos de vento e onda no oeste do Atlântico Sul"

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Ricardo de Camargo - Orientador
IAG/USP
(por videoconferência)

Profa. Dra. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira
IGEO/UFRJ
(por videoconferência)

Dr. José Antonio Moreira Lima
CENPES/PETROBRAS
(por videoconferência)

MESTRANDO:



Documento assinado digitalmente
RENAN DE FREITAS PIMENTEL DOS ANJOS
Data: 10/12/2023 10:08:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Renan de Freitas Pimentel dos Anjos
(por videoconferência)

São Paulo, 16 de outubro de 2023.

À Maria Flor e ao meu avô Lauro (In Memoriam)

Agradecimentos

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me deu apoio e se tornou a minha base durante todos os momentos da minha vida. Especialmente aos meus pais, Andreia e Reinaldo, que sempre representaram força, resiliência, amor e carinho. Sempre colocando nossas necessidades acima das deles.

Aos meus irmãos, Andre e Laura, que me ensinaram a convivência (nem sempre) harmoniosa e o respeito ao próximo, e que se tornaram, hoje, meus grandes amigos.

À Aline, minha amiga, namorada, esposa e mãe incrível.

Aos meus filhos, Eduardo e Maria Flor, que são as peças que faltavam na minha vida.

Meus colegas do MASTER (Danilo, Rodrigo, Matheus e Jean), obrigado pela convivência, mesmo que pouca (pois eu moro longe pra caramba), que foi fundamental para que eu me sentisse parte integrante dessa universidade. Em especial ao Matheus, por ter aberto a porta do seu lar e me deixado "cair no sofá" quando tinha aula muito cedo e eu tinha que ir trabalhar após o horário da aula. Pelos inúmeros "ifood" e risadas vendo Casimiro. Me ajudou muito a superar o cansaço que é fazer mestrado, trabalhar e cuidar de uma família, tudo ao mesmo tempo.

Ao meu orientador Ricardo de Camargo, mestre querido que sempre me apoiou, mesmo quando parecia que eu estava perdido entre tantas responsabilidades.

À Carol Gramcianinov e Natalia Pillar, que exemplificam a alta qualidade de cientistas produzidas pelas universidades brasileiras. Agradeço pela ajuda na escrita científica, pelos *scripts* e pelas referências que ajudaram a embasar meu trabalho.

Dedico este trabalho às inúmeras agências de fomento à pesquisa que, mesmo que minha jornada não tenha sido pavimentada com uma bolsa, desempenham um papel essencial na estruturação e promoção do conhecimento em nosso país. Sua existência e contínua

dedicação enriquecem o cenário acadêmico, criando oportunidades e fomentando a ciência, tecnologia e inovação. Seu valor mantém a ciência viva e pulsante, abrindo portas e incentivando mentes curiosas.

“Ao infinito e além!”

Buzz Lightyear

Resumo

Os impactos da regionalização dinâmica e da correção do vento de superfície na representação de eventos extremos de vento e onda no sudoeste do Atlântico Sul foram investigados. O estudo é relevante para entender melhor os eventos intensos, como ciclones, que possuem potencial destrutivo em infraestruturas costeiras, operações marítimas e vida humana. Para isso, foi realizada uma análise de quatro simulações do modelo de onda WaveWatch III, comparando o desempenho de modelos regionais e globais, com e sem correção do vento. A pesquisa é feita no contexto do projeto "*Western South Atlantic Climate Experiment - WeSACEx*", desenvolvido no Departamento de Ciências Atmosféricas e financiado pelo CENPES/PETROBRAS com recursos da ANP. A análise em quatro pontos selecionados revela que as simulações regionais e globais têm desempenhos variados, dependendo do local. As simulações regionais apresentaram menores erros no ponto da boia Rio Grande (PNBOIA), enquanto as simulações globais tiveram desempenho superior nos outros pontos (boia Itajaí - PNBOIA) e dois pontos da reanálise do WAVERYS). Em todos os pontos, as simulações regionais demonstraram erros significativos na componente dispersiva do erro quadrático médio. Todas as simulações corroboram que o a época mais energética das ondas é o outono/inverno, que ocorre entre os meses de março e agosto. As análises dos eventos extremos indicam que a regionalização dinâmica tem um impacto maior nos valores de altura significativa de onda (H_s) do que a correção do vento e a interação não linear entre esses fatores. Apesar de em menor escala, a correção do evento resultou num aumento da intensidade dos eventos analisados, promovendo valores maiores de H_s . Análise sinótica foi realizada para identificar fatores motivadores de diferença entre as simulações globais e regionais, no entanto, não foi possível estabelecer uma relação entre as condições sinóticas existentes durante o evento extremo e a qualidade da representação

do evento nas simulações. Os resultados mostram que, embora os modelos regionais sejam geralmente escolhidos com a intenção de promover uma boa representação de eventos mais intensos e mais energéticos, uma maior resolução não necessariamente resulta em uma representação mais precisa desses eventos. Além disso, a pesquisa destaca a necessidade de melhores ferramentas para analisar o desempenho dos modelos, particularmente os regionais. Outros fatores, como a falta de acoplamento oceano-atmosfera e as configurações de relaxação às condições forçantes de um modelo regional, também podem influenciar a posição e intensificação dos ciclones.

Abstract

The impacts of dynamic regionalization and surface wind correction on the representation of extreme wind and wave events in the Southwest South Atlantic have been investigated. The study is relevant to better understand intense events, such as cyclones, which have destructive potential on coastal infrastructures, maritime operations, and human life. For this, an analysis was carried out on four simulations of the WaveWatch III wave model, comparing the performance of regional and global models, with and without wind correction. The research is carried out in the context of the project "*Western South Atlantic Climate Experiment - WeSACEx*", developed in the Department of Atmospheric Sciences and funded by CENPES/PETROBRAS with resources from ANP. The analysis at four selected points reveals that regional and global simulations have varied performances, depending on the location. The regional simulations showed fewer errors at the PNBOIA - Rio Grande point, while the global simulations had superior performance at the other points (PNBOIA - Itajaí and two points from the WAVERYYS reanalysis). At all points, regional simulations demonstrated significant errors in the dispersive component of the root mean square error. All simulations corroborate that the most energetic wave period is autumn/winter, which occurs between the months of March and August. The analyses of extreme events indicate that dynamic regionalization has a greater impact on the significant wave height (Hs) values than wind correction and the non-linear interaction between these factors. Although on a smaller scale, the event correction resulted in an increase in the intensity of the analyzed events, promoting higher Hs values. A synoptic analysis was carried out to identify motivating factors of difference between global and regional simulations, however, it was not possible to establish a relationship between the existing synoptic conditions during the extreme event and the quality of the event's representation

in the simulations. The results show that although regional models are generally chosen with the intention of promoting a good representation of more intense and more energetic events, higher resolution does not necessarily result in a more accurate representation of these events. In addition, the research highlights the need for better tools to analyze the performance of the models, particularly the regional ones. Other factors, such as the lack of ocean-atmosphere coupling and the setup of nudging schemes to forcing conditions of a regional model, can also influence the position and intensification of cyclones.

Lista de Figuras

- 1.1 Blocos exploratórios de diversos operadores. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2021). 26
- 2.1 Situação onde o AAS domina a região da Bacia de Campos e a progressão de uma frente fria gerando ventos de quadrante sul (Violante-Carvalho, 1998) 31
- 2.2 Densidade de gênese para o domínio do Atlântico Sul (marcado com linha tracejada cinza) calculada para todo o período de 1979-2010. As quatro regiões de gênese estão marcadas com linha preta. A unidade de densidade é ciclone por 10^6km^2 por mês (Gramcianinov et al., 2019). 33
- 2.3 Regiões preferenciais de ciclogênese no oeste do Atlântico Sul entre 1979 e 2020 em (a) todas as estações, (b) verão (DJF) e (c) inverno (JJA). A unidade de densidade é gênese por mês por 10^6 km^2 (Gramcianinov et al., 2020). 34
- 2.4 Esquema das três situações associadas a ondas extremas dentro do ciclone extratropical. (a) As ondas extremas (sombreado ondulado) ocorrem atrás da frente fria; (b) à frente da frente fria, na zona de convergência dos ventos; e (c) ao longo da frente quente no setor quente do ciclone. As frentes frias e quentes são representadas de acordo com a convenção meteorológica. O centro aproximado de baixa pressão e os sistemas de alta pressão circundantes são representados por "B" e "A", respectivamente. Adaptado, para o português, de Gramcianinov et al. (2020). 38

2.5	Evento extremo ocorrido em agosto de 1992 medido por uma boia localizado em 22,31°S e 39,58°O. Altura significativa da onda em metros medida pela boia (vermelho); simulação do WW3 usando discretização espectral de 25 frequências e 24 direções e resolução de grade de 0,3° (linha sólida preto); simulação do WW3 usando discretização espectral de 29 frequências e 48 direções, e resolução de 0,067° (linha tracejado azul) (Campos et al., 2018).	41
3.1	Mapa de Localização dos pontos de análise.	46
3.2	Domínio das simulações usadas no WRF (preto), WW3 (vermelho). A escala de nível (m) se refere a topografia extraída do ETOPO2 (NOAA, 2022). . .	50
4.1	Exemplo da aplicação do processo de ajuste linear da intensidade do vento para o ponto correspondente à boia de Rio Grande para ventos da rodada histórica de clima presente (1979 a 2018) utilizando a reanálise do CFSR com o CCMP como referência. No Q-Q Plot entre as séries a linha vermelha destaca o ajuste linear a partir do percentil de 80%. Os pontos azuis são os percentis inferiores a 80 e as pretas, os percentis acima do percentil 80. . .	54
4.2	Figura demonstrativa da categorização da regiões de máxima intensidade do vento. Exemplo de evento com máximo do vento ocorrido no setor 2. A caixa cinza ao redor do centro do ciclone indica os 10° ao redor do ciclone que foram utilizados na realização das composições.	62
4.3	Área da simulação do WW3 (cinza); área de busca dos ciclones (amarelo).	64
5.1	Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto da boia Rio Grande - RS. Observação (preto), WAVERYS (vermelho), simulação H_{00} - Global sem correção (azul), H_{01} - Global corrigido (verde claro), H_{10} - Regional sem correção (laranja) e H_{11} - Regional corrigido (verde) no período 2009 a 2019.	67

- 5.2 Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto da boia de Rio Grande, no período de 2011 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: dados observados, WAVERYYS, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho). 69
- 5.3 Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto da boia de Itajaí. Observação (preto), WAVERYYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 2009 a 2019. A média da observação é apresentada (cinza) seguido dos percentis mais elevados (90, 95 e 99) 70
- 5.4 Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto da boia de Itajaí, no período de 2009 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: dados observados, WAVERYYS, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho). 72
- 5.5 Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto *Offshore*. WAVERYYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 1993 a 2018. A média da observação é apresentada (cinza) seguido dos percentis mais elevados (90, 95 e 99) 73
- 5.6 Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto *Offshore*, no período de 1993 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: WAVERYYS, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho). 75
- 5.7 Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto *Offshore Montevideo*. WAVERYYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 1993 a 2019. A média da observação é apresentada (cinza) seguido dos percentis mais elevados (90, 95 e 99) . . . 76

- 5.8 Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto *montevideo*, no período de 1993 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: WAVERYS, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho). 78
- 5.9 Função de densidade de probabilidade do percentil 95 de H_s (m) para a boia de Rio Grande (a), Itajaí (b), o ponto *Offshore* (c) e o ponto *Offshore Montevideo* (d). Observação (preto), WAVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 2009 a 2019. 79
- 5.10 Função de densidade de probabilidade de H_s (m) para a boia de Rio Grande (a), Itajaí (b), o ponto *Offshore* (c) e o ponto *Offshore Montevideo* (d). Observação (preto), WAVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 2009 a 2019. 80
- 5.11 Diagrama QQ-plot das simulações H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) comparadas com (a e b) os dados observados nas boias do PNBOIA (Rio Grande - RS e Itajaí - SC, respectivamente) e (c e d) com os dados nos pontos da reanálise WAVERYS (*Offshore* e *Offshore Montevideo*, respectivamente). 82
- 5.12 Diagrama de Taylor com a avaliação da reanálise WAVERYS, as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} em relação à boia. A Figura (a e b) representam os dados observados nas boias do PNBOIA (Rio Grande - RS e Itajaí - SC, respectivamente) e (c e d) com os dados nos pontos da reanálise WAVERYS (*Offshore* e *Offshore Montevideo*, respectivamente). 83
- 5.13 Boxplots sazonais de H_s para cada ponto de análise: Rio Grande (a), Itajaí (b), *Offshore* (c) e *Offshore Montevideo* (d). A comparação inclui dados observados (preto), reanálise WAVERYS (vermelho) e simulações de modelos numéricos: H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde). Os boxplots exibem a mediana (linha central), primeiro e terceiro quartis (caixa), intervalo interquartilico (IQR) e possíveis *outliers* (pontos individuais) para cada conjunto de dados nos quatro períodos sazonais: primavera (setembro a novembro), verão (dezembro a fevereiro), outono (março a maio) e inverno (junho a agosto). 84

5.14	Mapa de média anual de Hs para o período de 1979-2018 no domínio ATLSUL. (a) simulação H_{00} ; (b) simulação H_{11}	86
5.15	Mapa de média anual de Hs para o período de 1979-2018 no domínio ATLSUL. (a) Efeito devido a regionalização (ΔH_1) (b) a correção do vento (ΔH_2) (c) a interação não-linear entre os fatores (ΔS); calculadas pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3.	87
5.16	Série temporal da altura de onda (m) comparativa entre o modelo WAVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período do evento 2. (a) Ponto da Boia Rio Grande ; (b) Ponto da Boia Itajaí ; (c) Ponto <i>Offshore</i> e (d) Ponto <i>Offshore Montevideo</i> . A linha tracejada vermelha corresponde ao horário de ocorrência do evento (Tabela 4.2).	89
5.17	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	91
5.18	Velocidade do vento (m/s) e vetores de direção a 10 metros para 01/02/2002 às 12 UTC: (a) para a simulação H_{00} e (b) para a simulação H_{10} . O ponto vermelho representa o centro do ciclone segundo Gramscianinov et al. (2020).	92
5.19	Mudança simulada na altura significativa de onda no dia 01/02/2002 12UTC. (a) diferença entre H_{11} e H_{00} . (b) efeito devido a regionalização (ΔH_1), (c) a correção do vento (ΔH_2) e (d) a interação não-linear entre os fatores (ΔS); calculadas pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3. Os vetores de vento são referentes a simulação H_{00}	93
5.20	Série temporal da altura de onda (m) comparativa entre o modelo WAVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período do evento 10. (a) Ponto da Boia Rio Grande ; (b) Ponto da Boia Itajaí ; (c) Ponto <i>Offshore</i> e (d) Ponto <i>Offshore Montevideo</i> . A linha tracejada vermelha corresponde ao horário de ocorrência do evento (Tabela 4.2).	94

5.21	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	96
5.22	Velocidade do vento (m/s) e vetores de direção a 10 metros para 19/09/2002 às 18 UTC: (a) para a simulação H_{00} e (b) para a simulação H_{10} . O ponto vermelho representa o centro do ciclone segundo Gramscianinov et al. (2020).	97
5.23	Mudança simulada na altura significativa de onda no dia 19/09/2002 às 18 UTC. (a) diferença entre H_{11} e H_{00} . (b) efeito devido a regionalização (ΔH_1), (c) a correção do vento (ΔH_2) e (d) a interação não-linear entre os fatores (ΔS); calculadas pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3. Os vetores de vento são referentes a simulação H_{00}	98
5.24	Trajetórias dos 10 ciclones com maior intensidade do vento ocorrendo: (a) no setor 4, (b) no setor 1, (c) no setor 3 e (d) no setor 2 do ciclone, seguindo a orientação definida na Figura 4.2.	100
5.25	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	101
5.26	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial, pressão reduzida ao nível médio do mar e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	103
5.27	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	105
5.28	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	107

5.29	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	109
5.30	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	111
5.31	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	113
5.32	Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.	114
5.33	Composições dos 10 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da correção do vento nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2.	117
5.34	Composições dos 10 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da regionalização nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2.	118
5.35	Trajetórias dos 50 ciclones com maior intensidade do vento ocorrendo: (a) no setor 4, (b) no setor 1, (c) no setor 3 e (d) no setor 2 do ciclone, seguindo a orientação definida na Figura 4.2.	119

5.36 Composições dos 50 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da correção do vento nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2. 120

5.37 Composições dos 50 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da regionalização nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2. 122

Lista de Tabelas

3.1	Localização dos pontos de validação e comparação	48
3.2	Informações do <i>setup</i> utilizado nas simulações do modelo WW3	51
4.1	Simulações realizadas	55
4.2	Eventos extremos selecionados para análise. A duração é descrita em horas, Hs-max em metros, vento máximo a 10 m em m/s, e a pressão mínima ao nível do mar em hPa. Tabela adaptada de Gramscianinov et al. (2020).	61
5.1	Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para a boia de Rio Grande - RS comparando os dados observados, as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} e a reanálise WEVERYS.	68
5.2	Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para a boia de Itajaí comparando os dados observados, as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} e a reanálise WEVERYS.	71
5.3	Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para o ponto <i>Offshore</i> comparando a reanálise WEVERYS com as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11}	74
5.4	Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para o ponto <i>Offshore Montevideo</i> comparando a reanálise WEVERYS com as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11}	77
5.5	Percentual de ciclones por setor	119

Sumário

1. <i>Introdução</i>	25
1.1 Contextualização e Motivação	25
1.1.1 Objetivo Geral	27
1.1.2 Objetivos Específicos	27
2. <i>Fundamentação Teórica</i>	29
2.1 Ondas de Superfície Oceânicas	29
2.2 Clima de Ondas na Região Sudeste e Sul	30
2.3 Eventos Extremos na Região	35
2.4 Limitações dos <i>hindcast</i> de onda	39
2.5 Separação de Fatores	43
2.5.1 Propriedades do método	43
3. <i>Conjuntos de dados e produtos numéricos</i>	45
3.1 Observações	45
3.1.1 <i>Cross-Calibrated Multi-Platform</i> (CCMP)	45
3.1.2 Programa Nacional de Boias Oceanográficas (PNBOIA)	45
3.2 Produtos de modelagem numérica	46
3.2.1 <i>Climate Forecast System Reanalysis</i> (CFSR)	46
3.2.2 <i>WAVEreanalYSis</i> (WAVERYYS)	47
3.3 Experimentos de Regionalização	48
3.3.1 Modelos utilizados	48
3.3.1.1 <i>Weather Research and Forecasting</i> (WRF)	48
3.3.1.2 <i>WAVEWATCH III</i> (WW3)	49

3.3.2	Simulações do WeSACEx	49
3.3.3	Simulação complementar	51
4.	<i>Métodos</i>	53
4.1	Calibração dos campos de vento	53
4.2	Separação de Fatores	54
4.3	Análise dos eventos extremos de onda	56
4.3.1	Estudo de casos	60
4.4	Separação por setores de influência	61
4.5	Composições	63
5.	<i>Resultados</i>	65
5.1	Análise pontual	65
5.2	Campos Médios	85
5.3	Eventos extremos	87
5.4	Análise dos 10 ciclones mais intensos por setor	98
5.4.1	Setor 1	101
5.4.2	Setor 2	104
5.4.3	Setor 3	107
5.4.4	Setor 4	111
5.4.5	Composições	115
5.5	Análise dos 50 ciclones mais intensos por setor	118
5.5.1	Composições	120
6.	<i>Considerações Finais</i>	123
	<i>Referências</i>	127

Introdução

1.1 Contextualização e Motivação

A costa brasileira é composta por diversas bacias sedimentares de exploração de petróleo e gás natural em regiões *offshore* (Figura 1.1), como a Bacia de Santos, Campos e Espírito Santo na região Sudeste, além da Bacia de Sergipe-Alagoas no Nordeste do país, dentre outras. De acordo com a ANP, em março de 2021, a produção de petróleo na Bacia de Santos ultrapassou 70% do total nacional, atingindo 2,67 milhões de barris equivalentes de petróleo por dia (barris de óleo/dia) em junho do mesmo ano (Agência Brasil, 2021; Poder360, 2021; Istoé, 2021).

A Bacia de Santos é a principal área do pré-sal brasileiro, onde se localiza o campo de Tupi, o maior produtor de petróleo e gás natural do país. A Bacia de Campos, por sua vez, foi responsável por 22% da produção nacional em março de 2021, com 812 mil barris de óleo/dia. A Bacia de Campos é a mais antiga e tradicional área produtora *offshore* do Brasil, onde se encontram campos como Marlim e Albacora (Petrobras, 2020). Em conjunto, as bacias de Santos e Campos representaram cerca de 92% da produção nacional em março de 2021, destacando a importância do litoral brasileiro para o setor petrolífero.

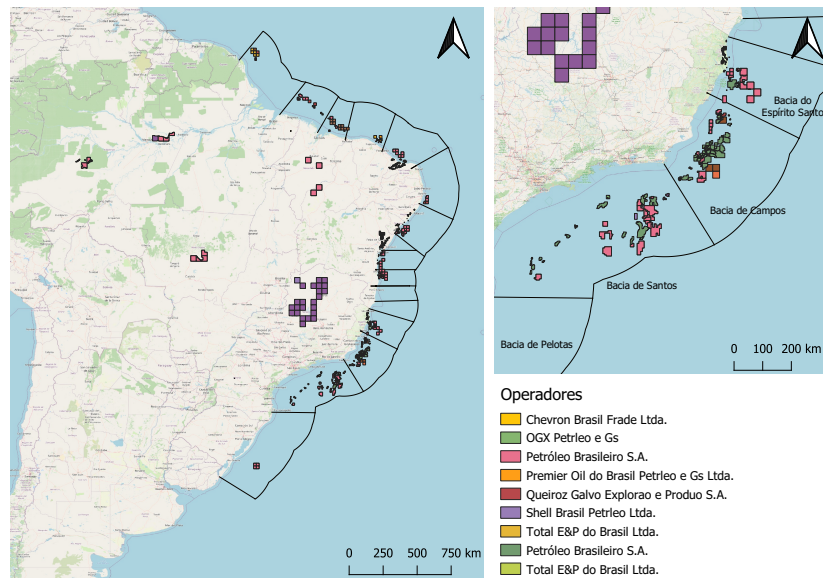


Figura 1.1: Blocos exploratórios de diversos operadores. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2021).

Em um contexto mais amplo, o Sudoeste do Atlântico Sul é uma região de elevada importância geoestratégica e econômica, onde ocorrem atividades marítimas essenciais, como navegação, pesca e exploração de recursos energéticos. Eventos extremos de onda, frequentemente associados a sistemas meteorológicos intensos (como ciclones tropicais, extratropicais e subtropicais), são um fator de risco crítico para a segurança, o desenvolvimento sustentável das atividades humanas e a preservação dos ecossistemas marinhos, pois têm potencial para causar danos significativos materiais e humanos.

Os ciclones, fenômenos meteorológicos que provocam mudanças significativas nos campos de pressão e vento, são diretamente associados a situações de interesse para este estudo. O presente trabalho visa contribuir para a compreensão de como os modelos regionais e globais simulam a ocorrência de eventos extremos de vento e onda associados a ciclones. A abordagem numérica é a ferramenta principal para a pesquisa proposta, estreitamente conectada ao projeto "Western South Atlantic Climate Experiment - WeSACEx". Este projeto, desenvolvido no Departamento de Ciências Atmosféricas e financiado pelo CENPES/PETROBRAS com recursos da ANP, tem como objetivo avaliar as condições extremas de ventos e ondas nas bacias sedimentares do Sudeste Brasileiro (Santos, Campos e Espírito Santo), tanto no clima presente (1979 a 2018) quanto em projeções futuras do IPCC para a porção Sudoeste do Oceano Atlântico Sul.

Apesar de sua importância, a ausência de dados de longo prazo ininterruptos medidos por boias oceanográficas no Atlântico Sul representa um desafio para a caracterização de eventos severos (Aguiar et al., 2021). Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de preencher essa lacuna e estudar o efeito de eventos extremos e mudanças climáticas utilizando regionalização (em inglês, *downscaling*) (Campos et al., 2012; Izaguirre et al., 2013; Guimarães et al., 2014; Osinski e Radtke, 2020; Aguiar et al., 2021).

O uso de modelos regionais no *downscaling* de modelos globais é uma abordagem amplamente utilizada para produzir informações mais detalhadas. Essa estratégia potencializa a representação de características topográficas locais e processos de pequena escala, frequentemente com o auxílio de modelos regionais aninhados. Técnicas como o Relaxação Newtoniana (ou *nudging*) desempenham um papel fundamental na manutenção da circulação de grande escala dos modelos globais (Ma et al., 2016; Nunes, 2016). No entanto, apesar desses procedimentos melhorarem a dinâmica desses modelos, ainda se faz necessária uma representação mais precisa de processos físicos (Nunes, 2016).

1.1.1 Objetivo Geral

Devido à grande importância do estudo climático e da previsão dos eventos extremos de onda no Sudoeste do Atlântico Sul, o objetivo principal desta dissertação de mestrado é aprofundar a compreensão do impacto do uso da regionalização dinâmica e da correção do vento de superfície na representação de eventos extremos de vento e onda no Sudoeste do Atlântico Sul.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Avaliar a performance de quatro simulações do modelo de onda *WAVEWATCH III* (WW3; Tolman et al., 2002; Tolman, 2002; Tolman et al., 2016), no período entre 1979 e 2018;
2. Analisar a importância relativa da correção do vento e da regionalização no conjunto de simulações do modelo de ondas, realizadas no âmbito do projeto WeSACEx, utilizando o método de separação de fatores (Stein e Alpert, 1993);
3. Identificar situações com as maiores diferenças entre as simulações para compreender a situação sinótica relacionada a estes casos e o motivo da boa ou má representação

do evento nas simulações do WW3;

4. Categorizar os ciclones rastreados por Gramscianinov et al. (2020) de acordo com a área em que ocorre a pista de vento e aplicar a metodologia de separação de fatores com o objetivo de formar composições para agrupar estes eventos. Essa abordagem visa identificar situações específicas na qual um modelo exibe desempenho superior ao outro.

Fundamentação Teórica

2.1 Ondas de Superfície Oceânicas

O presente estudo analisará ondas oceânicas superficiais na região sudoeste do Atlântico Sul. Essas ondas têm a gravidade como principal força restauradora e são geradas pela ação dos ventos na superfície do mar, que provocam oscilações na superfície marítima em relação a um estado de repouso (Phillips, 1957). Os principais mecanismo que podem determinar e limitar a Altura Significativa de Onda (H_s) são: a intensidade do vento, o tempo de atuação e o tamanho da pista de vento (Parente et al., 2015).

Nesse sentido, é necessário considerar as condições do clima de ondas na região de estudo, já que isso pode afetar as atividades das petroleiras, incluindo a exploração e produção de petróleo e gás natural. O conhecimento dessas condições, por meio de estudos e pesquisas, é fundamental para garantir a segurança e eficiência das operações *offshore* no litoral brasileiro.

Para estudar as ondas, é importante compreender os principais parâmetros que podem ser obtidos por meio de medições. Entre esses parâmetros estão: altura significativa, que indica a severidade do mar; o período de pico, que representa o valor máximo encontrado no espectro; e a direção de propagação, que é crucial para análises de gênese e climatologia de ondas (Holthuijsen et al., 1996). Sendo assim, é possível definir o clima de ondas a partir desses parâmetros medidos ao longo do tempo.

Entretanto, como esses parâmetros são regidos pela atividade atmosférica, é possível estabelecer espectros que correlacionam o vento e os parâmetros de onda. Formulações espectrais que relacionam o vento com o estado do mar foram estudadas e desenvolvidas por Pierson e Moskowitz (1964) e Hasselmann et al. (1973). Desde então, foram desenvolvidas

várias técnicas mais avançadas para análise e representação das condições do mar (Parente, 1999; Pinho, 2003; Mendes, 2005).

2.2 *Clima de Ondas na Região Sudeste e Sul*

A Bacia de Campos, localizada na região Sudeste do Brasil, é de grande relevância devido ao seu papel crucial nas atividades econômicas e, portanto, tem sido objeto de estudos nas últimas décadas. Embora as limitações relacionadas à disponibilidade de tecnologias de medição tenham representado um desafio em estudos prévios, os trabalhos pioneiros contribuíram com informações valiosas para o entendimento do fenômeno do clima de ondas na região (Souza, 1988; Parente e Souza, 1989; Violante-Carvalho, 1998).

Um exemplo dessas contribuições foi o estudo de Souza (1988), que, baseado em medições em águas profundas entre 1985 e 1986, revelou a persistência de ondas de nordeste geradas pelo Anticiclone do Atlântico Sul (AAS) e a chegada de ondulações de sul com longo período, oriundas de ciclones extratropicais, evidenciando um clima de ondas bimodal na região. Adicionalmente, o trabalho de Parente e Souza (1989) também forneceu informações relevantes para a compreensão do clima de ondas na Bacia de Campos.

No estudo de Violante-Carvalho (1998) sobre a evolução do clima de onda na Bacia de Campos, foram identificadas 12 situações distintas de mar, correlacionadas com padrões sinóticos associados. Essas situações foram divididas em dois grandes grupos (mostradas na Figura 2.1): a situação I, correspondente ao domínio do AAS na região da bacia, e a situação II, correspondente à influência de sistemas frontais na região, corroborando com o trabalho de Souza (1988).

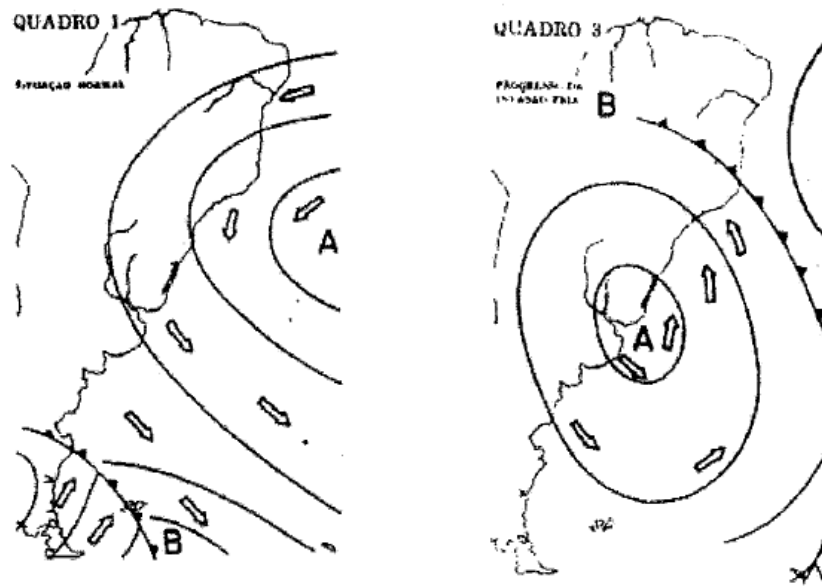


Figura 2.1: Situação onde o AAS domina a região da Baía de Campos e a progressão de uma frente fria gerando ventos de quadrante sul (Violante-Carvalho, 1998)

Os estudos de Parente (1999) e Parente et al. (2015) classificaram os estados de mar na Baía de Campos em quatro categorias: Bom Tempo, Bom Tempo com *swell*, Mau Tempo - sudeste/Anticiclones e Mau Tempo - sudoeste/Ciclones. Essas classificações permitiram aos pesquisadores analisar as características particulares de cada categoria. Por exemplo, Cardoso (2004) estudou extremos de onda durante Bom Tempo sem *swell*, enquanto Silva (2008) investigou Bom Tempo com *swell*.

A região da Baía de Campos tem influência do AAS, que tende a permanecer semi-estacionário na área. A presença deste anticiclone faz com que ventos do quadrante nordeste ocorram, estes associados às condições de mar favoráveis, ou seja, ventos de baixa intensidade em sua maioria (bom tempo). No entanto, essa condição de bom tempo é periodicamente interrompida pela passagem de ciclones e anticiclones que induzem uma mudança no vento e, conseqüentemente, nas ondas da região (Parente et al., 2015).

Mau Tempo é responsável pelas ondas mais intensas na Baía de Campos, sendo sudeste/Anticiclone associado à entrada de anticiclones e sudoeste/Ciclone relacionado à entrada de ciclones. Campos (2009) analisou ondulações geradas por ciclones extratropicais e mostrou que as maiores ondulações são provenientes do sudoeste, predominando no inverno e outono.

A Baía de Santos apresenta menor agitação marítima devido à presença frequente do

AAS (Palmeira, 2002). Nascimento (2013) identificou três categorias de classificação na região: bom tempo, mau tempo com ciclone e mau tempo com anticiclone migratório. A altura significativa padrão das ondas ao longo das estações foi de cerca de 2 metros (m), com direções de onda do quadrante sul, seguidas de leste e sudeste, e as maiores intensidades de ventos e valores de período de pico das ondas ocorreram no outono e inverno.

Sendo assim, o local de formação e a direção de propagação do ciclone, juntamente com as diferentes posições da pista de vento vão caracterizar condições de Bom Tempo ou Mau Tempo (Parente et al., 2015).

De fato, estudos têm mostrado que os extremos de onda na região estão majoritariamente associados a sistemas frontais, (Campos et al., 2018; Gramcianinov et al., 2020). Com o objetivo de entender melhor as regiões ciclogênicas no Atlântico Sul, diversos trabalhos foram conduzidos ao longo dos anos. Por exemplo, Gan e Rao (1991) desenvolveram um estudo baseado em dez anos de dados sobre a América do Sul, utilizando cartas sinóticas de pressão ao nível do mar de 1979 a 1988 para elaborar uma climatologia de ciclogênese na região. Como resultado, o estudo identificou duas principais áreas de formação de ciclones na costa leste da América do Sul: uma localizada no sudeste da Argentina e outra situada sobre o Uruguai.

O estudo realizado por Reboita et al. (2009) apresenta uma detalhada climatologia da ciclogênese no Oceano Atlântico Sul durante o período de 1990 a 1999, utilizando o modelo regional de clima RegCM3. Para detecção dos ciclones, foi desenvolvido um algoritmo que busca a vorticidade relativa ciclônica a 10 metros de altura, considerando sistemas com vorticidade igual ou menor do que $-1,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ e tempo de vida igual ou maior a 24 horas. Os resultados obtidos indicam a existência de três principais áreas de ciclogênese na costa leste da América do Sul: a costa sudeste da Argentina, em torno de $48^{\circ}S$ (identificada como RG 3); a foz do rio da Prata no Uruguai, em torno de $35^{\circ}S$ (identificada como RG 2); e a costa sul/sudeste do Brasil (identificada como RG 1).

Recentemente, Gramcianinov et al. (2019) elaboraram uma nova climatologia de ciclones no Atlântico Sul. Utilizando um rastreamento de ciclones baseado na vorticidade relativa em 850 hPa, os autores identificaram quatro principais regiões ciclogênicas no Oceano Atlântico Sul (Figura 2.2): a costa sul do Brasil (SE-BR, $30^{\circ}S$), sobre o continente, perto da foz do Rio da Prata (LA PLATA, $35^{\circ}S$), a costa sudeste da Argentina (ARG, $40^{\circ}S-55^{\circ}S$) e o Sudeste do Atlântico (SE-SAO, centrado em $45^{\circ}S$ e $10^{\circ}O$).

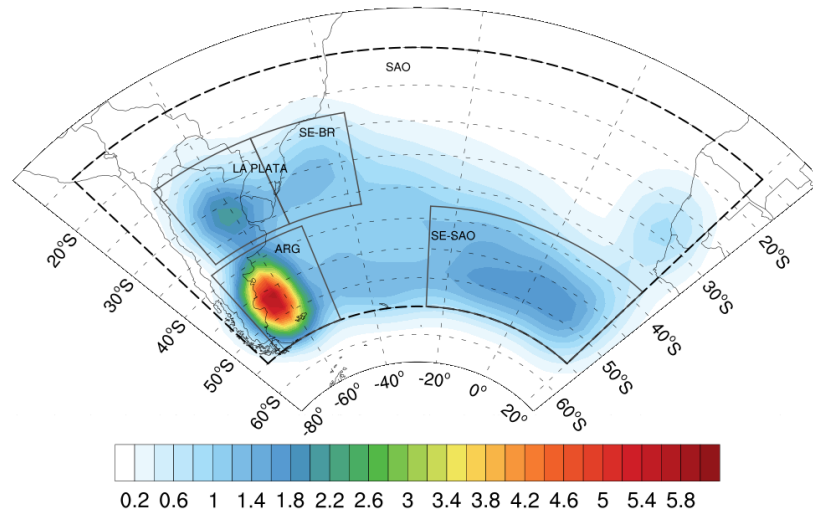


Figura 2.2: Densidade de gênese para o domínio do Atlântico Sul (marcado com linha tracejada cinza) calculada para todo o período de 1979-2010. As quatro regiões de gênese estão marcadas com linha preta. A unidade de densidade é ciclone por 10^6km^2 por mês (Gramscianinov et al., 2019).

A variação sazonal da atividade nas regiões ciclogênicas também exerce influência sobre o clima de ondas. Conforme ilustrado na Figura 2.3, a região mais ativa está localizada próxima à costa da Argentina (ARG), apresentando atividade ao longo do ano inteiro, com um ligeiro aumento no número de ciclones durante o verão. A segunda região de gênese (LA PLATA) exhibe maior atividade no inverno, e os ciclones originados nesta área tendem a ser mais profundos (Hoskins e Hodges, 2005; Gramscianinov et al., 2019, 2020). Esses ciclones estão diretamente relacionados aos eventos extremos de onda no sudoeste do Atlântico Sul (Campos et al., 2018; Gramscianinov et al., 2020; Gramscianinov et al., 2022).

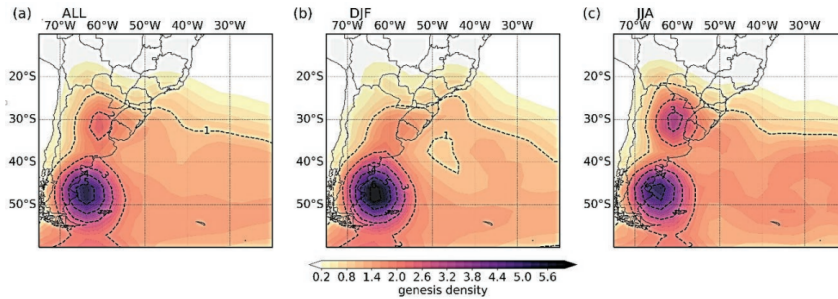


Figura 2.3: Regiões preferenciais de ciclogênese no oeste do Atlântico Sul entre 1979 e 2020 em (a) todas as estações, (b) verão (DJF) e (c) inverno (JJA). A unidade de densidade é gênese por mês por 10^6 km^2 (Gramscianinov et al., 2020).

Gramscianinov et al. (2020) destacam a identificação de três regiões de ondas extremas relacionadas à posição do ciclone: atrás da frente fria, no setor frio do ciclone (sendo a situação mais comum); à frente da frente fria, na zona de convergência dos ventos; e ao longo da frente quente, no setor quente do ciclone. Adicionalmente, foram descritos dois padrões sinóticos inéditos até então no Atlântico Sul que ocorrem no setor quente do ciclone. Esses padrões estão associados à combinação do AAS com um anticiclone transitório que se propaga para leste, e à presença de um anticiclone posicionado a sudeste do centro do ciclone, intensificando os ventos de norte-nordeste e favorecendo a formação de ondas extremas ao longo da frente quente.

Machado (2013) aborda a dinâmica da ondulação na região do Rio Grande do Sul. De acordo com a autora, a direção predominante das ondas na região é de sudeste, com altura significativa de 1,5m e período de pico de 10 s. No outono e inverno, há um aumento na altura significativa das ondas, podendo chegar a 5,5 m no outono, e a direção predominante das ondas varia sazonalmente, sendo de sudeste no verão e primavera, e de sudeste-sul no outono. Além disso, a autora menciona a ocorrência de eventos extremos associados a ventos de sudoeste e sudeste, e destaca a importância dos anticiclones migratórios na região. A combinação desses anticiclones com o AAS intensifica a pista de nordeste a leste, contribuindo para a formação de ondas na região.

No artigo de Souza e Silva (2021), os autores destacam que os principais padrões atmosféricos que afetam a região costeira do Sul do Brasil estão ligados à passagem periódica de sistemas de baixa pressão originados em três regiões de ciclogênese no Atlântico Sul (Reboita et al., 2009). Esses sistemas causam instabilidade atmosférica e geram ondas que se

propagam em direção às áreas costeiras, impactando-as significativamente.

Em termos sazonais, o trabalho de Souza et al. (2022) mostrou que geralmente durante junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON), há uma maior probabilidade de ocorrência de padrões sinóticos relacionado a sistemas ciclônicos mais próximos a costa do que para dezembro, janeiro e fevereiro (DJF) e março, abril e maio (MAM), comportamento esse que pode ser explicado pela maior atividade ciclogênica perto do Uruguai e na região Sul da América do Sul (Reboita et al., 2009; Gramscianinov et al., 2019).

Pianca et al. (2010) examinam o clima de ondas na costa brasileira com base em uma série temporal de onze anos (janeiro de 1997 a dezembro de 2007), utilizando dados de reanálise do modelo NWW3. A pesquisa revela que os setores da costa sul e sudeste do Brasil são influenciados pelo AAS e pela passagem de frentes frias. A energia das ondas diminui gradativamente de sul para norte, apresentando maior intensidade no inverno nas regiões Sul e Sudeste, e no verão nas regiões Norte e Nordeste do país.

Em seu trabalho, Rodríguez et al. (2016), realizaram uma revisão abrangente dos processos que ocorrem na costa brasileira, concluindo que o clima de ondas na costa é altamente heterogêneo, com variações significativas ao longo da costa e em zonas específicas com grande variabilidade sazonal. Os resultados apontam que a energia das ondas tende a aumentar de norte para sul, enquanto a amplitude das marés diminui no mesmo sentido.

2.3 Eventos Extremos na Região

A crescente vulnerabilidade das regiões costeiras densamente povoadas frente a eventos extremos, como inundações e consequentes perdas econômicas, ressalta a importância de aprofundar o entendimento dos processos que regem as mudanças costeiras e aprimorar a capacidade de prever tais ocorrências (Wigley, 1985; Palmer e Raisanen, 2002; Warner et al., 2010; Souza e Silva, 2021).

Eventos extremos de onda no sudoeste do Atlântico Sul são fenômenos que podem causar danos ambientais e socioeconômicos, particularmente nas atividades de exploração de petróleo do pré-sal na costa do sudeste do Brasil (Cardoso, 2019). Nesta região, os padrões esperados estão relacionados a influência do AAS e a passagem de sistemas transientes (Souza, 1988; Garreaud e Wallace, 1998; Seluchi e Marengo, 2000; Souza et al., 2022).

Compreender e prever esses eventos é fundamental para melhorar o planejamento e a gestão dos recursos marinhos, bem como para reduzir os riscos e os impactos associados às variações extremas do nível do mar e das ondas (Campos et al., 2010). Além disso, o conhecimento dos padrões climáticos e das tendências de longo prazo desses eventos pode contribuir para o entendimento dos processos físicos que regem a dinâmica do Oceano Atlântico Sul.

O estudo de Cardoso (2019), que investigou a influência dos ciclones subtropicais no regime de extremos no Sudoeste do Oceano Atlântico Sul, revelou que os ventos mais intensos estão localizados principalmente a leste da região com maior densidade de ciclones subtropicais. Em termos sazonais, as maiores velocidades do vento no verão são influenciadas pelo gradiente zonal de pressão climatológico e pelos ciclones subtropicais. No entanto, no outono, os ciclones subtropicais exercem maior influência na intensidade dos extremos de vento, uma vez que esses sistemas são mais profundos e organizados nesta estação.

Young e Ribal (2019) enfatizaram que entender o clima de onda e vento global e suas mudanças é de extrema importância. Esses autores mostram tendências positivas estatisticamente significativas na velocidade média do vento e tendências mais fortes em valores extremos (percentil 90) durante o período de 1985 a 2018, usando dados satelitais. O aumento nos ventos extremos é acompanhado por um aumento nas ondas extremas (percentil 90).

Sistemas meteorológicos, como ciclones de alta intensidade ocorrendo no Sul do Brasil, geram ondas de alta energia. Esses fenômenos contribuem para a agitação do mar e, dependendo da direção de propagação, podem afetar a região costeira. O estudo conduzido por Machado et al. (2010) avaliou os efeitos das ondas geradas por eventos extremos nos processos de erosão e transporte de sedimentos. Os resultados indicaram que a erosão e a inundação costeira apresentam variabilidade em relação à formação, propagação e intensidade dos ciclones.

Os padrões mencionados no artigo se referem a diferentes situações sinóticas capazes de gerar eventos extremos de ondas. Essas situações são caracterizadas por diferentes locais de formação de ciclones, trajetórias e condições meteorológicas associadas. Os quatro padrões identificados no estudo foram:

- **Padrão I:** Ciclogênese na costa sul da Argentina, com deslocamento para o leste e uma trajetória entre 47,5°S e 57,5°S.

- **Padrão II:** Ciclogênese na costa sul do Uruguai, com deslocamento para o leste e uma trajetória entre 28°S e 43°S.
- **Padrão III:** Ciclogênese na costa sul do Uruguai, com deslocamento para o sudeste e uma trajetória entre 32°S e 57,5°S.
- **Padrão IV:** Centro de alta pressão gerando ventos de leste.

Ao reconstruir as condições do mar em uma área *offshore* de Rio Grande - RS entre 1979 e 2008, utilizando o WW3, Machado et al. (2010) identificaram ondas extremamente altas, alcançando valores superiores a 6 m. A análise das condições climáticas relacionadas aos eventos mais intensos revelou que todos foram causados pelo mesmo tipo de sistema meteorológico, caracterizado pela passagem de ciclones extratropicais intensos na região oceânica adjacente à costa do extremo sul do Brasil e Uruguai, entre 30-40°S. Nesses casos, havia um centro de alta pressão a oeste do ciclone, gerando intensos gradientes de pressão e ventos fortes do quadrante sul. Esses resultados foram corroborados por Romeu et al. (2015) em um estudo semelhante.

O artigo de Gramscianinov et al. (2020) investigou a distribuição espacial de eventos extremos de ondas geradas por ciclones extratropicais e as condições atmosféricas associadas a esses eventos no sudoeste do Atlântico Sul. Este trabalho complementa pesquisas anteriores, pois examina não apenas a posição central do ciclone, mas também a velocidade de deslocamento e a posição do anticiclone associado em relação ao centro do ciclone. Além disso, Gramscianinov et al. (2022) discutem a importância da velocidade de deslocamento do ciclone e sua intensidade na geração de ondas extremas na região, mostrando também as regiões ciclogênicas mais associadas a extremos de onda no Atlântico Sul.

Os resultados indicam que as ondas extremas na parte ocidental do Atlântico Sul e no sul do Brasil estão relacionadas aos ciclones formados entre 30°S e 35°S sobre o continente, corroborando estudos anteriores como Rocha et al. (2004) e Machado et al. (2010). A posição climatológica do AAS e a intensidade e posição dos anticiclones migratórios exercem uma influência significativa sobre as trajetórias dos ciclones, afetando diretamente a geração de ondas extremas.

Por exemplo, a posição do anticiclone extratropical transitório a oeste-sudoeste do centro do ciclone intensifica o vento no setor frio do sistema e promove ventos persistentes

de sudoeste ao longo da costa, sendo um dos padrões mais responsáveis pelas ondas extremas na região. A posição do AAS mais ao sul durante o verão parece direcionar as trajetórias dos ciclones para latitudes mais ao sul. A análise de [Gramcianinov et al. \(2020\)](#) oferece uma contribuição valiosa para a compreensão dos eventos extremos no sudoeste do Atlântico Sul e suas interações com as condições atmosféricas. A Figura [2.4](#) mostra as situações que promovem extremos de onda na região de estudo.

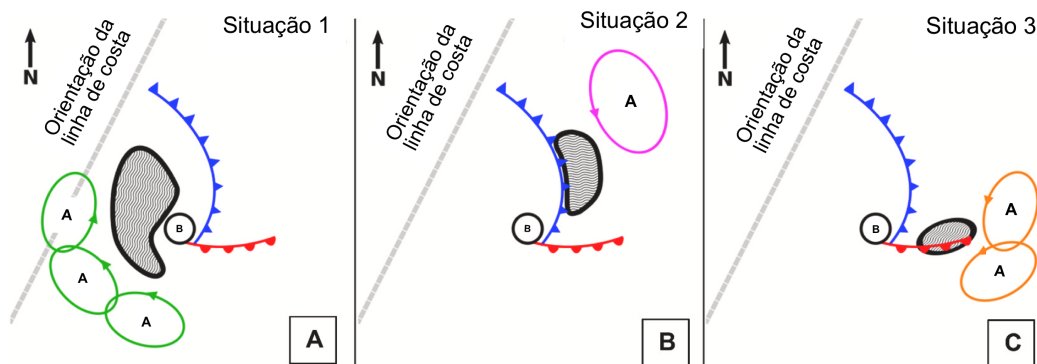


Figura 2.4: Esquema das três situações associadas a ondas extremas dentro do ciclone extratropical. (a) As ondas extremas (sombreado ondulado) ocorrem atrás da frente fria; (b) à frente da frente fria, na zona de convergência dos ventos; e (c) ao longo da frente quente no setor quente do ciclone. As frentes frias e quentes são representadas de acordo com a convenção meteorológica. O centro aproximado de baixa pressão e os sistemas de alta pressão circundantes são representados por "B" e "A", respectivamente. Adaptado, para o português, de [Gramcianinov et al. \(2020\)](#).

O estudo de [Souza e Silva \(2021\)](#) utilizou uma modelagem numérica de última geração na região costeira do Sul do Brasil para avaliar a capacidade do modelo em representar eventos climáticos extremos entre 2000 e 2018. Os resultados apontam para um viés sistemático de subestimação da precipitação e destaca a importância de se considerar a resolução do modelo na região dos Andes para melhor representação do jato de baixos níveis e, conseqüentemente, dos sistemas convectivos associados a esse fenômeno. Além disso, a análise ressalta a importância da representação detalhada dos fluxos de calor sensível e latente para uma boa representação das circulações de mesoescala locais. É importante ressaltar que os autores destacam que a maioria dos modelos regionais numéricos utiliza uma metodologia de comunicação *one-way* entre o modelo climático global e o modelo climático regional. Isso significa que o fenômeno de escala local não interage com a circulação de grande escala. No entanto, novos estudos que buscam projetar futuros eventos extremos para a região costeira do sul do Brasil podem se beneficiar de um aumento na

resolução horizontal do modelo e da interação de escalas, ou seja, métodos *two-way*.

Em resumo, eventos extremos de ondas no Sudoeste do Atlântico Sul são fenômenos relevantes que exigem atenção devido aos possíveis danos ambientais e socioeconômicos. A compreensão dos padrões climáticos e das tendências desses eventos é essencial para o planejamento e a gestão dos recursos marinhos, bem como para a mitigação dos riscos e impactos associados. O estudo dos ciclones e das condições meteorológicas relacionadas é crucial para entender a dinâmica desses eventos extremos e aprimorar as previsões e medidas de prevenção.

2.4 Limitações dos hindcast de onda

A geração de ondas pelo vento é um processo extremamente complexo e não linear, que lida com a interação de dois fluidos com densidades muito diferentes. Diversas fontes de incertezas estão envolvidas na modelagem de ondas, tornando-se crucial investigá-las adequadamente para aprimorar as simulações (Cavaleri et al., 2007; Rogers et al., 2012).

As hipóteses físicas e os resultados das medições são utilizados para formular uma teoria básica que, quando aplicada aos modelos, proporciona resultados satisfatórios. No entanto, a hipótese de linearidade deve ser questionada, pois em condições extremas, como durante tempestades, picos e condições extremas não são bem reproduzidos (Cavaleri et al., 2007). Rogers et al. (2012) categorizam as fontes de erro em três grupos: numéricos, de resolução, física e de forçamento.

O vento forçante é apontado como uma importante fonte de erro, uma vez que as simulações de onda são altamente sensíveis aos campos de vento de entrada, como demonstrado por diversos estudos (Teixeira et al., 1995; Holthuijsen et al., 1996; Ponce de León e Guedes Soares, 2008; Van Vledder e Akpınar, 2015; Campos e Guedes Soares, 2016). Isso se deve principalmente à dependência quadrática da altura significativa da onda em relação à velocidade do vento na superfície. Apesar do grande avanço na modelagem de ondas, a precisão e resolução do campo de vento ainda é um fator relevante no pico das tempestades, como destacado por Cavaleri (2009)

O coeficiente de arrasto da superfície, em casos de eventos extremos, foi revisado por Curcic e Haus (2020), indicando a necessidade de atualizar a parametrização do arrasto com mais informações do campo de vento e experimentos de laboratório. O estudo condu-

zido por Hackerott et al. (2018), avaliou os fluxos de *momentum* medidos em plataformas flutuantes sob condições de diferentes intensidades de Hs (dividindo os momentos em que as condições de onda estavam acima e abaixo do limiar de 2,5 metros). Eles demonstraram que, fisicamente, isso representa uma variação na rugosidade e resulta em uma alteração no coeficiente de arrasto.

Cavaleri (2009) discutiu as limitações dos modelos de ondas em prever valores extremos e aborda o problema básico de que a evolução de um campo de ondas depende de pequenas diferenças entre duas quantidades grandes: a entrada de energia pelo vento e a dissipação de energia por quebra de onda e turbulência. A acurácia do modelo depende da calibração precisa de parâmetros. No entanto, até mesmo uma descrição física altamente precisa da quebra de ondas pode falhar em manter a mesma exatidão sob todas as condições, especialmente aquelas mais extremas.

O estudo de Campos et al. (2018) sobre o clima meteoceanográfico e eventos extremos na Bacia de Campos, no litoral do Rio de Janeiro, foi realizado usando uma boia de ondas para medir ventos e ondas durante três anos. Um evento extremo em 25 de agosto de 1992 registrou uma altura significativa de onda de 6,5 m, tornando-se um ponto de referência para eventos extremos no sudeste do Brasil. Uma das primeiras simulações de ondas usando o modelo de ondas WW3 forçado com *Climate Forecast System Reanalysis* [CFSR - (Saha et al., 2010)] para essa área, é mostrada na linha sólida preta da Figura 2.5. A simulação de ondas usou a resolução de vento do CFSR, aproximadamente 0,3° e 1 h, dentro de uma grade global. O termo de fonte aplicado na versão 3.14 do WW3 foi ST2 (Tolman e Chalikov, 1996) e a matriz de espectro direcional continha 25 frequências e 24 direções. Como mostrado na Figura 2.5, o resultado do modelo subestima significativamente as medidas, a ponto de uma importante discussão sobre a precisão dos *hindcasts* no local ter surgido, juntamente com uma grande preocupação sobre o uso deles para decisões envolvendo segurança marítima (Campos et al., 2018).

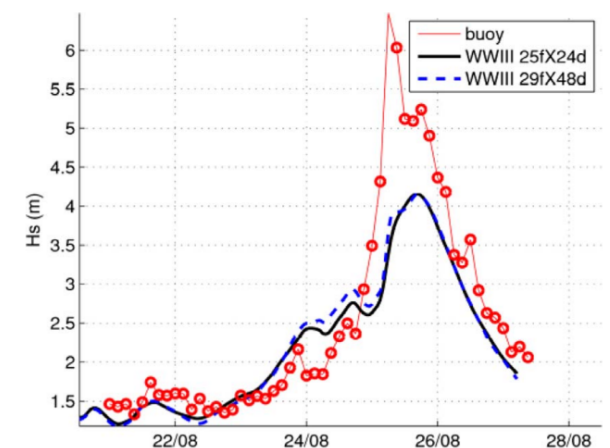


Figura 2.5: Evento extremo ocorrido em agosto de 1992 medido por uma boia localizado em 22,31°S e 39,58°O. Altura significativa da onda em metros medida pela boia (vermelho); simulação do WW3 usando discretização espectral de 25 frequências e 24 direções e resolução de grade de 0,3° (linha sólida preto); simulação do WW3 usando discretização espectral de 29 frequências e 48 direções, e resolução de 0,067° (linha tracejado azul) (Campos et al., 2018).

Campos et al. (2018) apresentaram uma investigação sobre a melhoria da modelagem de ondas no Oceano Atlântico Sul e no Brasil, especialmente em eventos extremos, por meio de três abordagens de calibração de produtos de vento de superfície. Os *hindcasts* de ondas foram construídos usando o modelo numérico de ondas WW3 e avaliadas utilizando dados de altimetria e boia, para condições gerais e severas. Os resultados mostraram que a regressão linear aplicada às intensidades de vento do CFSR e o método de ajuste do parâmetro de crescimento de onda no termo fonte (S_{in}) no modelo de ondas resultaram em grande viés e superestimação na porção leste do Oceano Atlântico Sul, enquanto reduziram a subestimação das ondas em áreas ocidentais do Oceano Atlântico Sul, *offshore* do Brasil, especialmente nos percentis mais altos. Por outro lado, o aumento do parâmetro $Betamax$ no modelo de ondas foi eficaz na redução do viés médio, mas teve pouco ou nenhum impacto no erro médio quadrático e no coeficiente de correlação.

Estes mesmos autores também mostraram que a abordagem de combinação de campos de vento ciclônicos derivados de satélite com a base de dados do CFSR foi capaz de reduzir o erro em função do aumento dos percentis e gerou com sucesso um *hindcast* apresentando pequenos erros em regiões *offshore* do Brasil, em todos os percentis, de condições calmas a extremas. Além disso, os resultados chamaram a atenção para as áreas mais importantes a serem monitoradas para casos extremos de ondas e ressaltaram a importância de medições longas e confiáveis no Oceano Atlântico Sul, juntamente com a implementação de uma

rede de coleta contínua de dados oceanográficos e meteorológicos. No entanto, apesar das melhorias realizadas por Campos et al. (2018), foi demonstrado que ainda há espaço para mais trabalho, a fim de aumentar continuamente a precisão de eventos extremos. As abordagens que podem melhorar essa precisão envolvem capturar melhor o comportamento turbulento da interface atmosfera-oceano durante esses eventos, seguidas de métodos de aproximação não lineares mais complexos e estratégias de assimilação de dados aplicadas a ventos de superfície, juntamente com a inclusão de dados de assimilação de ondas.

Sharmar et al. (2021) realizaram quatro simulações globais de ondas com o modelo WW3, forçadas por reanálises do ERA5, ERA-Interim, CFSR e MERRA2 entre 1980 e 2019. Os resultados mostram que as magnitudes absolutas tanto das velocidades de vento à 10 metros, quanto das alturas significativas de onda são maiores no conjunto de dados CFSR e no *hindcast* baseado nele, especialmente nas regiões extratropicais. Os *hindcasts* baseados no ERA5, ERA-Interim e MERRA2 mostraram tendências anuais positivas nas alturas das ondas entre 1980 e 2019 enquanto que o CFSR mostrou tendências negativas tanto em características médias quanto extremas, apesar de ter tido em valor absoluto, os maiores valores de velocidade do vento e altura significativa de onda. As áreas com tendências lineares significativas nas alturas das ondas geralmente coincidem com aquelas para as velocidades do vento, mas com uma cobertura espacial maior.

Aguiar et al. (2021) avaliaram um *hindcast* de ondas de longo prazo (1979-2009) baseado na Reanálise NCEP/NCAR e no modelo WW3, utilizando dados de medições de ondas realizadas ao longo de 29 meses na plataforma do Rio Grande - RS, região Sul do Brasil, para avaliar as habilidades e vieses na simulação de ondas para esta região. Foram selecionados eventos extremos para avaliar a capacidade do modelo em simular alturas significativas de ondas extremas. A concordância entre as alturas significativas de ondas obtidas a partir da análise retorno e das medições foi boa, porém houve uma subestimação nas alturas de onda simuladas, especialmente em eventos extremos.

Em resumo, a modelagem de ondas e a geração de *hindcasts* meteoceanográficos são ferramentas essenciais para entender e prever o comportamento das ondas e as condições oceanográficas em diferentes cenários. Ao longo dos anos, avanços na modelagem e na resolução dos campos de vento têm contribuído para melhorar a precisão dos *hindcasts*, mas ainda há espaço para aprimoramentos, especialmente na simulação de eventos extremos.

2.5 Separação de Fatores

Os modelos numéricos fornecem uma ferramenta poderosa para a pesquisa atmosférica. Um método comum de se utilizar em um modelo é realizando um experimento de sensibilidade em que são isolados os efeitos de diferentes fatores em certos campos atmosféricos (Stein e Alpert, 1993).

A técnica de fatoração (ou fatorização) consiste em atribuir uma mudança de alguma propriedade do sistema a múltiplos componentes, cada um deles, associado a uma mudança interna de alguma variável do sistema (Lunt et al., 2021).

Também conhecido por planejamento fatorial (Barros et al., 1995), este método permite obter a contribuição individual de cada um dos parâmetros envolvidos, além da contribuição devido a interação desses parâmetros. Este método vem sendo utilizado em várias áreas do conhecimento, com trabalhos pioneiros no campo da agricultura (Fisher, 1992) e aplicações em indústria e engenharia (Box et al., 2005).

Stein e Alpert (1993) mostraram que é necessário 2^n (onde n = número de fatores) simulações para obter a separação dos contribuintes e suas possíveis interações. Foi então utilizado para exemplificação dois fatores centrais, a topografia e os fluxos de superfície, e seu efeito na distribuição de precipitação durante a evolução de um ciclone sobre o mediterrâneo.

Lunt et al. (2012), seguindo a metodologia proposta por Stein e Alpert (1993), estudaram a importância relativa que as mudanças nas condições de contorno exercem no aquecimento do meio Plioceno com o objetivo de separar a variação de temperatura do aquecimento em quatro componentes: mudança no CO₂, orografia, cobertura de gelo e vegetação.

2.5.1 Propriedades do método

Nesta subseção, serão discutidas as propriedades dos métodos de separação de fatores em termos de unicidade, simetria, completude e pureza, com base no exemplo do trabalho de Lunt et al. (2012) que investigaram as causas do aquecimento no meio Plioceno em relação ao período pré-industrial. É importante ressaltar que essas propriedades são desejáveis na fatorização, pois a falha em alguma delas resulta em menor facilidade de interpretação.

- **Unicidade ou singularidade:** A unicidade é uma propriedade que se refere à existência de apenas uma solução para uma dada equação ou problema. Em outras palavras, quando aplicamos um método de separação de fatores a uma equação, espera-se obter uma resposta única e consistente para aquela equação. No caso do exemplo mencionado, a pergunta era "Por que o Plioceno é mais quente que o período pré-industrial?" e a resposta deveria ser única;
- **Simetria:** A simetria, por sua vez, significa que a resposta obtida para a questão principal é a mesma para outras questões relacionadas. No caso do exemplo, a pergunta alternativa seria "Por que o período pré-industrial é mais frio que o Plioceno?", e a resposta seria a mesma da pergunta principal;
- **Completude:** A completude é uma propriedade que se refere à capacidade do método de produzir todas as soluções possíveis para uma dada equação. Em outras palavras, um método de separação de fatores é considerado completo se ele puder encontrar todas as raízes de uma equação, sem deixar nenhuma raiz de fora. No exemplo mencionado, a resposta para a questão "O quanto o Plioceno é mais quente do que o período pré-industrial?" deve ser igual à soma dos fatores individuais, incluindo o termo de interação, se existir;
- **Pureza:** Por fim, a pureza refere-se à capacidade de explicar o efeito apenas em termos dos fatores fundamentais, sem incluir termos de interação adicionais que não sejam atribuídos a um único fator e sim à interação entre eles. No exemplo, a pergunta "Por que o Plioceno é mais quente que o período pré-industrial?" poderia ser respondida apenas com as contribuições dos fatores fundamentais CO_2 , gelo e vegetação, sem incluir termos de interação adicionais.

É importante ressaltar que a utilização de um método que atenda a todas as quatro propriedades nem sempre é a melhor opção, uma vez que os termos de interação podem fornecer informações valiosas e serem de grande interesse. Portanto, a escolha do método de separação de fatores deve ser feita considerando as propriedades desejadas para o problema em questão.

Conjuntos de dados e produtos numéricos

Neste capítulo, serão brevemente apresentados os conjuntos de dados e os produtos de modelagem numérica, que incluem reanálises e *hindcasts* atmosféricos e de ondas, utilizados ao longo deste estudo.

3.1 Observações

3.1.1 *Cross-Calibrated Multi-Plataform (CCMP)*

O *Cross-Calibrated Multi-Plataform* (CCMP; [Atlas et al., 2011](#)) é uma base de dados de vento a 10 metros de altura, que possui cobertura quase global com resolução espacial de 0,25° e temporal de 6 horas. Essa base de dados é mantida pelo *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Ele cobre o período entre 1987 até o presente. A obtenção de dados é feita a partir de satélites e a qualidade é assegurada através de processos de calibração cruzada ([Wentz et al., 2015](#)). Esses dados são de grande importância para a análise de eventos climáticos, pois permitem a identificação precisa da direção e intensidade do vento na superfície, além de fornecer informações importantes para a correção dos dados de vento utilizados em modelos climáticos ([Paiva et al., 2021](#)).

3.1.2 *Programa Nacional de Boias Oceanográficas (PNBOIA)*

O Programa Nacional de Boias Oceanográficas ([PNBOIA, 2023](#); [Pereira et al., 2017](#)) é uma iniciativa brasileira que tem como objetivo monitorar o estado do oceano e o clima em tempo real, visando a coleta de informações sobre a temperatura, salinidade, correntes, ventos e ondas. Essas informações são obtidas através de boias oceanográficas que são posicionadas estrategicamente no mar.

Neste trabalho foram selecionadas duas boias do PNBOIA (Boia de Rio Grande - RS e Boia de Itajaí - SC, apresentados na Figura 3.1) para a validação dos resultados do modelo WW3. A utilização dos dados do PNBOIA é importante para confirmar a precisão e confiabilidade do modelo, garantindo a qualidade dos resultados obtidos.

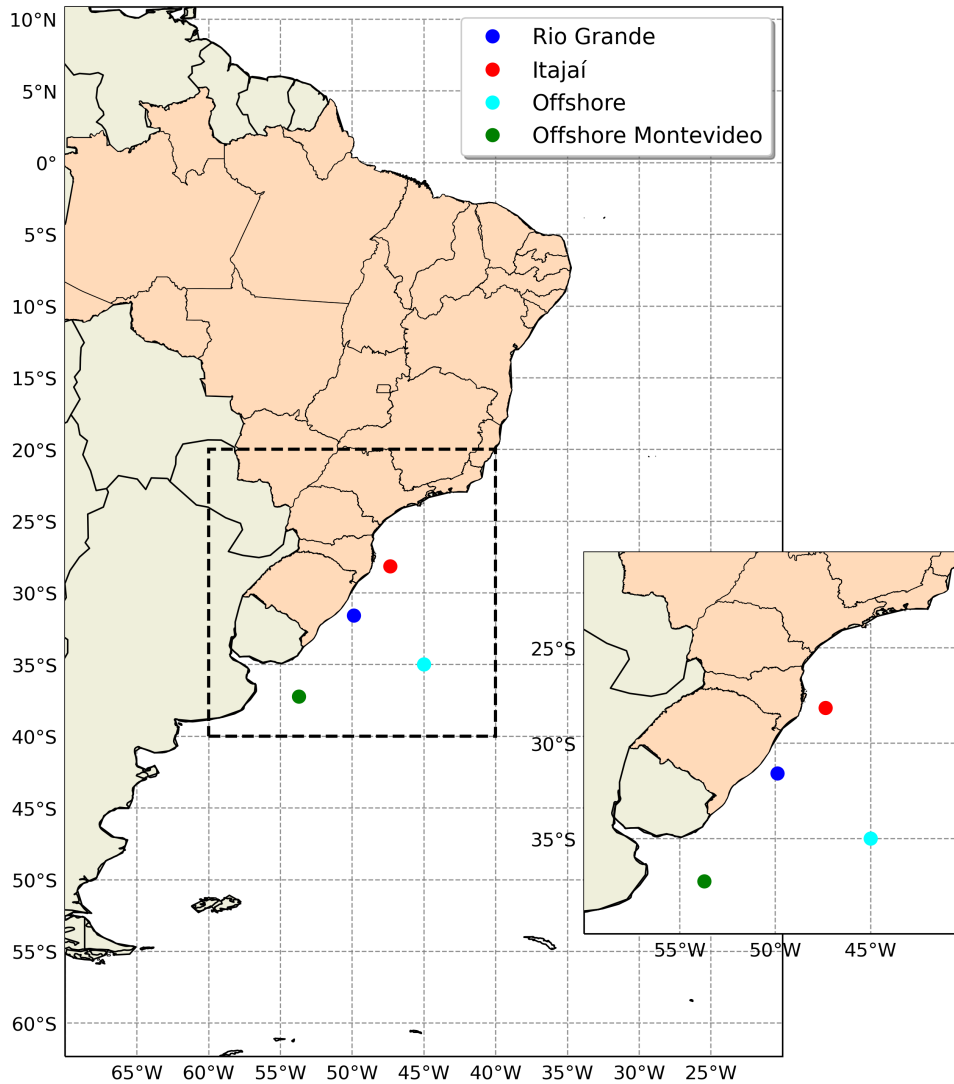


Figura 3.1: Mapa de Localização dos pontos de análise.

3.2 Produtos de modelagem numérica

3.2.1 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

O *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR; Saha et al., 2010) e *Climate Forecast System Reanalysis Version 2* (CFSv2; Saha et al., 2014) são uma base de dados climáticos

produzida pelo *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) e distribuída pela *National Climatic Data Center's* (NCDC). Essa base combina dados de várias fontes, incluindo satélites, observações em superfície e dados de modelos numéricos, para produzir uma análise integrada dos sistemas oceano-superfície-atmosfera e continente-gelo a nível global (Saha et al., 2010). O CFSR fornece dados climáticos desde 1979 até 2022 com resolução espacial de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ e temporal de uma hora, tornando-se uma fonte valiosa para estudos meteorológicos e oceanográficos.

3.2.2 WAVEreanalYSis (WAVERYYS)

O modelo WAVEreanalYSis (WAVERYYS; Law-Chune et al., 2021) é uma reanálise de onda produzida pelo Serviço Núcleo Oceânico da Copernicus. Ele fornece dados globais de ondas com uma resolução espacial de $1/5^\circ$ e cobre o período de 1993 a 2019. O núcleo do modelo é baseado no modelo de ondas da terceira geração *Meteo France Wave Mode* (MFWAM), levando em conta as correntes oceânicas da reanálise oceânica física e assimilando Hs observadas em dados históricos de altimetria e espectros direcionais de ondas do Sentinel 1 SAR a partir de 2017.

A reanálise WAVERYYS é alimentada por uma combinação de dados de vento, corrente, temperatura e salinidade, obtidos a partir de fontes diversas, como satélites, boias oceanográficas, modelos climáticos e análises in situ. Estes dados são combinados por meio de técnicas de assimilação de dados, visando a produção de uma reanálise precisa e coerente de ondas.

O modelo WAVERYYS é amplamente utilizado em estudos oceanográficos e climáticos devido à sua ampla cobertura e alta resolução temporal e espacial. Ele também é uma ferramenta importante para avaliar a qualidade das simulações de ondas, especialmente quando não há disponibilidade de dados observados. Nesse contexto, dois pontos distantes do talude continental foram escolhidos como referência, conforme ilustrado na Figura 3.1 e apresentado na Tabela 3.1. Esses pontos foram selecionados para fins de avaliação da performance das simulações de onda realizadas pelo modelo WW3.

Tabela 3.1 - Localização dos pontos de validação e comparação, extraídos do PNBOIA e do WAVERYS.

Nome dos Pontos	Latitude	Longitude
Boia Rio Grande	-31,5841	-49,8699
Boia Itajaí	-28,1555	-47,3539
Ponto <i>Offshore</i>	-35,0000	-45,0000
Ponto <i>Offshore Montevideo</i>	-37,243	-53,706

3.3 Experimentos de Regionalização

3.3.1 Modelos utilizados

3.3.1.1 Weather Research and Forecasting (WRF)

O *Weather Research and Forecasting* (WRF; Skamarock et al., 2005), como modelo numérico de previsão de tempo e clima, possui diversas características que o tornam uma ferramenta poderosa para simular a dinâmica da atmosfera terrestre. Uma delas é o alto grau de detalhamento dentro da camada limite planetária, permitindo a caracterização do perfil vertical do vento em um local específico de estudo. Além disso, o modelo é totalmente incompressível, não hidrostático e com um núcleo dinâmico euleriano, o que garante uma simulação precisa e realista dos fenômenos atmosféricos (Skamarock et al., 2005). A resolução espacial e temporal ajustáveis, bem como a capacidade de assimilar dados de observações, tornam o WRF ainda mais eficaz para prever eventos climáticos complexos, como tempestades severas, furacões e ciclones tropicais, em diferentes escalas temporais e espaciais. Sua formulação física é baseada na conservação de massa, que expressa às variações de energia, *momentum* e umidade do ar (Silva et al., 2016).

Com uma interface flexível e opções de personalização, o modelo é amplamente utilizado em áreas como agricultura, energia, transporte, saúde pública e segurança pública, contribuindo para a tomada de decisões informadas e a redução de riscos associados a eventos climáticos extremos.

3.3.1.2 WAVEWATCH III (WW3)

O WAVEWATCH III (WW3; Tolman et al., 2002; Tolman, 2002; Tolman et al., 2016) é um modelo de ondas de terceira geração no qual a evolução do campo de ondas é simulada usando o espectro direcional de número de onda, com a energia sendo uma variável prognóstica discretizada em componentes espectrais. Variáveis como H_s , T_p , D_p , etc., são derivadas do espectro. O modelo WW3 é baseado em equações de balanço de energia para simular a dinâmica das ondas em um ambiente oceanográfico específico, levando em consideração fatores como o efeito da ressurgência, dissipação por fricção, transferência de energia entre ondas, bem como a influência do vento e da corrente na formação de ondas (Tolman et al., 2002).

As equações de balanço de energia são resolvidas numericamente utilizando um algoritmo de espectro de ondas, que divide a energia das ondas em diferentes bandas espectrais. Isso permite que o modelo simule de forma realista a evolução da forma das ondas, bem como a sua dispersão com o tempo e a distância (Tolman et al., 2016).

3.3.2 Simulações do WeSACEx

No contexto do projeto WeSACEx (Crespo et al., 2022), simulações foram projetadas usando o modelo WW3, visando realizar análises de desempenho do vento e da onda na região Sudoeste do Atlântico Sul. Estas simulações foram empregadas neste trabalho. Duas grades aninhadas foram construídas para as simulações: a primeira, cobre todo o globo com resolução horizontal de $1,875^\circ \times 1,875^\circ$ (denominada GLOBAL), usando ventos da reanálise CFSR como forçante na superfície. Estes resultados fornecem espectros de ondas para a fronteira aberta de uma segunda grade regional, que abrange o Atlântico Sul com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (denominada ATLSUL) e se estende sobre uma área entre as coordenadas 070°O e 020°O e 60°S e 10°N , como mostrado na Figura 3.2.

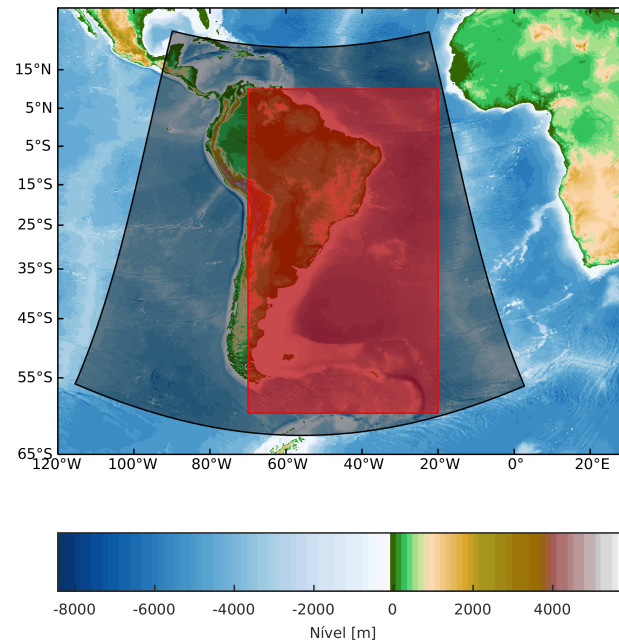


Figura 3.2: Domínio das simulações usadas no WRF (preto), WW3 (vermelho). A escala de nível (m) se refere a topografia extraída do ETOPO2 (NOAA, 2022).

Essa simulação regional (ATLSUL) foi conduzida utilizando um método de *nudging* espectral para preservar a estrutura de grande escala. Essa implementação foi embasada no estudo de Silva e Camargo (2018), no qual a estrutura de altos níveis era fundamental para manter um sistema como a Zona de Convergência do Atlântico Sul. O domínio foi definido para se alinhar com o modelo atmosférico regional WRF, permitindo o uso de seus campos de vento, e para manter os principais fenômenos de escala sinótica que atuam na região (Crespo et al., 2022).

Foram também realizadas simulações adicionais, aplicando uma correção linear nos percentis superiores usando dados do CCMP, tanto na reanálise do CFSR quanto nas regionalizações forçadas pelo WRF. O método para esta correção será discutido no Capítulo 4. A força do vento foi atualizada a cada seis horas e as principais parametrizações utilizadas no modelo são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Informações do *setup* utilizado nas simulações do modelo WW3. Adaptado de Crespo et al. (2022).

	Global	Regional
Espaçamento horizontal	1,875° X 1,875°	0,25° x 0,25°
Forçante de vento	CFSR	WRF
Batimetria	ETOPO1	
Termo fonte	ST4	
Esquema de propagação	UQ	
Betamax	1,80	
Fricção de fundo	BT1	
Interações não-lineares	NL1	
Input linear	LN1	
Quebra de ondas	DB1	

ST4 Pacote do termo fonte (Arduin et al., 2010), *UQ* Esquema de propagação de terceira ordem (Tolman, 2002), *LN1* Input linear (Cavaleri e Rizzoli, 1981), *NL1* Aproximação de interação discreta não linear (Hasselmann e Hasselmann, 1985), *BT1* Formulação de fricção de fundo de JONSWAP (Tolman, 1991), *DB1* Quebra de ondas induzida pela profundidade Battjes-Janssen (Battjes e Janssen, 1978)

3.3.3 Simulação complementar

A simulação adicional foi concebida como parte desta pesquisa, seguindo o mesmo padrão das simulações do projeto WeSACEx. Nesta simulação, foram utilizados os campos de vento do modelo CFSR, global, aplicando-se uma correção linear nos percentis superiores com base nos dados do CCMP. Assim, criou-se uma simulação global com correção do vento, uma etapa que não foi realizada no contexto do projeto WeSACEx.

Métodos

4.1 Calibração dos campos de vento

O vento é a variável mais importante para estudar ondas, que são majoritariamente forçadas por diferença de pressão, gerando o vento local. Uma eventual subestimativa dos ventos extremos impacta diretamente as simulações de onda, uma vez que a sensibilidade aos campos de vento é reconhecida (Campos et al., 2018). Os ventos à superfície das reanálises tendem a subestimar os valores extremos (Stopa e Cheung, 2014; da Silva et al., 2022), logo, viu-se necessário realizar um ajuste nas velocidades máximas e de percentis elevados em ambas as simulações de vento (WRF, regionalizada e CFSR, global) pois essa subestimativa resultaria em uma limitação ao objetivo do estudo que visa entender as diferenças entre as simulações e essas diferenças normalmente ocorrem em períodos de extremos.

As reanálises geralmente apresentam boa correlação e baixa diferença absoluta nos valores médios do vento. Conforme descrito por Campos et al. (2018), a abordagem escolhida para ajustar os valores é aplicar um ajuste linear nos valores de vento que excedem o percentil 80 em cada ponto de grade, sem afetar os valores médios. Essa correção do vento também é indicada por Alves et al. (2009), que observa que os ventos modelados superestimam as velocidades medidas para ventos abaixo de 7,5 m/s e subestimam os valores medidos para ventos acima de 7,5 m/s.

Esse método consiste em calcular um coeficiente A e B do ajuste linear ponto-a-ponto entre o vento simulado e uma referência, que neste estudo, pela abrangência temporal e espacial foi escolhido o CCMP. Após a obtenção dos coeficientes relativos a uma série suficientemente longa, os mesmos foram aplicados nos valores da série temporal que estão

acima do percentil 80. Vale ressaltar que os dados de referência do CCMP possuem algumas falhas e inconsistências, portanto, para realizar a correção foi separada a série entre 1990 e 2018 de forma a utilizar o melhor intervalo do produto.

A Figura 4.1 exemplifica esse processo para as séries temporais de velocidade do vento do CCMP (referência) e da reanálise CFSR (a ser corrigida) para o ponto da boia de Rio Grande.

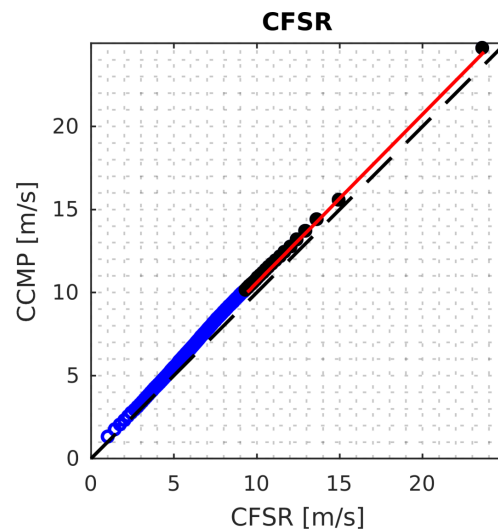


Figura 4.1: Exemplo da aplicação do processo de ajuste linear da intensidade do vento para o ponto correspondente à boia de Rio Grande para ventos da rodada histórica de clima presente (1979 a 2018) utilizando a reanálise do CFSR com o CCMP como referência. No Q-Q Plot entre as séries a linha vermelha destaca o ajuste linear a partir do percentil de 80%. Os pontos azuis são os percentis inferiores a 80 e as pretas, os percentis acima do percentil 80.

4.2 Separação de Fatores

A presente proposta pretende explorar a origem das diferenças entre as simulações considerando somente o clima presente (1979 a 2018). A técnica de separação de fatores de Stein e Alpert (1993) foi escolhida como uma ferramenta eficaz para avaliar a influência individual da correção do vento e da regionalização na representação de eventos extremos.

As análises foram baseadas em um conjunto de rodadas que permitissem a aplicação do método de separação de fatores (Stein e Alpert, 1993), também chamado de planeja-

mento fatorial (Barros et al., 1995). Neste contexto, dois parâmetros foram modificados (regionalização e correção do vento), e quatro experimentos foram necessários para identificar a contribuição de cada um. A Tabela 4.1 mostra os experimentos realizados, onde o primeiro subíndice indica a implementação (1) ou ausência (0) da regionalização, e o segundo subíndice representa a correção (1) ou não correção (0) da velocidade do vento, *input* que direciona o modelo de onda.

Tabela 4.1 - Resumo das simulações realizadas com o WW3.

Simulação	Domínio	Correção do Vento	Campo
1	Global	Sem correção	H_{00}
2	Regional	Sem correção	H_{10}
3	Global	Corrigido	H_{01}
4	Regional	Corrigido	H_{11}

Com esta abordagem, as variações entre as simulações são quantificadas pela interação linear entre os efeitos dos dois fatores, bem como por possíveis interações não-lineares provenientes de sua influência conjunta. Para avaliar a importância relativa dos fatores para a qualidade das simulações, a regionalização e a correção baseada em satélite foram consideradas como os dois fatores a serem separados.

A técnica consiste em realizar operações algébricas para isolar as contribuições de cada fator. Neste estudo, a fatorização é realizada em relação à simulação global sem correção (H_{00}), que serve como referência. Assim, temos:

$$\Delta H_1 = H_{10} - H_{00} \quad (4.1)$$

$$\Delta H_2 = H_{01} - H_{00} \quad (4.2)$$

$$\Delta S = H_{11} - H_{10} - H_{01} + H_{00} \quad (4.3)$$

Onde ΔH_1 é o resultado da contribuição da variável 1 (regionalização), ΔH_2 a contribuição da variável 2 (correção do vento) e ΔS o termo de interação não-linear entre os fatores. Os subíndices utilizados nas equações acima se referem à Tabela 4.1.

Esse método é completo, pois:

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta S = H_{11} - H_{00} \quad (4.4)$$

Devido à existência do termo de interação ΔS , ele não é "puro". Além disso, esse método não é simétrico; se a fatorização fosse realizada em relação a H_{11} , obteríamos um resultado numérico diferente. Por exemplo, se tentássemos isolar o efeito da regionalização com a operação $H_{01} - H_{11}$, o resultado seria diferente de fazer $H_{10} - H_{00}$.

4.3 Análise dos eventos extremos de onda

As quatro simulações delineadas na Tabela 4.1 foram elaboradas com diferentes combinações de forçamento de vento e resolução. Essas simulações incluem modelos com ou sem correção do vento pelo CCMP, e com ou sem aninhamento com o modelo WRF. Três delas foram desenvolvidas como parte do projeto WeSACEx (Crespo et al., 2022) (simulação 1, 2 e 4), enquanto que uma quarta (simulação 3) foi implementada especificamente para esta pesquisa. Adicionalmente, todas as saídas de simulação foram reamostradas para um espaçamento de grade regular comum de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, usando o método de interpolação bilinear.

Para avaliar a acurácia das simulações, foram comparados os resultados com os dados observados por duas boias do programa nacional PNBOIA e dois pontos da reanálise de ondas do WAVERYS, conforme ilustrado na Figura 3.1. A avaliação objetiva da precisão dos modelos foi realizada aplicando várias métricas estatísticas, fundamentadas em indicadores descritos, por exemplo, em (Fox, 1981; Hallak e Pereira Filho, 2011; Willmott, 1982; Pielke, 2013; Wilks, D. S., 2014).

Este estudo se concentra na análise da variável altura significativa de onda. Para simplificar, vamos denotar o valor da altura significativa simulada pelo modelo e observada pela referência como H_S e H_O , respectivamente. Para todo o período de dados disponíveis vários indicadores estatísticos foram calculados, os quais serão descritos a seguir.

Para iniciar esta análise, é fundamental calcular os erros, que são determinados pela diferença ponto a ponto do valor simulado e o valor observado. Esta relação é expressa na equação 4.5:

$$d_i = H_{Si} - H_{Oi} \quad (4.5)$$

O Erro Médio (ME, sigla em inglês), ou viés (BIAS, sigla em inglês), é a métrica mais simples e mede a tendência do modelo em superestimar ou subestimar a altura da onda em relação ao dado de referência. Esta métrica é definida como:

$$ME = BIAS = \bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (4.6)$$

O ME pode subestimar os erros das simulações, já que erros de mesma magnitude, mas de sinais opostos, podem se anular na somatória. Uma alternativa ao ME é o Erro Médio Absoluto (MAE, em inglês), que é menos suscetível a dados espúrios (ou *outliers*) e fornece uma medida mais robusta do desempenho do modelo [Wilks, D. S. \(2014\)](#). O MAE pode ser definido por:

$$MAE = |\bar{d}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i| \quad (4.7)$$

O Erro Quadrático Médio (MSE na sigla em Inglês) é similar ao MAE, porém mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado, sendo assim, sempre positivo. O MSE é definido por:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{Si} - H_{Oi})^2 \quad (4.8)$$

Complementarmente ao MSE, a raiz quadrada do MSE, ou Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE, do inglês Root Mean Square Error) é frequentemente empregada. A principal vantagem do RMSE é a sua capacidade de apresentar os valores do erro na mesma unidade da variável que está sendo analisada [Wilks, D. S. \(2014\)](#). Em termos matemáticos, o RMSE é definido por:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{Si} - H_{Oi})^2 \right]^{1/2} \quad (4.9)$$

Na modelagem de ondas, dois aspectos são importantes: a amplitude prevista da onda, que representa a sua intensidade, e o momento preciso de chegada da onda. Para aprimorar a captura desses aspectos cruciais, foram utilizados dois componentes adicionais do MSE, que são termo dissipativo do MSE (MSE_{DISS}) e o termo dispersivo do MSE (MSE_{DISP}),

conforme descrito por Takacs (1985). Esses componentes adicionais fornecem informações detalhadas sobre a natureza dos erros na previsão.

O termo MSE_{DISS} , também conhecido como termo dissipativo do MSE, é empregado como um indicador de erro sistemático. Este termo é utilizado para quantificar os erros associados à dissipação da energia das ondas marítimas ao longo do tempo e do espaço. No cenário das ondas oceânicas, vários fatores podem contribuir para a dissipação, que inclui atrito na base da onda, turbulência e interações com outras ondas ou com a linha costeira.

A incorporação do termo dissipativo MSE_{DISS} no cálculo do erro permite uma melhor compreensão do quão eficaz é um modelo na simulação da diminuição da energia da onda ao longo do tempo e do espaço. Vale ressaltar que o MSE_{DISS} é influenciado tanto pela média quanto pelo desvio padrão das observações e previsões.

$$MSE_{DISS} = [\sigma(H_{oi}) - \sigma(H_{si})]^2 + (\overline{H_{oi}} - \overline{H_{si}})^2 \quad (4.10)$$

O termo MSE_{DISP} , correspondente ao componente dispersivo do MSE, serve como um indicador do erro aleatório, que é uma avaliação dos erros de fase. Quando o valor do MSE_{DISP} é elevado, isso sugere que a estrutura espacial - em outras palavras, o "formato" da previsão - não está em conformidade com as observações reais. Essa métrica é fundamental para identificar divergências nas fases das previsões em comparação ao que foi de fato observado.

No contexto das ondas oceânicas, a dispersão é um fenômeno que ocorre quando ondas distintas se movimentam a velocidades diferentes, tipicamente devido a variações em suas frequências ou comprimentos de onda. Assim, o MSE_{DISP} é afetado pela correlação e pelos desvios padrões tanto das observações como das previsões.

$$MSE_{DISP} = 2(1 - r)\sigma(H_{oi})\sigma(H_{si}) \quad (4.11)$$

Onde o operador desvio padrão de uma variável aleatória x pode ser definido como:

$$\sigma(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.12)$$

E o coeficiente de correlação linear de *pearson*:

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - \overline{H_o})(H_{si} - \overline{H_s})}{\sigma_{H_o} \sigma_{H_s}} \quad (4.13)$$

Para aprimorar a avaliação do desempenho das simulações, foram escolhidos dois índices adicionais: o Índice de Concordância (IC) [Willmott \(1982\)](#) e o critério de destreza do modelo de [Pielke \(2013\)](#). Estes índices são definidos da seguinte forma:

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (H_{si} - H_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (|H_{si} - \overline{H_{oi}}| - |H_{oi} - \overline{H_{oi}}|)^2} \quad (4.14)$$

As médias são indicadas pela barra sobrescrita. IC = 1 indica concordância perfeita entre o campo simulado e o observado.

$$D_{Pielke} = ABS\left(1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_o}\right) + \frac{RMSE}{\sigma_o} + \frac{RMSE_{BIAS}}{\sigma_o} \quad (4.15)$$

onde $RMSE_{BIAS}$ é o RMSE após a remoção de um bias constante associado à tendência do modelo, definido por:

$$RMSE_{bias} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{si} - \overline{H_{si}}) - (H_{oi} - \overline{H_{oi}}) \right]^2 \quad (4.16)$$

Os critérios para avaliar a qualidade das simulações, segundo [Pielke \(2013\)](#), são os seguintes:

1. O modelo é considerado habilidoso se $D_{Pielke} < 2$;
2. Dentro de um conjunto de várias simulações do mesmo caso, aquela que apresenta o menor valor de D_{Pielke} é considerada a melhor;
3. A simulação perfeita corresponderia a um valor de $D_{Pielke} = 0$.

Foram também realizadas análises adicionais para fornecer uma representação visual do desempenho das simulações. Essas análises foram geradas através do Diagrama de Taylor [Taylor \(2001\)](#), que consolida informações do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), Desvio Padrão (σ) e RMSE. O objetivo deste método é comparar a variabilidade e o erro dos modelos em relação aos dados observados.

Também foi empregado o *QQ-Plot*, um gráfico que compara duas distribuições de probabilidade, traçando seus quantis um contra o outro. Este gráfico é útil para avaliar quão bem os modelos aderem aos dados observados.

¹ Adaptado de: [Wilks, D. S., 2014](#); [Rochford, 2016](#)

Outra técnica de análise utilizada foi o gráfico da função de densidade de probabilidade. Este gráfico compara a distribuição de probabilidade dos valores extremos das simulações com os dados observados. É importante salientar que o gráfico de densidade de probabilidade foi construído tanto para o conjunto total de dados quanto para os dados acima do percentil de 95%.

A importância da correção do vento e da regionalização na representação foi avaliada usando as estatísticas definidas acima, observando o quão melhor é o modelo quando ele possui um dos fatores e também usando a técnica de separação de fatores proposta por Stein e Alpert (1993). Foram produzidos mapas médios anuais para avaliar a importância dos fatores na média, no entanto, essa abordagem não permitiu verificar a representação de eventos extremos.

4.3.1 Estudo de casos

Foram selecionados dois casos de eventos extremos previamente analisados e descritos no trabalho de Gramcianinov et al. (2020). Para tal, foram utilizados mapas de Hs a fim de avaliar as regiões de maior intensidade de onda, bem como mapas sinóticos de vento, altura geopotencial em 500 hPa e pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM) combinado com velocidade vertical do vento em médios níveis. Dessa forma, é possível ter uma ideia das condições meteorológicas que promoveram o evento e tentar identificar motivadores das diferenças entre as simulações.

Em seu trabalho, Gramcianinov et al. (2020), realizaram uma análise da distribuição espacial de ondas extremas geradas por ciclones extratropicais, estudando as condições atmosféricas que levam aos eventos mais intensos na porção sudoeste do Oceano Atlântico Sul. Os autores selecionaram os 10 eventos mais intensos de ondas geradas por ciclones entre 1999 e 2004, a partir da análise dos resultados de um *hindcast* do modelo WW3 produzido pelo NCEP. Dentre esses 10 ciclones selecionados, foram escolhidos para este trabalho dois ciclones com padrões sinóticos distintos. A Tabela 4.2 apresenta uma adaptação da tabela original de Gramcianinov et al. (2020) contendo os eventos escolhidos para esta análise.

Tabela 4.2 - Eventos extremos selecionados para análise. A duração é descrita em horas, Hs-max em metros, vento máximo a 10 m em m/s, e a pressão mínima ao nível do mar em hPa. Tabela adaptada de Gramcianinov et al. (2020).

Caso	Data	Duração	Hs Max	Vento 10-m Max	PNMM Min
2	2002-02-01 12UTC	42	10,03	30,51	969,74
10	2002-09-19 18UTC	30	8,57	29,60	991,13

4.4 Separação por setores de influência

Considerando que a análise de apenas dois eventos era insuficiente, buscou-se examinar um conjunto mais abrangente de dados. Para avaliar ciclones com características semelhantes, eles foram categorizados em quatro tipos diferentes. Foi analisado o momento de maior profundidade em suas trajetórias e determinado o setor onde ocorreu o vento mais intenso. A categorização dos setores foi realizada conforme ilustrado na Figura 4.2.

Para essa análise, foi utilizado um rastreamento de ciclones produzido por Gramcianinov et al. (2019). No referido artigo, a identificação do vento máximo ao redor do centro do ciclone foi feita utilizando o método descrito por Hodges et al. (2011). Esse método consiste em uma busca simples pelo vento máximo em um raio de 5° a partir do centro do ciclone, retornando o valor e a posição onde ocorre o máximo para cada passo de tempo durante o ciclo de vida do ciclone.

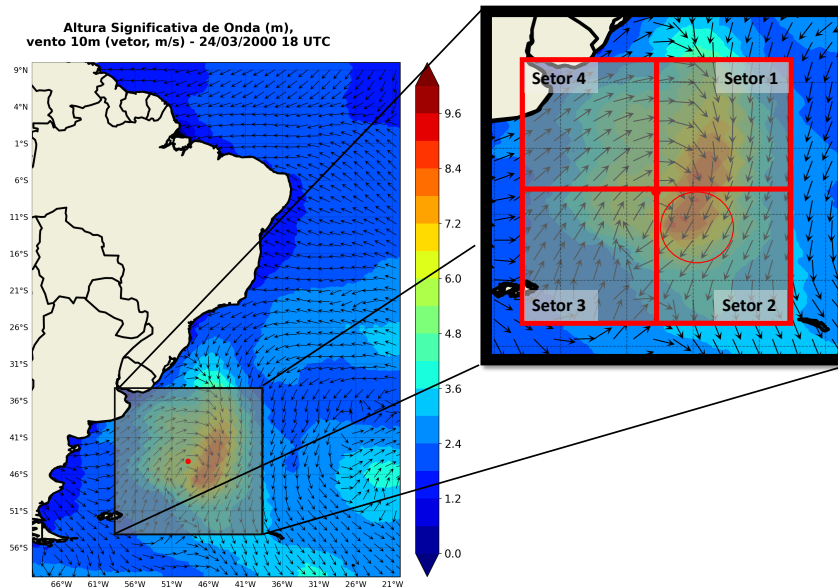


Figura 4.2: Figura demonstrativa da categorização da regiões de máxima intensidade do vento. Exemplo de evento com máximo do vento ocorrido no setor 2. A caixa cinza ao redor do centro do ciclone indica os 10° ao redor do ciclone que foram utilizados na realização das composições.

Optou-se por realizar a avaliação sinótica analisando apenas a diferença entre as simulações H_{10} e H_{00} . A escolha foi feita por dois motivos principais: primeiramente, as variáveis meteorológicas necessárias para a avaliação estavam disponíveis apenas no modelo H_{10} , ou seja, na simulação regional sem a correção do vento. Em segundo lugar, analisar o efeito da regionalização na representação desses eventos sem a correção do vento não traria problemas significativos, uma vez que a correção do vento influencia somente a magnitude do evento, não afetando na existência ou posição do evento.

Os dez ciclones mais intensos de cada setor foram ordenados e, após uma análise preliminar, selecionaram-se dois eventos por setor: um evento que apresentou concordância entre as simulações e outro que não. Essa seleção de eventos foi realizada de maneira criteriosa e subjetiva, baseando-se na análise dos campos de H_s e de vento. O intuito desta abordagem foi de avaliar as condições sinóticas presentes no momento desses eventos e investigar os fatores que podem explicar as discrepâncias ou concordâncias observadas nas simulações.

4.5 Composições

É importante notar que, as simulações climáticas originalmente não foram dedicadas a representar um evento específico e pode não ocorrer uma correspondência precisa com a localização e a intensidade do fenômeno observado, devido a fatores como a resolução, posicionamento da grade configurações de parametrização, entre outros, podem interferir na representação de eventos individuais.

A comparação individual com base nas observações ou reanálises é difícil e, na maioria das vezes, resulta em desigualdades entre as simulações climáticas. No entanto, espera-se encontrar padrões similares na densidade de ciclones ou na composição de casos identificados em uma região de estudo ao longo de um período prolongado. Por esse motivo foram feitas composições dos 10 e dos 50 ciclones mais intensos de cada setor. A separação de fatores foi realizada para avaliar a influência da correção do vento e da regionalização na representação desses fenômenos distintos. Vale ressaltar que a aplicação da separação de fatores, todas as simulações foram necessárias, diferente do que foi feito na análise sinótica do evento onde apenas H_{00} e H_{10} foram escolhidas.

As composições foram feitas a partir do centro do ciclone com 10° de distância latitudinalmente e longitudinalmente, e por esse motivo, a busca pelos 10 e 50 ciclones mais intensos foi feita em uma área limitada, menor do que a região original da simulação, como mostra a Figura [4.3](#)

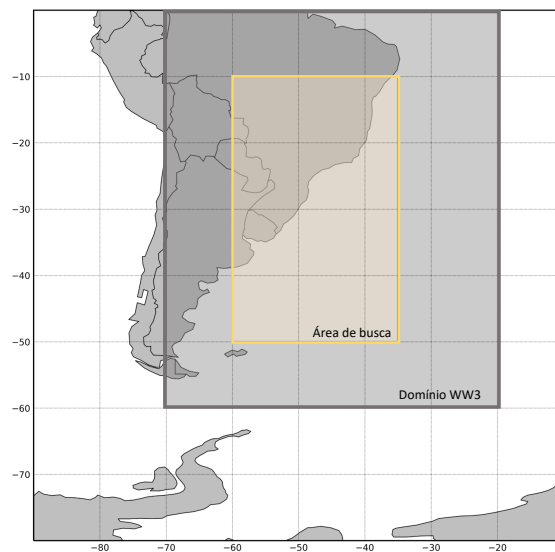


Figura 4.3: Área da simulação do WW3 (cinza); área de busca dos ciclones (amarelo).

Dessa forma, a metodologia utilizada nesta dissertação visa responder à questão da representação de eventos extremos de vento e onda no Sudoeste do Atlântico Sul em simulações do WW3, avaliando a importância da correção do vento e da regionalização nesse processo. A combinação de técnicas comparativas e de separação de fatores permitirá uma compreensão mais profunda dessas questões e fornecerá *insights* valiosos para futuros estudos na área.

Resultados

A análise das simulações foram realizadas em quatro partes: comparações pontuais com dados do PNBOIA e do WEVERYS; avaliações espaciais das simulações através de médias anuais; análise de eventos extremos, utilizando dois eventos avaliados previamente pela literatura; e composições dos dez ciclones mais intensos de cada setor. Através dessas avaliações, foi quantificada a importância da correção do vento e da regionalização na representação de eventos extremos de onda no Sudoeste do Atlântico Sul em simulações do WW3. É importante destacar que as estatísticas de comparação foram realizadas levando em consideração os valores de altura significativa de onda.

5.1 Análise pontual

As avaliações descritas neste subcapítulo correspondem às comparações pontuais entre as quatro simulações, os dados do PNBOIA e do WEVERYS, conforme mostrado na Figura 3.1, onde a localização de cada ponto de análise é apresentada.

As Figuras 5.1 e 5.3 apresentam a série temporal para comparação entre os dados observados das boias de Rio Grande e Itajaí, respectivamente, e os *hindcasts* H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Além disso, as Figuras 5.5 e 5.7 mostram a série temporal comparativa entre a reanálise do WEVERYS e os *hindcasts* para os pontos de análise *Offshore* e *Offshore Montevideo*, respectivamente. A partir destas séries temporais, foram elaboradas tabelas de análises estatísticas apresentadas nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Para complementar a interpretação dos resultados, foi também incluído um gráfico de densidade de probabilidade com a média e os percentis junto às tabelas estatísticas. Esta representação visual permite observar a distribuição de densidade de probabilidade

das alturas significativas de onda para cada conjunto de dados/simulação, ressaltando as medidas de tendência central (média) e os diferentes percentis para avaliar a variabilidade dos valores.

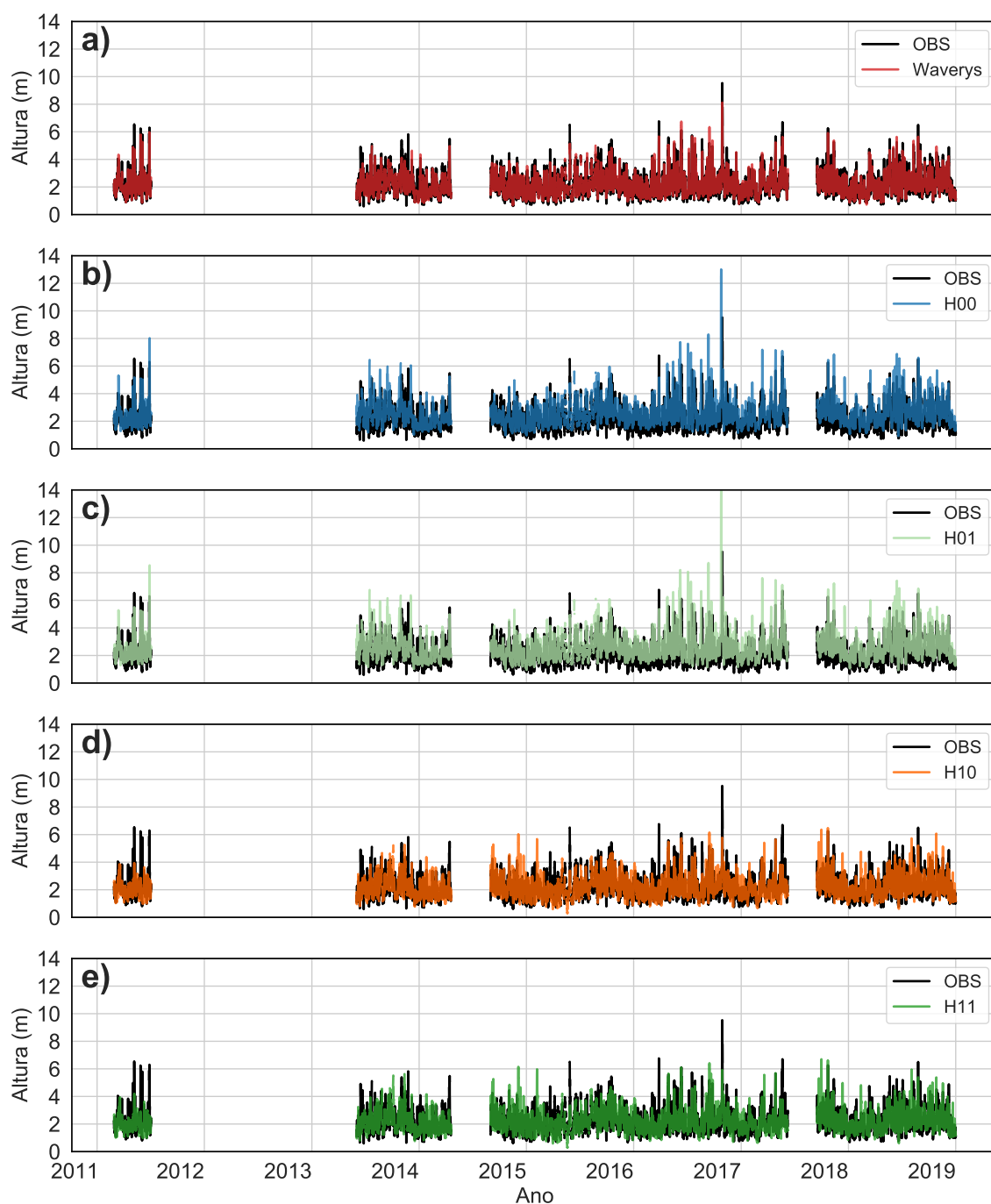


Figura 5.1: Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto da boia Rio Grande - RS. Observação (preto), WEVERYS (vermelho), simulação H_{00} - Global sem correção (azul), H_{01} - Global corrigido (verde claro), H_{10} - Regional sem correção (laranja) e H_{11} - Regional corrigido (verde) no período 2009 a 2019.

A Tabela [5.1](#) revela estatísticas para a boia de Rio Grande. Conforme a média, o WEVERYS e as simulações regionais H_{10} e H_{11} aproximam-se mais dos dados observados,

apesar de subestimarem os valores máximos. O BIAS sugere um viés mínimo para o WAVERYS e para H_{10} e H_{11} , mas sua interpretação pode ser enganosa devido à anulação potencial de valores positivos e negativos de mesma magnitude. O MAE fornece uma visão mais robusta, indicando erros menores para o WAVERYS, seguido de H_{10} , H_{11} , H_{00} e H_{01} . Isso mostra que os erros das simulações regionais foram menores do que das globais, para este ponto de análise.

Estatística	OBS	WAVERYS	H_{00}	H_{01}	H_{10}	H_{11}
Média (m)	2,17	2,18	2,61	2,64	2,17	2,17
Máximo (m)	9,53	8,12	13,01	13,96	6,47	6,70
Bias (m)	0	0,01	0,45	0,48	0	0
MAE (m)	0	0,20	0,72	0,75	0,57	0,58
$\sqrt{MSE_{diss}}$ (m)	0	0,06	0,46	0,50	0,08	0,06
$\sqrt{MSE_{disp}}$ (m)	0	0,27	0,89	0,92	0,77	0,78
IC (adim.)	1,00	0,97	0,67	0,65	0,72	0,72
D_{Pielke} (adim.)	0	0,73	2,40	2,54	1,95	1,94
Pctl 90 (m)	3,25	3,14	3,75	3,80	3,15	3,16
Pctl 95 (m)	3,73	3,62	4,41	4,53	3,59	3,63
Pctl 99 (m)	4,88	4,79	5,97	6,22	4,63	4,76

Tabela 5.1 - Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para a boia de Rio Grande - RS comparando os dados observados, as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} e a reanálise WAVERYS.

A análise das componentes dissipativas e dispersivas do MSE (Tabela 5.1) indicam que H_{00} e H_{01} apresentam significativos erros em ambas as componentes, ao passo que, para H_{10} e H_{11} , a componente dispersiva é preponderante, sugerindo um erro induzido pela diferença de fase. Isso mostra que as simulações globais, possuem erros tanto na previsão da magnitude quanto da fase da onda enquanto que os regionais possuem erros mais expressivos na fase, ou seja, relativo à chegada de ondas no ponto de análise.

O IC do WAVERYS se aproxima mais de 1 (onde 1 é o valor de um modelo perfeito), seguido pelas simulações H_{10} e H_{11} (0,72 para ambas), e H_{00} e H_{01} (0,67 e 0,65, respectivamente) (Tabela 5.1). Quanto ao D_{pielke} , as rodadas globais ultrapassam o valor de 2, enquanto que H_{10} e H_{11} registram valores próximos de 2 (1,95 e 1,94, respectivamente), sugerindo que, de acordo com este critério de habilidade, nenhum dos modelos é considerado satisfatório.

Por fim, uma análise conjunta da Tabela 5.1 e da Figura 5.2 indica que as simulações

globais (H_{00} e H_{01}) tendem a superestimar os dados observados, apresentando uma curva deslocada para a direita e uma cauda mais extensa.

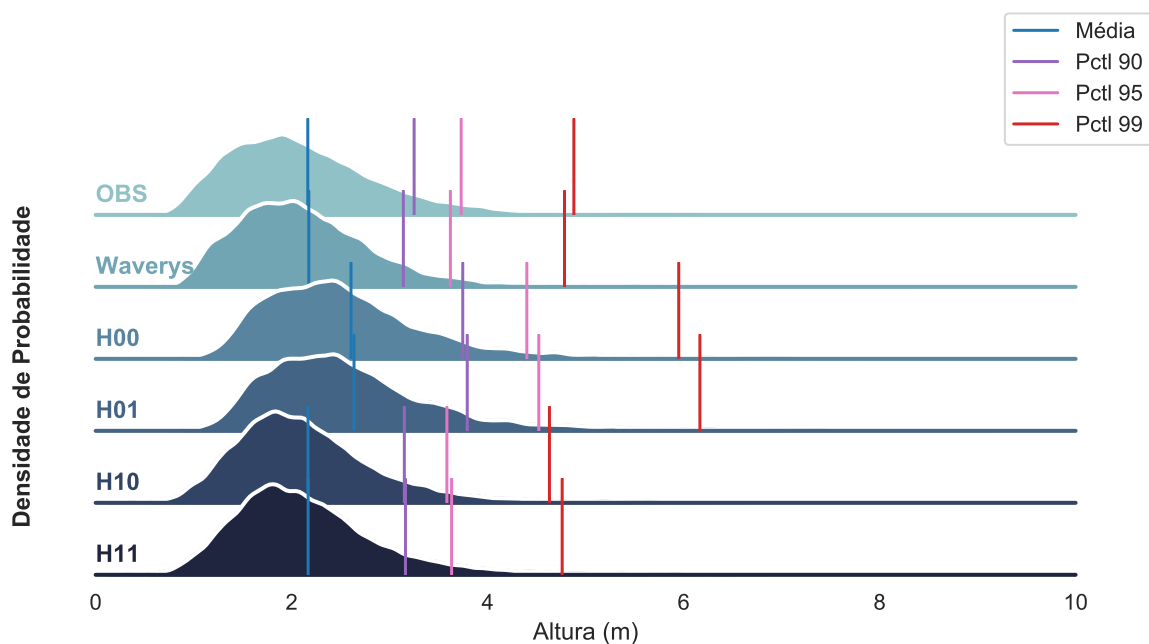


Figura 5.2: Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto da boia de Rio Grande, no período de 2011 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: dados observados, Waverys, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho).

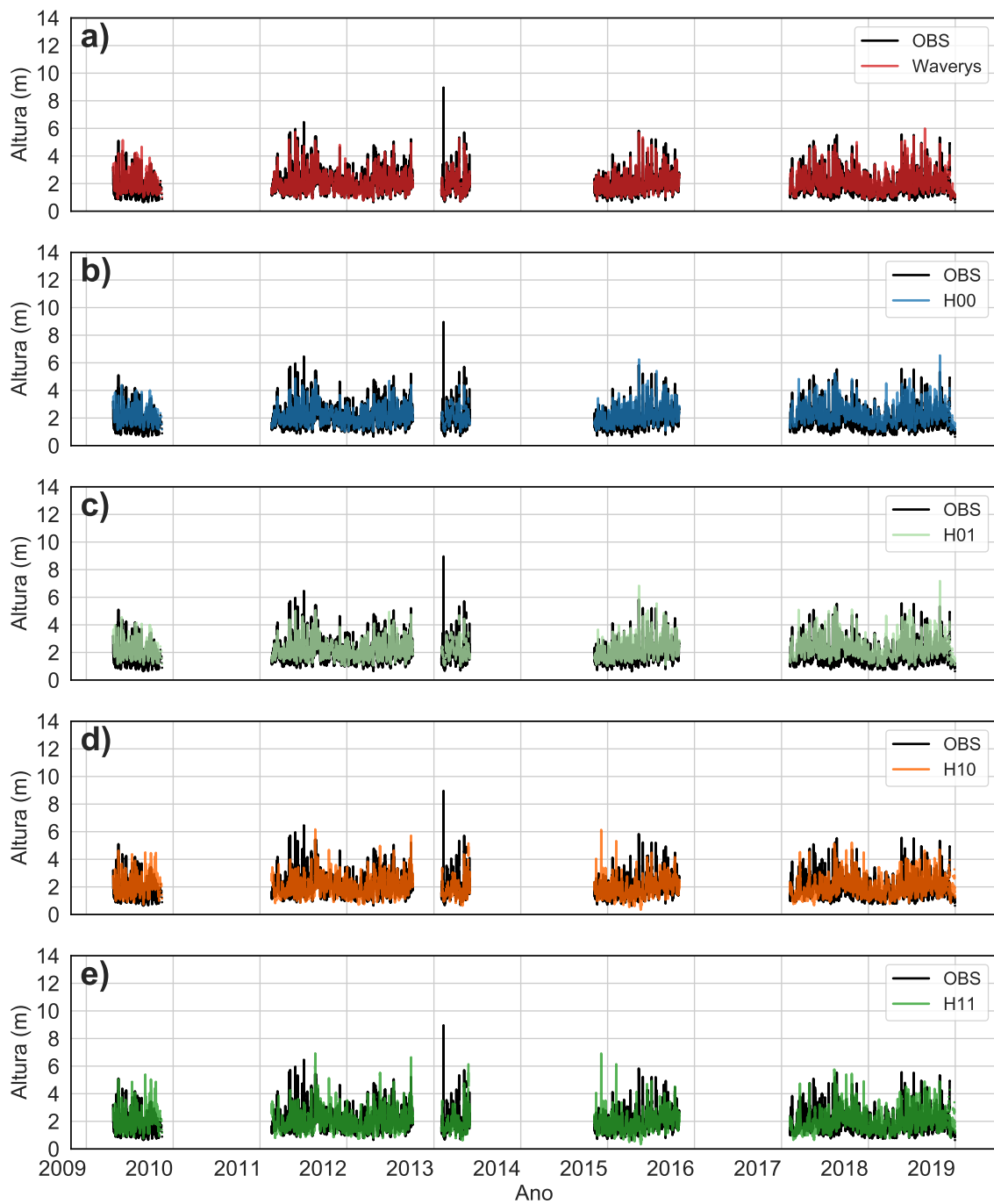


Figura 5.3: Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto da boia de Itajaí. Observação (preto), WAWERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 2009 a 2019. A média da observação é apresentada (cinza) seguido dos percentis mais elevados (90, 95 e 99)

A Tabela 5.2 apresenta as estatísticas para a boia de Itajaí. As simulações H_{10} , H_{11} e a reanálise WAWERYS mostram médias próximas aos dados observados, ainda que não

capturem o valor máximo observado de 8,96m. Nesse ponto, o BIAS é praticamente nulo em todas as simulações, enquanto o MAE sugere erros menores para as simulações globais.

Observa-se um padrão similar à boia de Rio Grande no que tange às componentes dissipativas e dispersivas do MSE, com a componente dispersiva apresentando valores maiores para as simulações H_{10} e H_{11} (Tabela 5.2).

O IC aponta para um melhor desempenho das simulações globais em relação às regionais (valores de 0,82 contra 0,69, respectivamente), corroborado pelo D_{pielke} , que indica maior habilidade das simulações globais, com valores abaixo de 2, enquanto as simulações H_{10} e H_{11} superam esse limiar (Tabela 5.2). Em ambos os critérios, o WEVERYS mostrou maior correspondência com os dados observados. A avaliação dos erros e a análise dos critérios de desempenho das simulações indicam que as execuções globais demonstram uma concordância superior com os dados observados neste ponto específico de análise.

Ao examinar a Figura 5.4 e os percentis mais elevados apresentados na Tabela 5.2, observa-se uma tendência das simulações regionais (H_{10} e H_{11}) em subestimar esses percentis.

Estatística	OBS	WEVERYS	H_{00}	H_{01}	H_{10}	H_{11}
Média (m)	1,97	2,03	2,22	2,26	1,96	1,99
Máximo (m)	8,96	5,99	6,53	7,18	6,17	6,93
Bias (m)	0	0,07	0,26	0,29	0	0,02
MAE (m)	0	0,23	0,45	0,48	0,54	0,56
$\sqrt{MSE_{diss}}$ (m)	0	0,08	0,26	0,30	0,05	0,02
$\sqrt{MSE_{disp}}$ (m)	0	0,33	0,53	0,54	0,74	0,77
IC (adim.)	1,00	0,94	0,82	0,81	0,69	0,69
D_{Pielke} (adim.)	0	0,97	1,59	1,60	2,05	2,08
Pctl 90 (m)	2,93	2,94	3,11	3,17	2,86	2,94
Pctl 95 (m)	3,43	3,39	3,51	3,62	3,24	3,36
Pctl 99 (m)	4,43	4,35	4,34	4,54	4,20	4,55

Tabela 5.2 - Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para a boia de Itajaí comparando os dados observados, as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} e a reanálise WEVERYS.

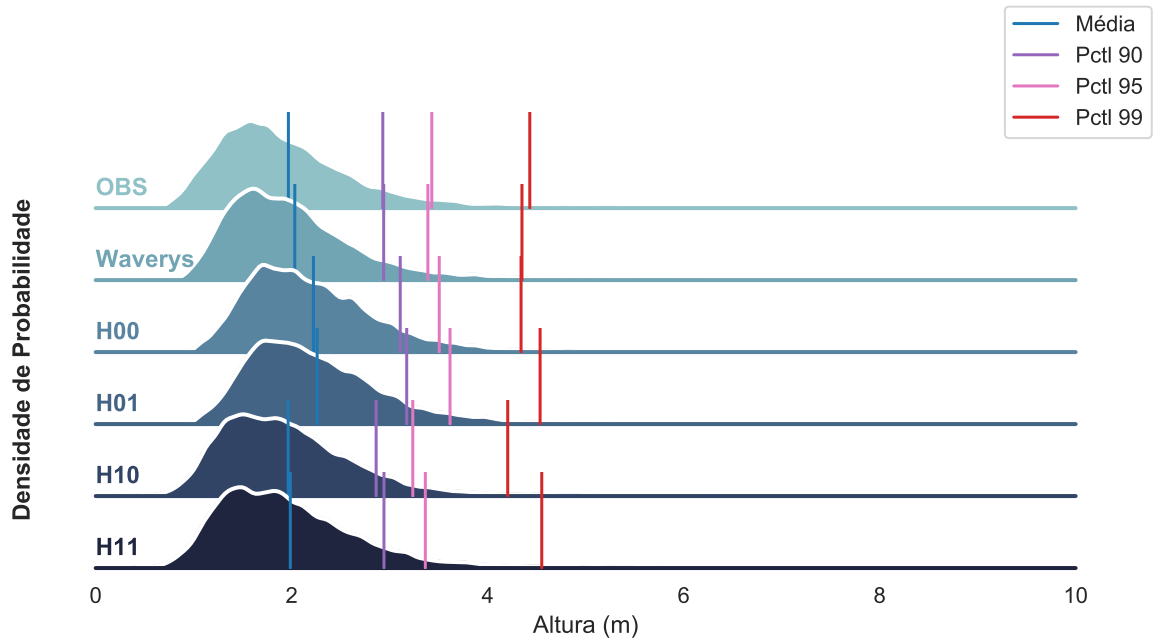


Figura 5.4: Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto da boia de Itajaí, no período de 2009 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: dados observados, Waverys, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho).

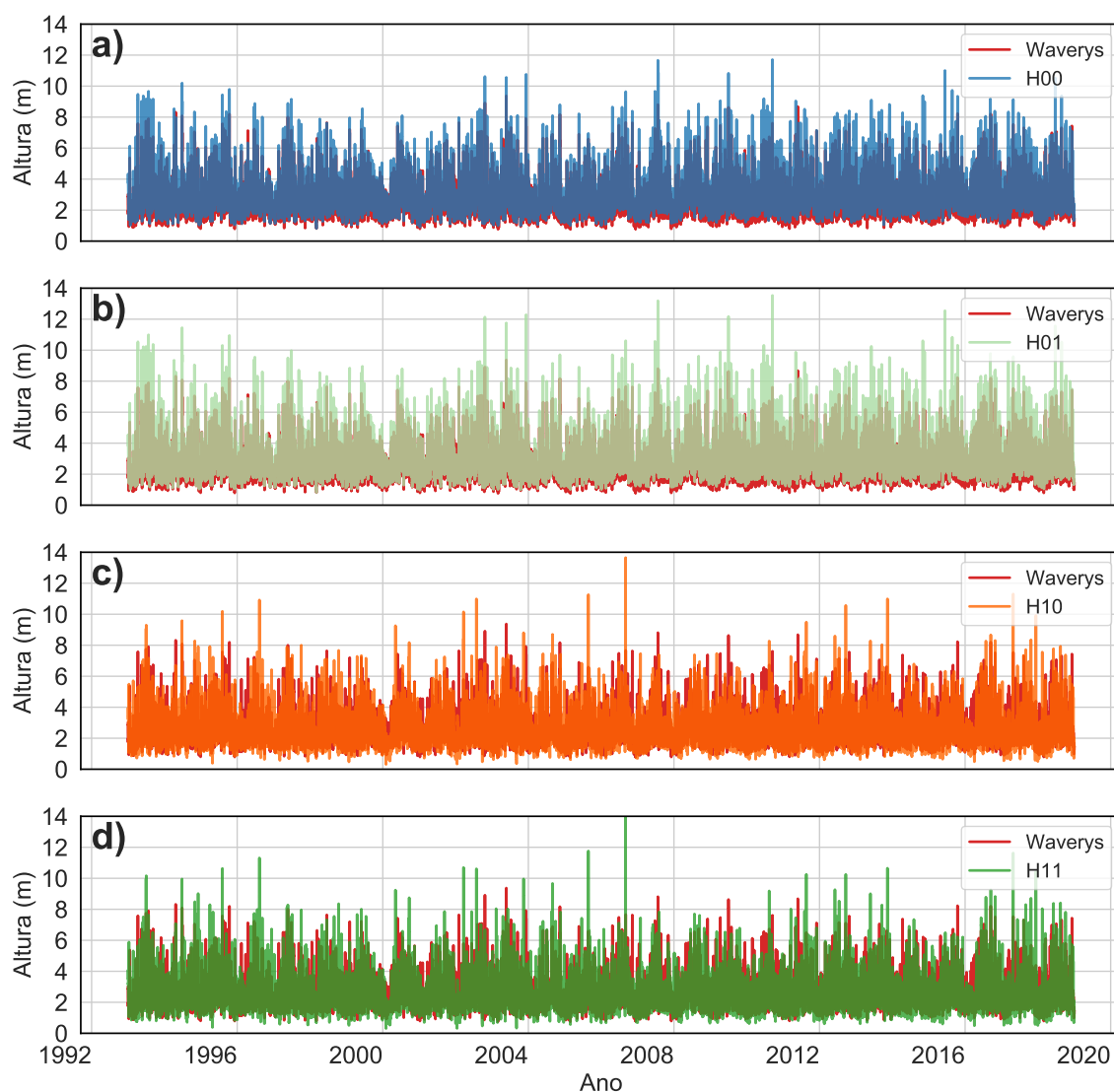


Figura 5.5: Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto *Offshore*. WEVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 1993 a 2018. A média da observação é apresentada (cinza) seguido dos percentis mais elevados (90, 95 e 99)

A Tabela 5.3 apresenta as estatísticas para o ponto *Offshore*. Observa-se que as simulações globais H_{00} e H_{01} tendem a superestimar a média simulada na reanálise WEVERYS, ao passo que as simulações regionais H_{10} e H_{11} estão mais próximas desse valor. No entanto, todas as simulações exibem valores máximos superiores ao do WEVERYS.

Os valores de BIAS indicam que as simulações H_{00} e H_{01} apresentam um viés positivo, enquanto as regionais (H_{10} e H_{11}) mostram um viés ligeiramente negativo (Tabela 5.3). Já o MAE revela que todas as simulações apresentam erros significativos, com valores maiores

para as simulações regionais.

Quanto às componentes do MSE, a dispersiva é dominante para as simulações regionais, sugerindo uma maior discrepância na fase. No entanto, as simulações globais apresentam erros significativos em ambas as componentes (Tabela 5.3).

Os índices de concordância (IC) e de habilidade de (D_{Pielke}) revelam um melhor desempenho das simulações globais, com valores de IC mais próximos de 1 e menores de D_{Pielke} . A análise dos percentis mais altos indica que as simulações globais tendem a superestimar os valores mais extremos.

Estatística	WAVERYS	H_{00}	H_{01}	H_{10}	H_{11}
Média (m)	2,51	3,01	3,05	2,44	2,46
Máximo (m)	9,37	11,71	13,53	13,65	13,95
Bias (m)	0	0,49	0,54	-0,07	-0,05
MAE (m)	0	0,58	0,62	0,67	0,68
$\sqrt{MSE_{diss}}$ (m)	0	0,54	0,62	0,08	0,10
$\sqrt{MSE_{disp}}$ (m)	0	0,60	0,64	0,93	0,95
IC (adim.)	1,00	0,87	0,86	0,76	0,76
D_{Pielke} (adim.)	0	1,66	1,89	1,88	1,99
Pctl 90 (m)	3,84	4,62	4,73	3,75	3,82
Pctl 95 (m)	4,48	5,45	5,65	4,4	4,54
Pctl 99 (m)	5,94	7,36	7,87	5,96	6,31

Tabela 5.3 - Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para o ponto *Offshore* comparando a reanálise WAVERYS com as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} .

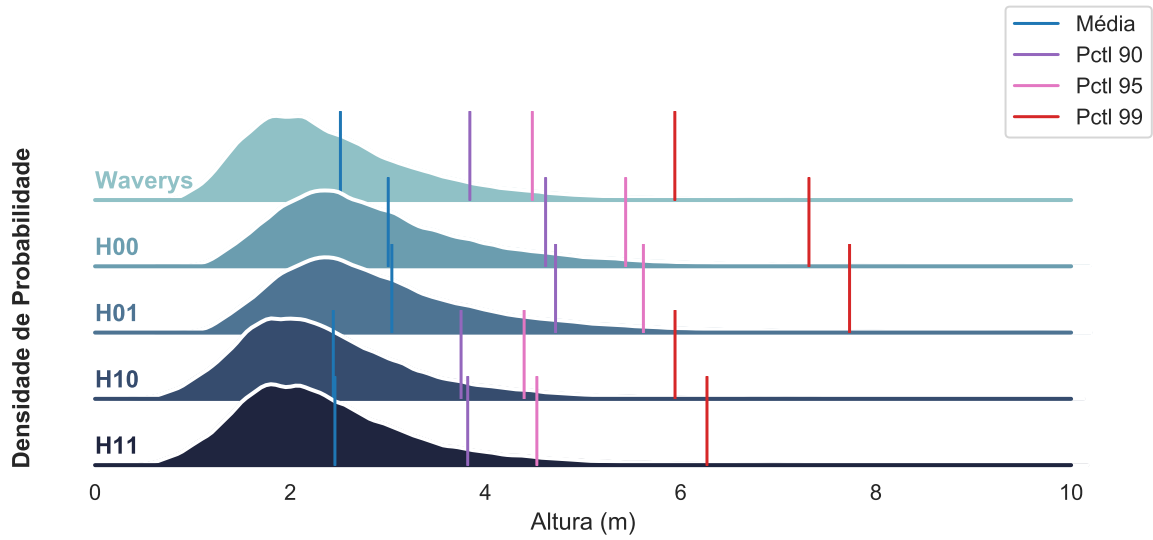


Figura 5.6: Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto *Offshore*, no período de 1993 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: WAWERYYS, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho).

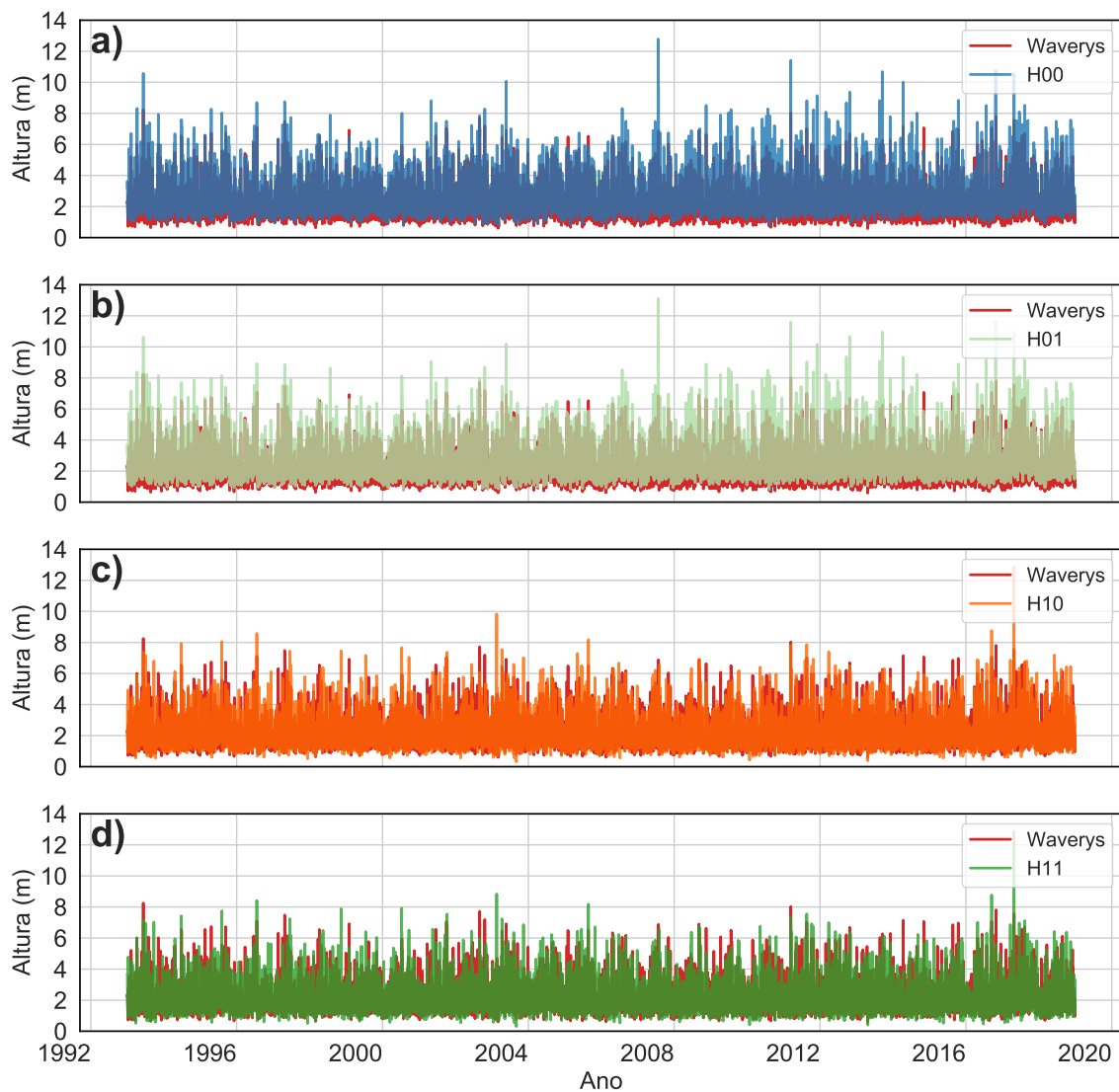


Figura 5.7: Série temporal da altura significativa de onda (m) no ponto *Offshore Montevideo*. WEVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 1993 a 2019. A média da observação é apresentada (cinza) seguido dos percentis mais elevados (90, 95 e 99)

Por fim, a Tabela 5.4 fornece estatísticas do ponto *Offshore Montevideo*. Em termos de média, as simulações H_{10} e H_{11} apresentaram valores próximos (Tabela 5.4), com WEVERYS mostrando 2,09 m, e as simulações variando de 2,12 m a 2,14 m. No entanto, todas as simulações superestimaram o valor máximo, com as simulações globais (H_{00} e H_{01}) superando 12,78 m, enquanto WEVERYS registrou 8,25 m.

Em termos de Bias, as simulações regionais apresentaram viés mínimo (0,03 m e 0,05 m), enquanto as simulações globais tiveram um viés maior de 0,52 m. O MAE foi similar

entre todas as simulações, variando entre 0,55 m a 0,59 m. A componente dissipativa do MSE foi mínima para as simulações regionais, mas a componente dispersiva foi mais significativa, sugerindo erros de fase nas simulações (Tabela 5.4).

O IC das simulações variou entre 0,78 a 0,85, sugerindo uma correspondência moderada com a reanálise. O D_{pielke} para todas as simulações estava abaixo de 2, indicando habilidade moderada de acordo com este critério.

Por último, os percentis mais elevados das simulações indicam uma tendência a superestimar os eventos de ondas mais extremos. Vale ressaltar que, em todos os pontos de análise, esses percentis aumentam quando a correção do vento é aplicada. Assim, as simulações H_{01} exibem percentis 90, 95 e 99 superiores à sua correspondente H_{00} sem a correção do vento. Similarmente, essa mesma tendência é observada entre H_{10} e H_{11} , reforçando o impacto da correção do vento na estimativa dos eventos de ondas mais extremos.

Estatística	WAVERYS	H_{00}	H_{01}	H_{10}	H_{11}
Média (m)	2,09	2,60	2,61	2,14	2,12
Máximo (m)	8,25	12,78	13,12	12,86	12,87
Bias (m)	0	0,52	0,52	0,05	0,03
MAE (m)	0	0,58	0,59	0,55	0,55
$\sqrt{MSE_{diss}}$ (m)	0	0,55	0,57	0,05	0,03
$\sqrt{MSE_{disp}}$ (m)	0	0,56	0,57	0,77	0,78
IC (adim.)	1,00	0,85	0,84	0,79	0,78
D_{Pielke} (adim.)	0	1,77	1,84	1,75	1,77
Pctl 90 (m)	3,25	3,98	3,99	3,26	3,24
Pctl 95 (m)	3,83	4,70	4,74	3,84	3,82
Pctl 99 (m)	5,20	6,45	6,62	5,28	5,30

Tabela 5.4 - Estatísticas das condições de altura significativa de ondas para o ponto *Offshore Montevideo* comparando a reanálise WAVERYS com as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} .

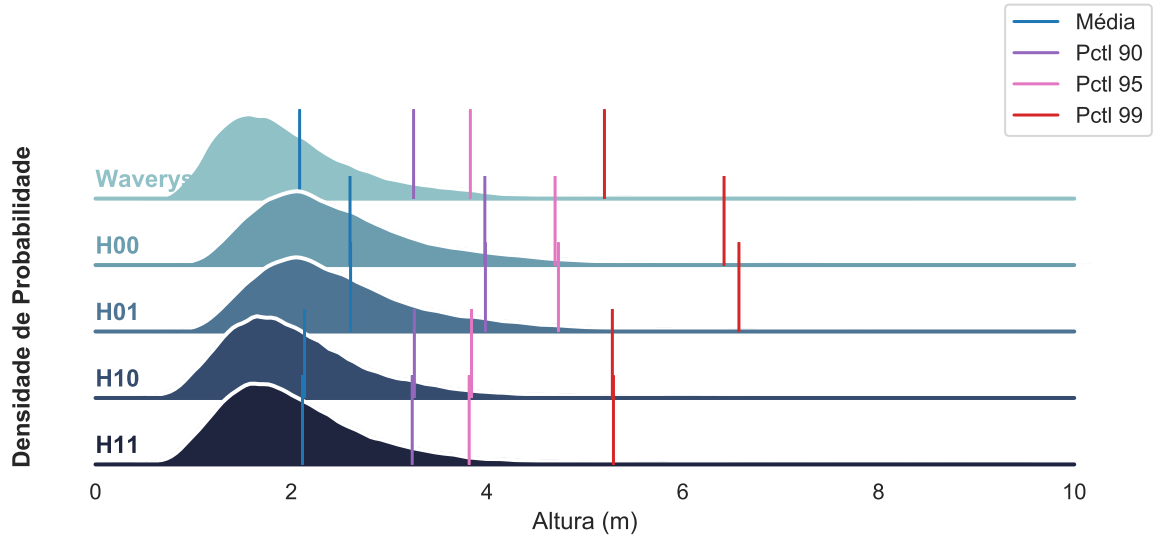


Figura 5.8: Função de densidade de probabilidade da altura significativa de onda (m) no ponto *montevideo*, no período de 1993 a 2018. As linhas representam, de cima para baixo: WAWERYYS, e as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} e H_{11} . Indicadores estatísticos são apresentados em cores diferentes: média (azul), percentil 90 (roxo), percentil 95 (rosa) e percentil 99 (vermelho).

As funções de densidade de probabilidade apresentadas nas Figuras 5.9 e 5.10 foram calculadas utilizando o percentil 95 e com todos os valores, respectivamente.

Em relação à Figura 5.9a, observa-se que, para a boia de Rio Grande, tanto a reanálise quanto as simulações H_{10} e H_{11} subestimam as ondas acima de aproximadamente 5,8 m. As simulações H_{00} e H_{01} , no entanto, superestimam os valores em todos os quantis, conforme mostrado pela curva deslocada à direita. Na Figura 5.9b, referente à boia de Itajaí, a função de densidade de probabilidade da simulação H_{11} é mais ampla, sinalizando maior variação nos extremos nesse ponto de análise. Já na Figura 5.9c, onde a referência é a reanálise do WAWERYYS, constata-se o mesmo padrão de superestimação das simulações H_{00} e H_{01} , tanto no ponto *Offshore* quanto no *Offshore Monte video*, também representado pela curva deslocada à direita. Em síntese, os resultados indicam que as simulações H_{10} e H_{11} são mais precisas para a boia de Rio Grande, enquanto a simulação H_{11} apresenta maior variação nos extremos para Itajaí. Além disso, a curva deslocada à direita nos pontos *Offshore* e *Offshore Monte video* indicam superestimativas.

A Figura 5.10 corrobora a análise anterior, relacionada à distribuição dos dados acima do percentil 95%. As curvas de H_{00} e H_{01} aparecem deslocadas em relação às observações e ao WAWERYYS em todo o espectro, indicando superestimativas não apenas nos percentis

elevados, mas também em todo o conjunto de dados, para a boia de Rio Grande, Itajaí e os pontos *Offshore* e *Offshore Montevideo*. No entanto, na boia de Itajaí, observa-se um padrão semelhante entre todos os modelos analisados nos valores de H_s abaixo de 2 m, o que sugere uma maior consistência e menor variação entre os modelos para ondas menores nesta localização específica.

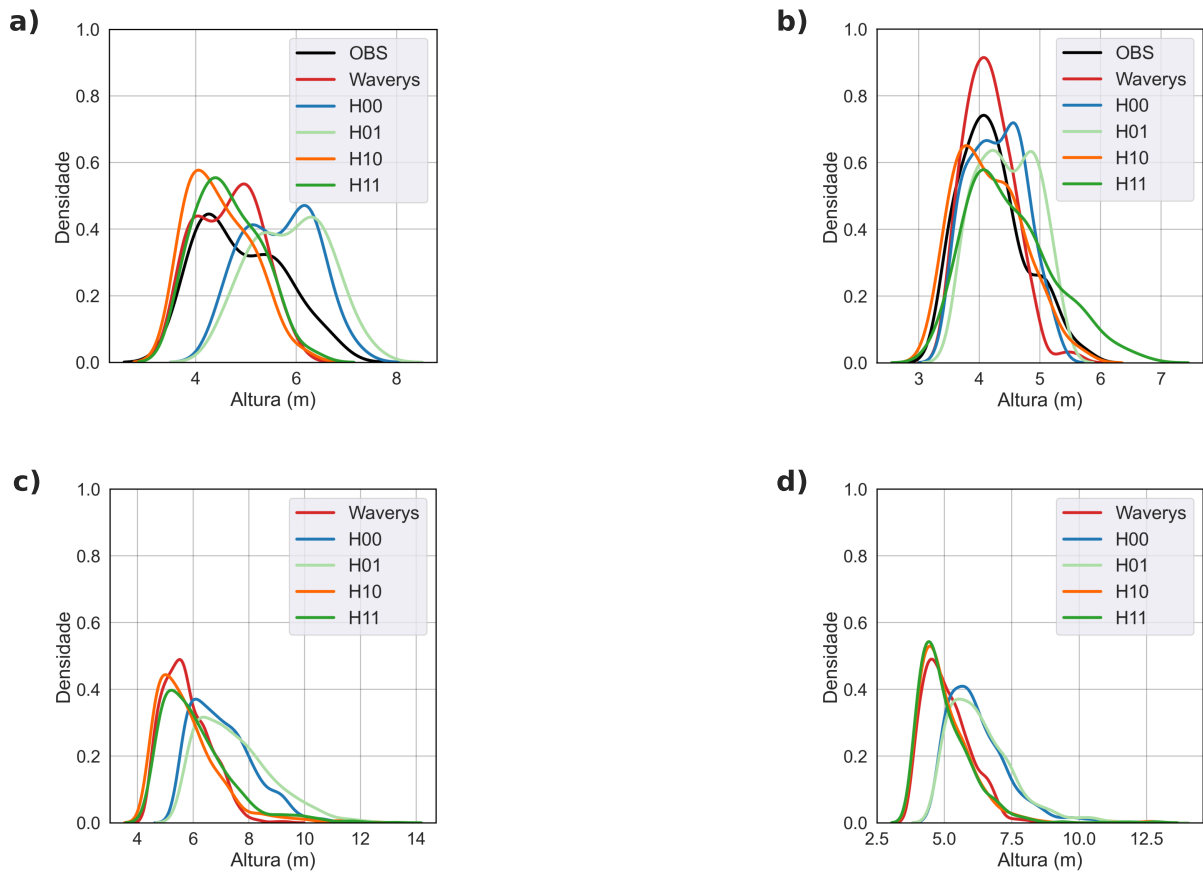


Figura 5.9: Função de densidade de probabilidade do percentil 95 de H_s (m) para a boia de Rio Grande (a), Itajaí (b), o ponto *Offshore* (c) e o ponto *Offshore Montevideo* (d). Observação (preto), WAVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 2009 a 2019.

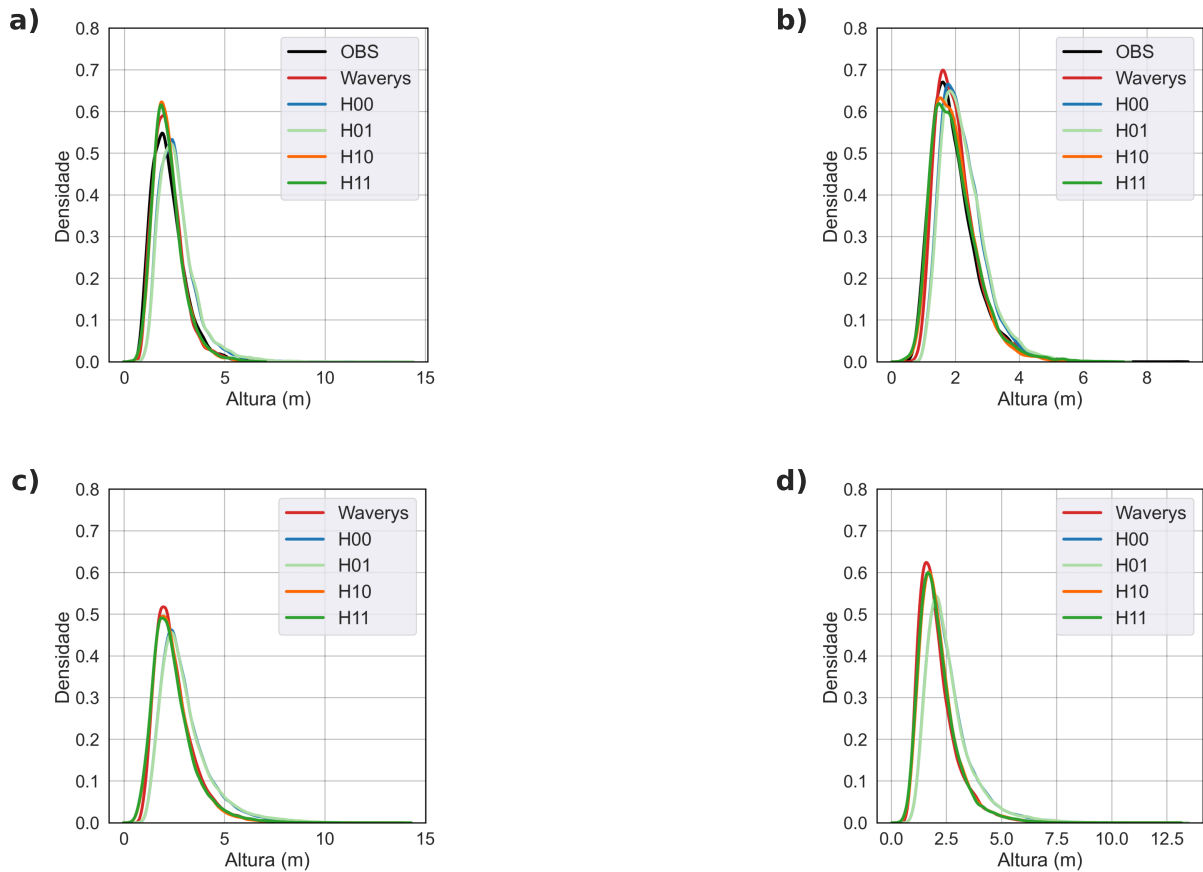


Figura 5.10: Função de densidade de probabilidade de H_s (m) para a boia de Rio Grande (a), Itajaí (b), o ponto *Offshore* (c) e o ponto *Offshore Montevideo* (d). Observação (preto), WAWERYYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período 2009 a 2019.

A Figura 5.11a mostra o *QQplot* comparando os dados dos experimentos e observações, para a boia de Rio Grande. Percebe-se que as simulações H_{00} e H_{01} estão acima da curva de referência em todos os quantis, enquanto que a simulação H_{10} tende a subestimar os valores de H_s em quantis mais elevados. Entretanto, a correção do vento feita na simulação H_{11} pareceu corrigir esse comportamento, trazendo os valores de H_s para próximo do observado nos quantis mais elevados. Por outro lado, o modelo WAWERYYS se aproximou da curva de referência em todos os quantis. Na Figura 5.11b, referente à boia de Itajaí, é possível notar que tanto o WAWERYYS quanto as simulações globais (H_{00} e H_{01}) superestimam os valores de quantis mais baixos, mas tendem a se aproximar da referência em quantis mais elevados. Já a simulação H_{10} subestima muito os valores de H_s nos quantis mais elevados, mas a simulação H_{11} (que possui a correção no vento) fica mais próxima da referência, mostrando a efetividade na correção do vento. Analisando agora as Figuras 5.11c e d, em

que não há boia e a referência passa a ser o WAVERYS, nota-se que as simulações H_{00} e H_{01} estão sempre acima da referência em todos os quantis, tendendo a diferença a ser ainda maior nos quantis superiores.

Ao avaliar os diagramas de Taylor (Figura 5.12), é possível notar que na boia de Rio Grande, o modelo WAVERYS apresenta uma correlação de aproximadamente 93% e RMSE abaixo de 0,5 metros, enquanto todas as outras simulações apresentam uma correlação em torno de 50%. Já na Figura 5.12b, referente à boia de Itajaí, tanto a reanálise WAVERYS quanto as outras simulações apresentam um desvio padrão próximo aos dados observados, em torno de 0,70 metros. No entanto, o modelo WAVERYS tem a maior correlação, cerca de 90%, seguido pelas simulações H_{00} e H_{01} , com correlações de cerca de 70%, e pelas simulações regionais H_{10} e H_{11} , com correlações em torno de 50%.

Quanto aos diagramas referentes aos pontos *Offshore* e *Offshore Montevideo* (Figuras 5.12c e d), as simulações globais H_{00} e H_{01} apresentam as maiores correlações, de aproximadamente 85%, em ambos os pontos de análise, além de um menor RMSE, de cerca de 0,55 metros. As simulações H_{10} e H_{11} , por sua vez, possuem uma correlação de cerca de 60% e RMSE próximo a 1 metro.

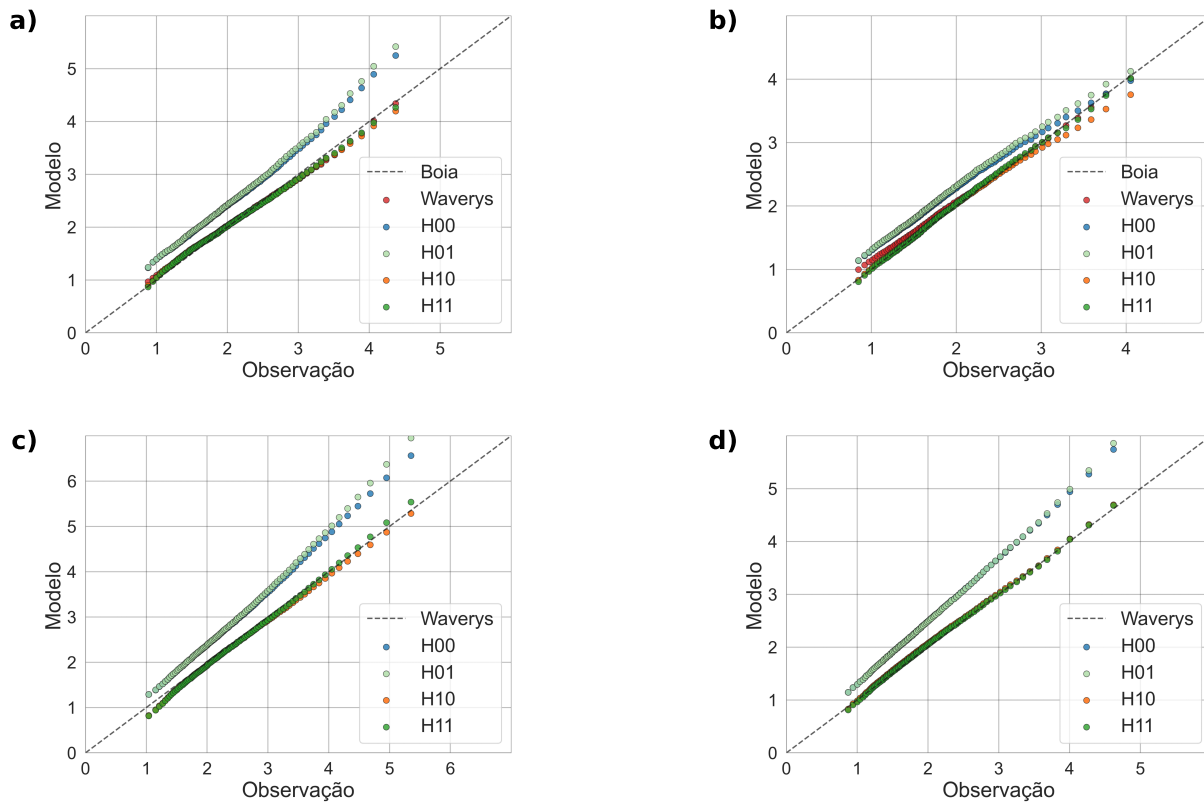


Figura 5.11: Diagrama QQ-plot das simulações H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) comparadas com (a e b) os dados observados nas boias do PNBOIA (Rio Grande - RS e Itajaí - SC, respectivamente) e (c e d) com os dados nos pontos da reanálise WAVERYS (*Offshore* e *Offshore Montevideo*, respectivamente).

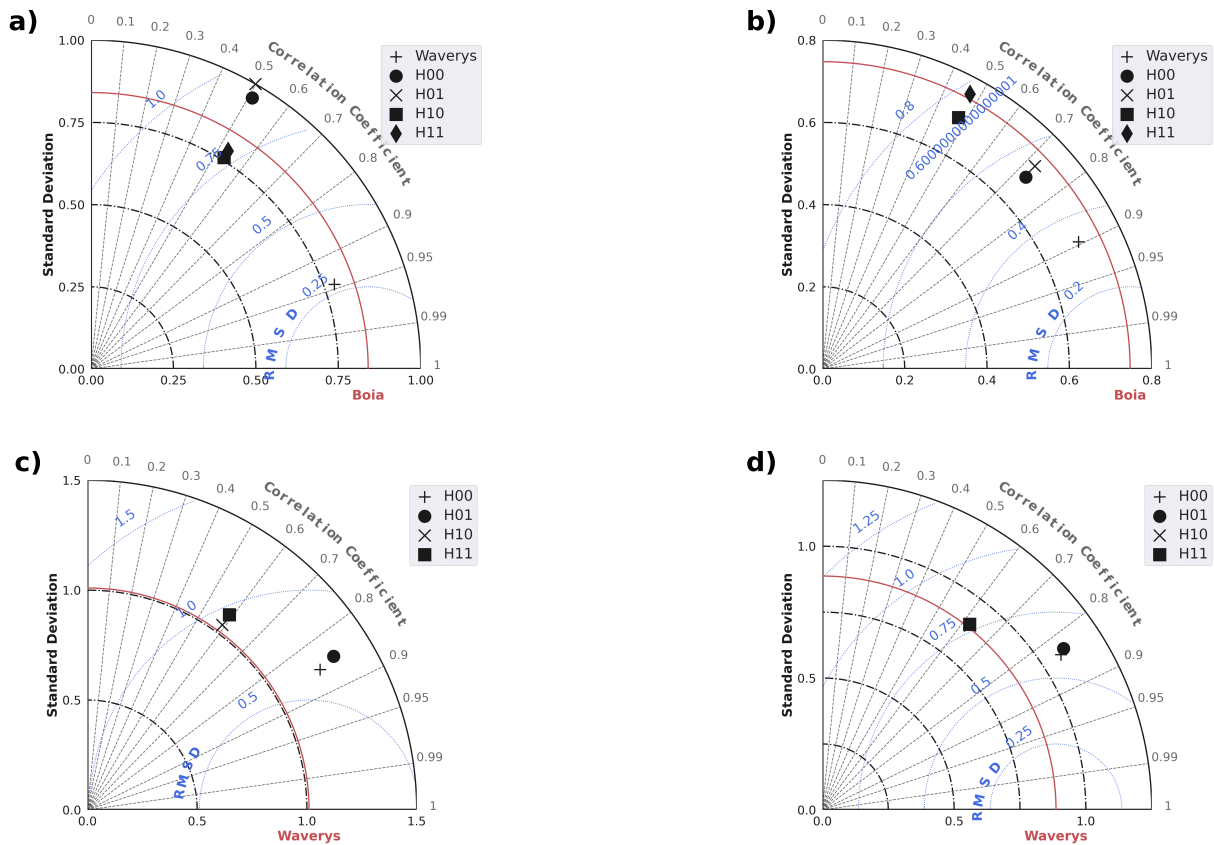


Figura 5.12: Diagrama de Taylor com a avaliação da reanálise WAVERYS, as simulações H_{00} , H_{01} , H_{10} , H_{11} em relação à boia. A Figura (a e b) representam os dados observados nas boias do PNBOIA (Rio Grande - RS e Itajaí - SC, respectivamente) e (c e d) com os dados nos pontos da reanálise WAVERYS (*Offshore* e *Offshore Montevideo*, respectivamente).

A análise realizada nos quatro pontos selecionados revela um desempenho variado das simulações regionais e globais. Especificamente, no ponto de Rio Grande, as simulações regionais exibiram menores erros (MAE e BIAS), caracterizando uma melhor precisão em relação às globais. Contudo, no ponto de Itajaí, *Offshore* e *Offshore Montevideo*, o cenário se inverte, com as simulações globais apresentando um desempenho superior, expresso por um MAE menor e com critérios do IC e D_{Pielke} melhores. Vale ressaltar o valor expressivo da componente dispersiva do MSE apresentado nas simulações regionais que é dominante em todos os quatro pontos.

No intuito de analisar a variabilidade sazonal de H_s em cada ponto de análise, foram elaborados boxplots sazonais para os dados observados, reanálise e simulações de modelos numéricos. Estes gráficos permitem uma avaliação comparativa das distribuições e tendências sazonais, bem como uma melhor compreensão das discrepâncias entre os mode-

los e as observações ou reanálise em diferentes épocas do ano. Ao analisar o boxplot sazonal (Figura 5.13), constatamos que os resultados estão em consonância com as discussões anteriores. Em ambos os pontos (Rio Grande e Itajaí), o WEVERYS é o que mais se aproxima das observações, tanto em termos de valores médios quanto nos limites superior e inferior do boxplot.

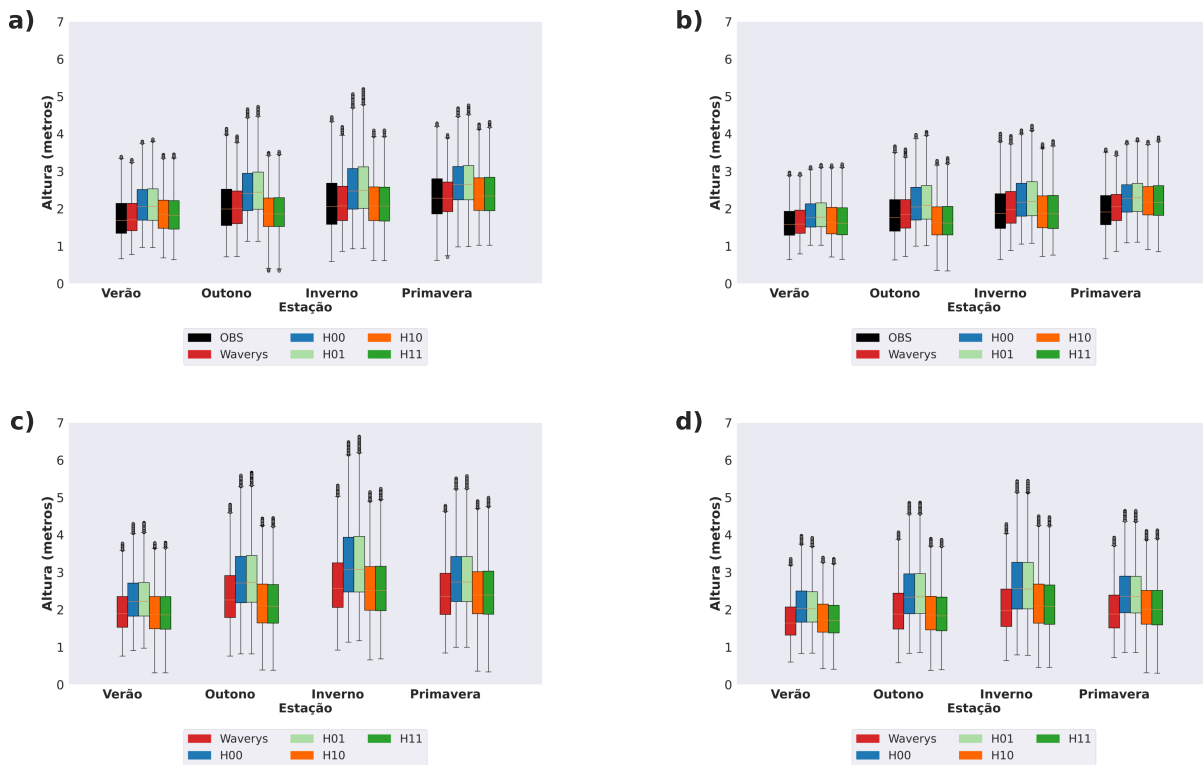


Figura 5.13: Boxplots sazonais de Hs para cada ponto de análise: Rio Grande (a), Itajaí (b), *Offshore* (c) e *Offshore Montevideo* (d). A comparação inclui dados observados (preto), reanálise WEVERYS (vermelho) e simulações de modelos numéricos: H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde). Os boxplots exibem a mediana (linha central), primeiro e terceiro quartis (caixa), intervalo interquartil (IQR) e possíveis *outliers* (pontos individuais) para cada conjunto de dados nos quatro períodos sazonais: primavera (setembro a novembro), verão (dezembro a fevereiro), outono (março a maio) e inverno (junho a agosto).

Para o ponto da boia de Rio Grande (Figura 5.13a), as simulações H_{00} e H_{01} superestimam o valor médio das ondas em todas as estações do ano, enquanto as simulações H_{10} e H_{11} superestimam no verão e na primavera e subestimam no outono. No inverno, as simulações regionalizadas apresentam uma média muito próxima aos dados observados. Entretanto, o intervalo dos limites superior e inferior dos dados mostra uma maior abrangência nos valores de Hs (ou seja, ondas mais altas e mais baixas) do que as simulações H_{11} e H_{01} . É relevante mencionar que as simulações H_{00} e H_{01} apresentam um

maior número de *outliers* no outono e no inverno nesse ponto.

Para o ponto da boia de Itajaí (Figura 5.13b), o padrão observado na boia de Rio Grande se mantém, com o WEVERYS mais próximo das observações e a superestimativa das simulações H_{00} e H_{01} em todas as estações. Contudo, é importante notar que na primavera todos os modelos (reanálise WEVERYS e todas as simulações) superestimam os valores de Hs. Além disso, no outono e no inverno, os dados observados apresentam uma maior quantidade de *outliers*. No verão, deste ponto, as variações de Hs são bem menores, não ultrapassando 3,5 metros em nenhuma das simulações ou nos dados observados.

Nos pontos *Offshore* e *Offshore Montevideo* (Figura 5.13c e d), ocorre um padrão esperado. Como são pontos localizados em regiões mais distantes do talude continental, valores mais elevados de Hs aparecem em todos os resultados. Não havendo dados observados nesses pontos, o WEVERYS é usado como referência. As simulações H_{10} e H_{11} possuem o limite inferior bem abaixo do WEVERYS e das demais simulações em todas as estações, apresentando a mediana próxima da reanálise e valores do limite superior abaixo do WEVERYS no outono e inverno. As simulações H_{00} e H_{01} estão sempre acima do WEVERYS, incluindo mais valores de *outliers*.

5.2 Campos Médios

A Figura 5.14 apresenta a comparação das médias anuais entre as simulações H_{00} e H_{11} no período de 1979 a 2018. Essa análise permite avaliar que as diferentes execuções do modelo são coerentes em termos médios, apresentando valores de Hs mais altos na porção sudeste da grade, onde passam ciclones transientes e suas altas migratórias, o que resulta em condições favoráveis para a geração de ondas mais altas. É importante ressaltar que a simulação H_{00} (Figura 5.14b) é global e não possui limitações de grade, permitindo que os ventos de oeste que passam pela Passagem de Drake, localizada entre o extremo sul da América do Sul e a Antártica, apareçam com maior intensidade. Isso resulta em valores de Hs próximos a 5 metros na porção sudoeste da grade ATLSUL, o que não é simulado na H_{11} (Figura 5.14a).

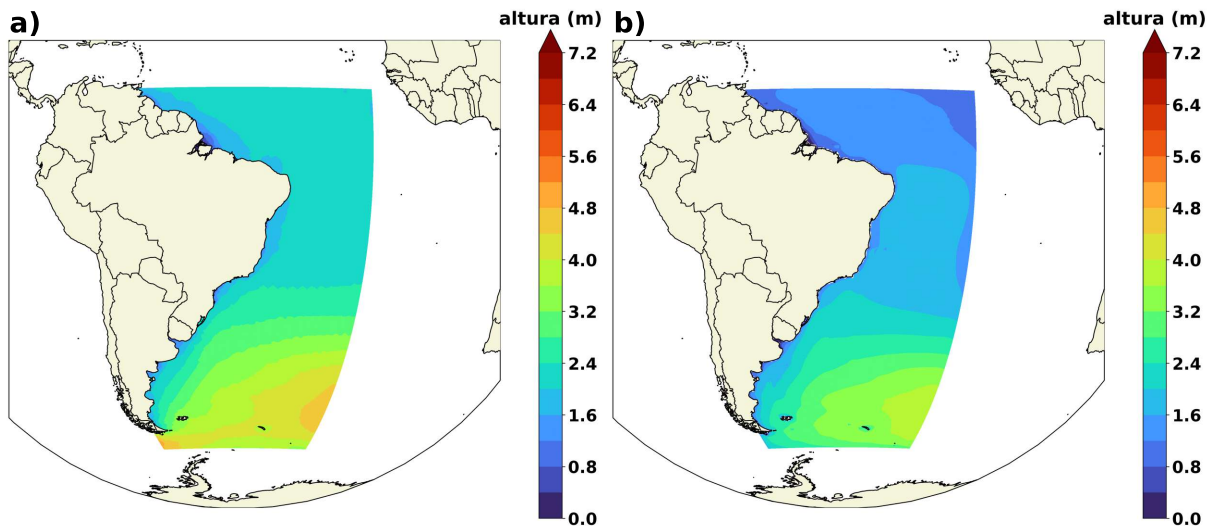


Figura 5.14: Mapa de média anual de H_s para o período de 1979-2018 no domínio ATLSUL. (a) simulação H_{00} ; (b) simulação H_{11}

A Figura 5.15 apresenta a aplicação da separação de fatores nas médias anuais. Observa-se que a contribuição da variação do H_s devido à regionalização (ΔH_1), ilustrada na Figura 5.15a, não apresenta mudanças significativas próximas à Costa Sul-americana, com valores aproximados de 0 metros. No entanto, no extremo sudoeste da grade, os valores médios de H_s são inferiores a -3,0 metros, indicando que a regionalização reduziu os valores médios de altura de onda nessa área. Em relação à correção do vento (ΔH_2), demonstrada na Figura 5.15b, essa não desempenhou um papel significativo na alteração do H_s .

A interação não-linear entre os termos de regionalização e correção do vento é exibida na Figura 5.15c. É possível notar que, na Costa Leste da Argentina, a variação do H_s foi negativa, em torno de -1,0 metro. Em média, este fator contribuiu para a redução da intensidade dos ventos associados aos ciclones nessa região, o que, por sua vez, resultou em uma diminuição da magnitude de H_s .

Vale ressaltar que a análise das médias anuais não é suficiente para avaliar o desempenho das simulações em eventos extremos, pois essas médias podem mascarar variações importantes que ocorrem em curtos períodos de tempo e em condições específicas. Sendo assim, nos capítulos subsequentes, serão examinadas as diferenças entre as simulações nesses cenários críticos, a fim de compreender melhor o comportamento do modelo e sua capacidade de representar eventos de alta energia e maior impacto.

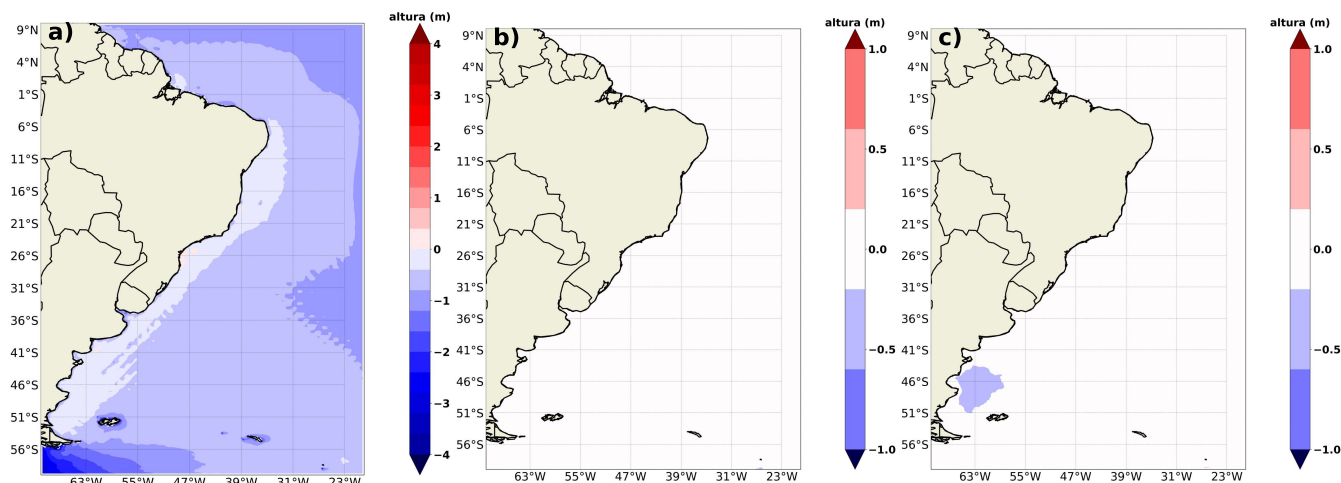


Figura 5.15: Mapa de média anual de H_s para o período de 1979-2018 no domínio ATLSUL. (a) Efeito devido a regionalização (ΔH_1) (b) a correção do vento (ΔH_2) (c) a interação não-linear entre os fatores (ΔS); calculadas pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3.

Deve-se observar que o intervalo e a paleta de cores das Figuras 5.15 diferem entre si. Essa diferença é resultado da variação na magnitude dos impactos da regionalização, da correção do vento e da interação não-linear. Para facilitar a identificação dos valores em cada efeito, foram escolhidas barras de cores e intervalos de magnitude apropriados de acordo com cada situação.

Embora essa seleção possa parecer arbitrária e subjetiva, foi fundamentada na particularidade de cada efeito. Assim, o objetivo é garantir uma representação visual adequada que permita uma interpretação mais clara e precisa dos resultados apresentados.

5.3 Eventos extremos

Nesta subseção, é discutida as diferenças entre as simulações na representação dos dois eventos extremos selecionados. Os eventos foram escolhidos com base no horário de ocorrência identificado no artigo de Gramcianinov et al. (2020) e conforme descrito na seção de métodos (Tabela 4.2). Foram geradas figuras de séries temporais comparativas entre o WAVERYS e as simulações globais e regionais, mapas sinóticos e mapas dos efeitos da regionalização e da correção do vento.

A análise das condições sinóticas e diferenças entre as simulações é realizada com base nos campos de H_s e direção do vento a 10 metros, altura geopotencial, PNMM e vento em 500 hPa, vento a 10 m (barbela), PNMM e velocidade vertical em 500 hPa. As figuras

estão estruturadas em duas linhas e três colunas, resultando em seis subfiguras para cada evento. Na primeira linha, são apresentados os resultados da simulação H_{00} . Na segunda linha, são exibidos os campos com os mesmos parâmetros, porém, referentes à simulação H_{10} . O ponto vermelho, representado nas figuras de velocidade do vento, corresponde à coordenada encontrada referente ao centro do ciclone no estudo de [Gramcianinov et al. \(2020\)](#).

O primeiro evento da Tabela [4.2](#) (evento 2) apresentou o maior valor de Hs máximo (10,03 m) e a maior duração. Esse ciclone está associado à ciclogênese sobre o continente em torno de 30°S, ocorrido em 31 de janeiro às 00 UTC.

Conforme mostrado na Figura [5.16](#), o pico de Hs ocorreu primeiro nos pontos *Offshore* e *Offshore Montevideo* (Figuras [5.16c](#) e [5.16d](#)) e posteriormente nas boias de Rio Grande e Itajaí (Figuras [5.16a](#) e [5.16b](#)), próximo ao dia 02 de fevereiro às 00 UTC. Entretanto, apenas a reanálise WEVERYS e as simulações H_{00} e H_{01} representaram bem o evento, mostrando que as rodadas regionalizadas não simularam adequadamente o extremo de onda.

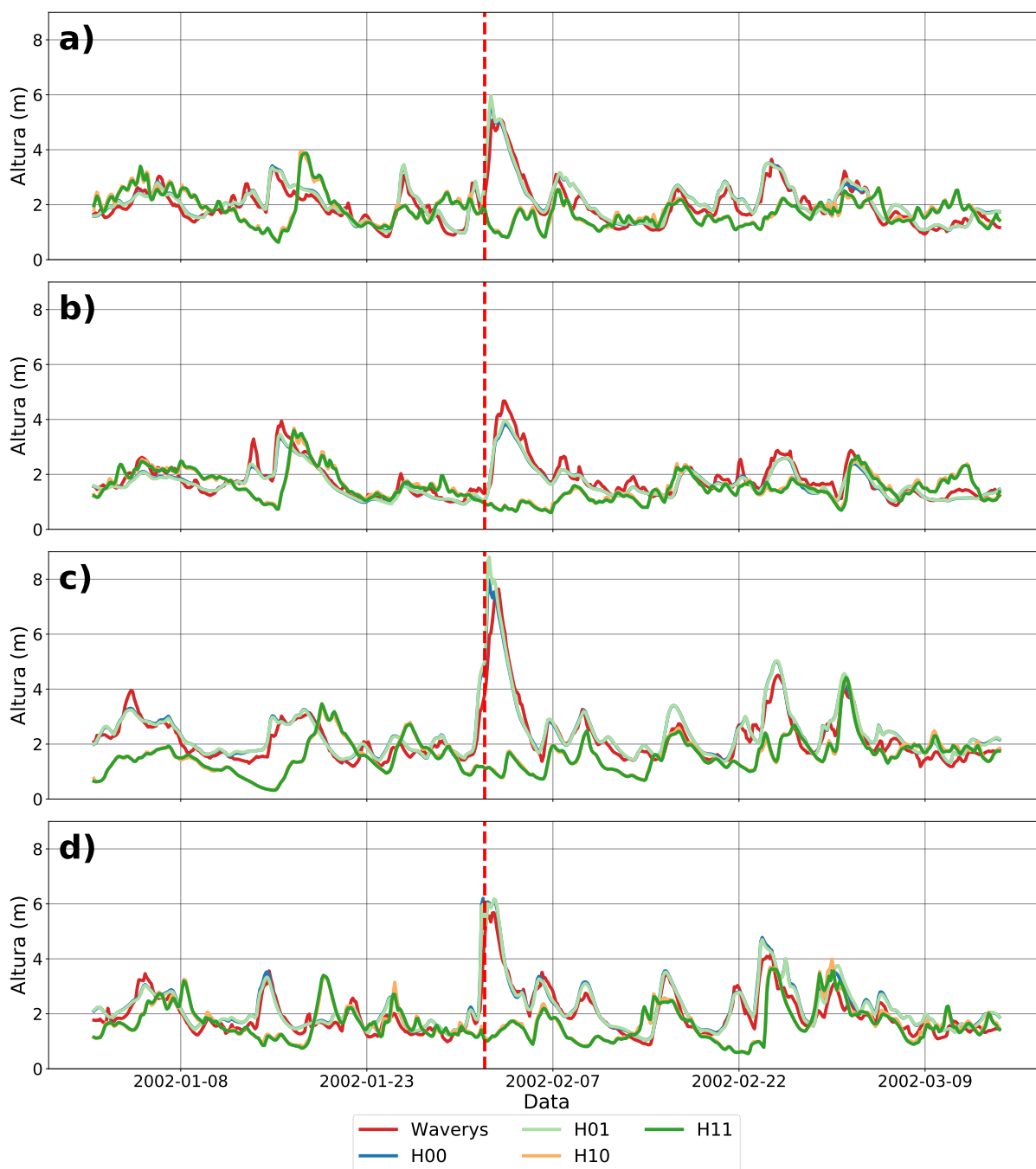


Figura 5.16: Série temporal da altura de onda (m) comparativa entre o modelo WAVERYYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período do evento 2. (a) Ponto da Boia Rio Grande ; (b) Ponto da Boia Itajaí ; (c) Ponto *Offshore* e (d) Ponto *Offshore Montevideo*. A linha tracejada vermelha corresponde ao horário de ocorrência do evento (Tabela 4.2).

Na Figura 5.17, a simulação H_{00} (Figura 5.17a) permitiu o desenvolvimento de uma extensa pista ao longo da costa, onde ocorreram os valores extremos (à noroeste do centro do ciclone). Gramcianinov et al. (2020) mostraram que as condições extremas ocorreram

no centro do ciclone (região de pressão mínima) e também longe da zona de geração, próximo à costa de Santa Catarina, a noroeste do ciclone. Esses resultados corroboram com os apresentados aqui.

Gramscianinov et al. (2020) identificaram que o ciclone se moveu para leste, em direção ao oceano, e os ventos de sudoeste provenientes do setor frio ficaram localizados paralelos à costa. Na Figura 5.17d, pode-se observar que o modelo H_{10} não representou adequadamente a posição correta dos sistemas atmosféricos relacionados à ocorrência do evento, não resultando na representação da pista de ventos de sudeste que se forma ao sul do ciclone em direção ao Uruguai.

Além disso, no mapa de altura geopotencial em 500 hPa, a simulação H_{00} (Figura 5.17b) apresenta um vórtice fechado na latitude de 40°S, o que não é simulado na mesma região na H_{10} (Figura 5.17e), que apresenta apenas um cavamento na latitude de 50°S. O mesmo ocorre no mapa de velocidade vertical em 500 hPa à direita, que mostra um movimento ascendente ao longo do ramo frio da frente, enquanto que na simulação regionalizada este ocorre em latitudes mais altas.

Ao analisar o mapa de velocidade do vento, nota-se uma distinção evidente entre as simulações. Um centro de ciclone é identificado em 40°S e 045°O, com ventos mais intensos (de 22 m/s) ao sul do centro do ciclone na Figura 5.18a. Por outro lado, na simulação H_{11} (Figura 5.18b), observa-se um padrão de ventos de noroeste na região onde deveria estar o centro do ciclone, enquanto uma circulação ciclônica surge em torno de 51°S e 046°O. O ponto vermelho, que representa o centro do ciclone, foi extraído da base de dados publicada no estudo de Gramscianinov et al. (2020). O vento paralelo à costa, localizado a O-NO do centro do ciclone, também não é simulado.

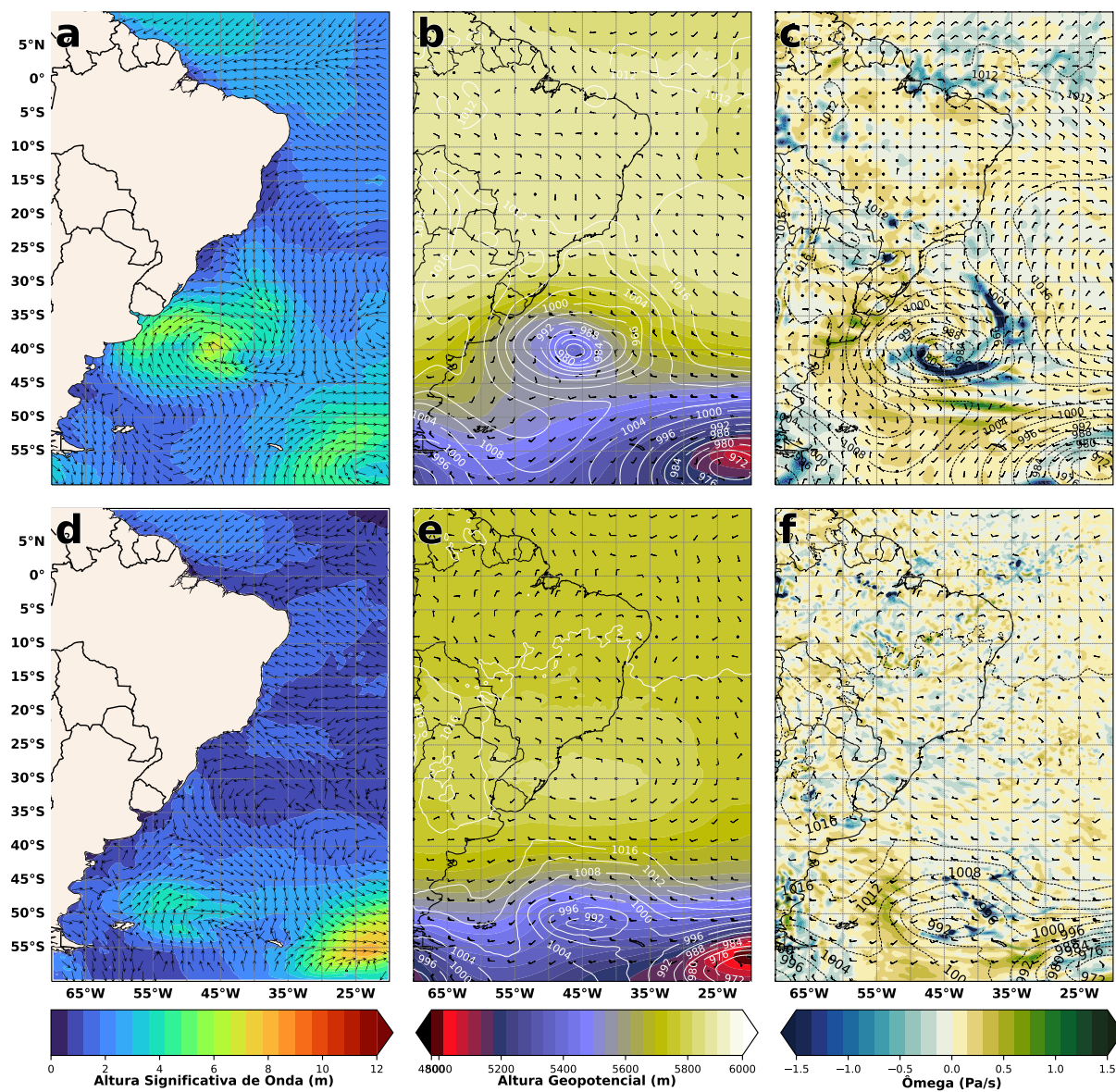


Figura 5.17: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

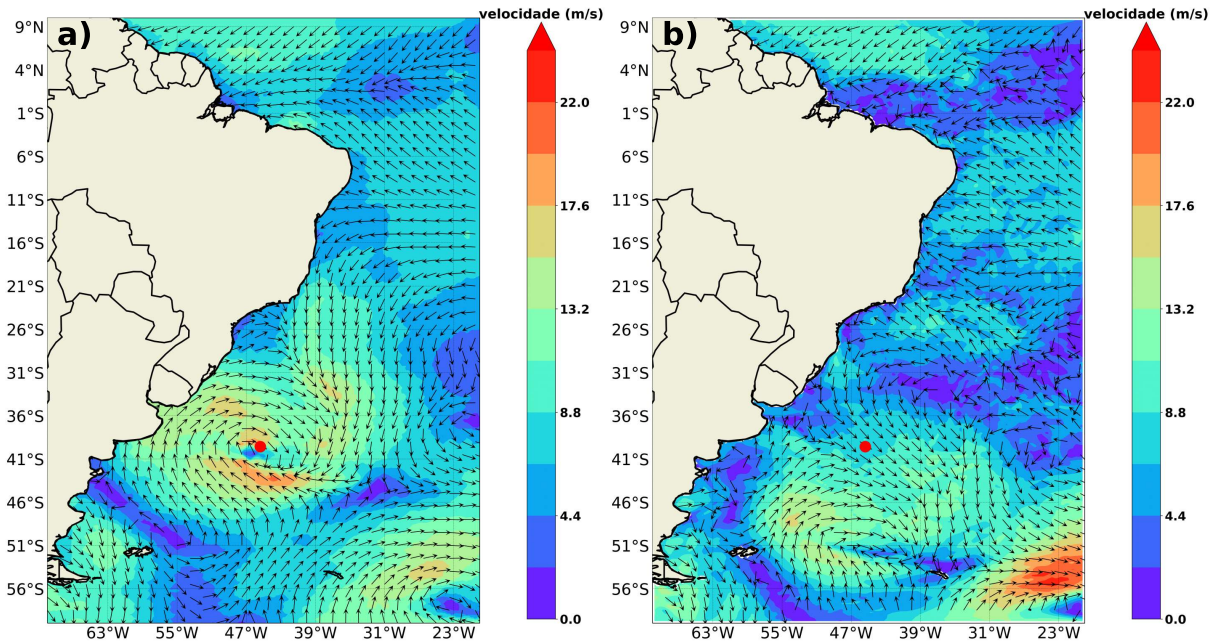


Figura 5.18: Velocidade do vento (m/s) e vetores de direção a 10 metros para 01/02/2002 às 12 UTC: (a) para a simulação H_{00} e (b) para a simulação H_{10} . O ponto vermelho representa o centro do ciclone segundo Gramscianinov et al. (2020).

A Figura 5.19 ilustra a aplicação da separação de fatores para o evento extremo em análise. A Figura 5.19a mostra a diferença entre a simulação H_{11} e H_{00} , representando a diferença entre uma simulação com todos os fatores analisados presentes (regionalização e correção do vento) e a sem nenhum deles.

A contribuição relativa da regionalização (Figura 5.19b) e da correção do vento (Figura 5.19c) na simulação deste evento extremo é evidente. A regionalização reduziu os valores de H_s em cerca de -5 metros na localização do ciclone e aumentou a altura de onda ao sul do mesmo (em torno de 3 metros), na posição da alta pós-frontal. Por outro lado, a correção do vento (Figura 5.19c) aumentou os valores H_s no centro do ciclone e à noroeste do mesmo (região onde ocorreram os maiores valores de H_s da ordem de um metro) e reduziu a intensidade de H_s no sul do Uruguai (aproximadamente -0.5 metro). Já o termo S (5.19d) apresentou um efeito inverso ao da correção do vento, promovendo uma redução de H_s no centro do ciclone e à noroeste do mesmo e aumentou os valores na região ao sul do Uruguai.

A magnitude da influência da regionalização em relação à diferença entre as simulações (Figura 5.19a) revela que este fator tem muito mais importância do que a correção do vento e a interação não linear, que possuem ordens de grandeza menores. Para explorar

melhor as feições dos resultados, observe que a barra de cores precisou ser ajustada para o painel [5.19c](#) e [5.19d](#), uma vez que a contribuição desses fatores é menor.

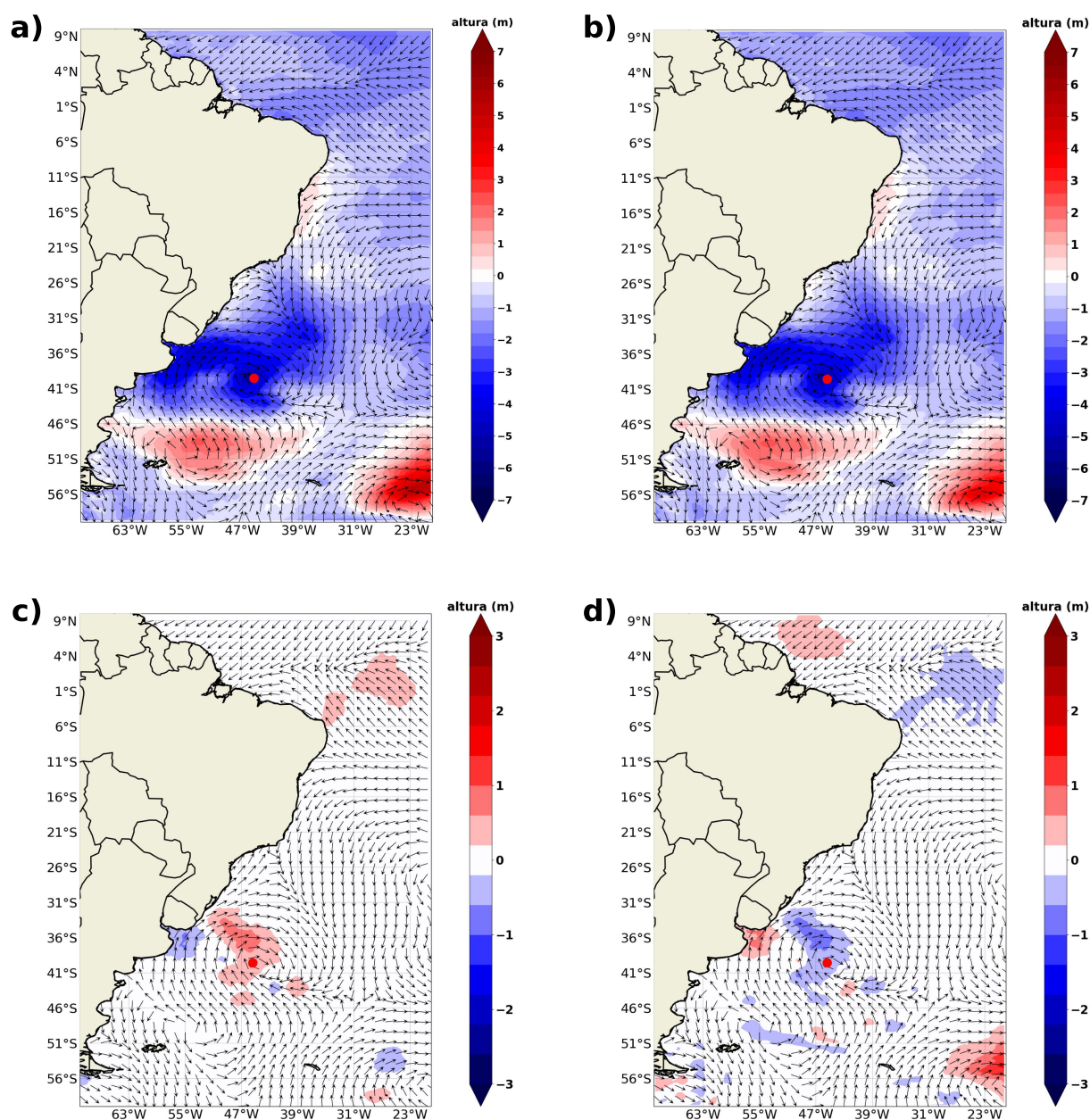


Figura 5.19: Mudança simulada na altura significativa de onda no dia 01/02/2002 12UTC. (a) diferença entre H_{11} e H_{00} . (b) efeito devido a regionalização (ΔH_1), (c) a correção do vento (ΔH_2) e (d) a interação não-linear entre os fatores (ΔS); calculadas pelas equações [4.1](#), [4.2](#) e [4.3](#). Os vetores de vento são referentes a simulação H_{00} .

No evento 10, as séries temporais exibiram um comportamento notavelmente diferente do analisado anteriormente. De acordo com a Figura [5.20](#), em contraste com o evento prévio, este evento foi simulado em todos os pontos de análise e por todas as simulações, apresentando variados valores de intensidade. Nos pontos das boias de Rio Grande e Itajaí

(Figura 5.20a e 5.20b, respectivamente), o evento foi menos intenso, com ondas de 6 e 4 metros, respectivamente. Já nos pontos *Offshore* e *Offshore Montevideo*, os valores de H_s foram mais expressivos, atingindo ondas de 9 e 5 metros, respectivamente.

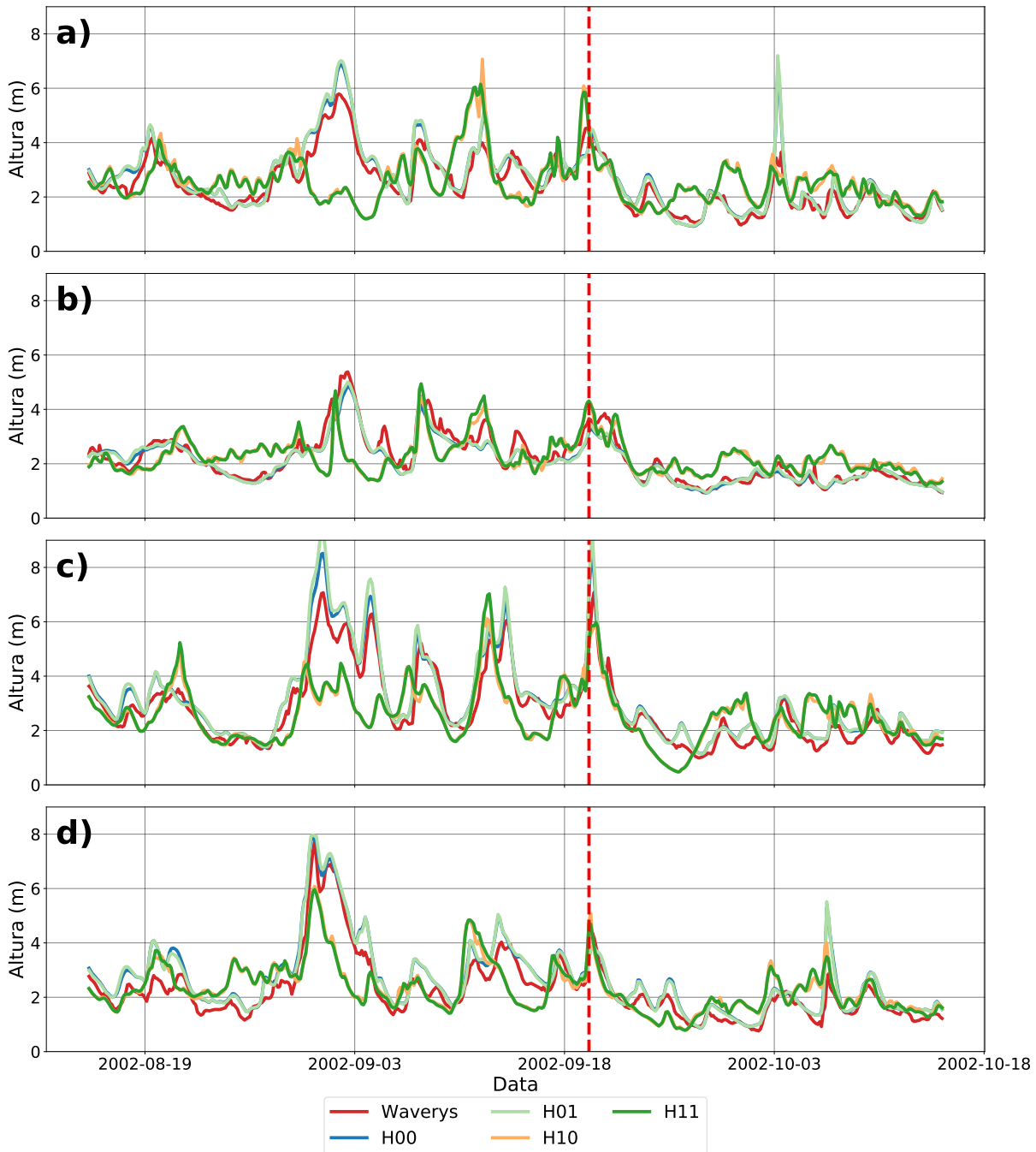


Figura 5.20: Série temporal da altura de onda (m) comparativa entre o modelo WEVERYS (vermelho), simulação H_{00} (azul), H_{01} (verde claro), H_{10} (laranja) e H_{11} (verde) no período do evento 10. (a) Ponto da Boia Rio Grande ; (b) Ponto da Boia Itajaí ; (c) Ponto *Offshore* e (d) Ponto *Offshore Montevideo*. A linha tracejada vermelha corresponde ao horário de ocorrência do evento (Tabela 4.2).

O evento 10 se diferencia do evento analisado anteriormente, com extremos de onda na porção quente do ciclone. As simulações mostraram que os valores extremos ocorram ao longo do ramo frio do sistema frontal, na região de convergência de ventos (de N/NO). Sinoticamente, houve migração do AAS em direção à costa do Brasil, reforçando o vento de noroeste ao longo da frente fria na parte quente do ciclone. A fusão do AAS com um pequeno anticiclone transiente resulta na formação de uma grande pista com ventos intensos.

Ao comparar o posicionamento do ciclone entre as simulações H_{10} e H_{00} , observa-se que ambas conseguiram representar o ciclone em termos de localização. Entretanto, a simulação regional com vento corrigido mostrou ventos mais intensos do quadrante N/NO (Figura 5.22b). Em relação à altura significativa de onda, ambas as simulações evidenciaram que os maiores valores de H_s ocorreram no eixo da convergência de ventos da frente fria e também ao longo da porção quente, Figura 5.21a e Figura 5.21d.

Examinando os mapas de altura geopotencial em 500hPa, verifica-se uma boa correspondência entre as simulações. Ambas apresentam um mínimo de geopotencial fechado em 60°S e 55°O (Figura 5.21b e Figura 5.21e), além de uma crista alongada que se estende desde o sudeste brasileiro até a extremidade sudeste da grade. As duas simulações concordam com um centro de baixa pressão de 998 hPa, embora estejam deslocados entre si. Na simulação H_{00} (Figura 5.21c), o centro está localizado em 45°O e 45°S , enquanto na H_{10} , encontra-se em 40°O e 50°S (Figura 5.21f).

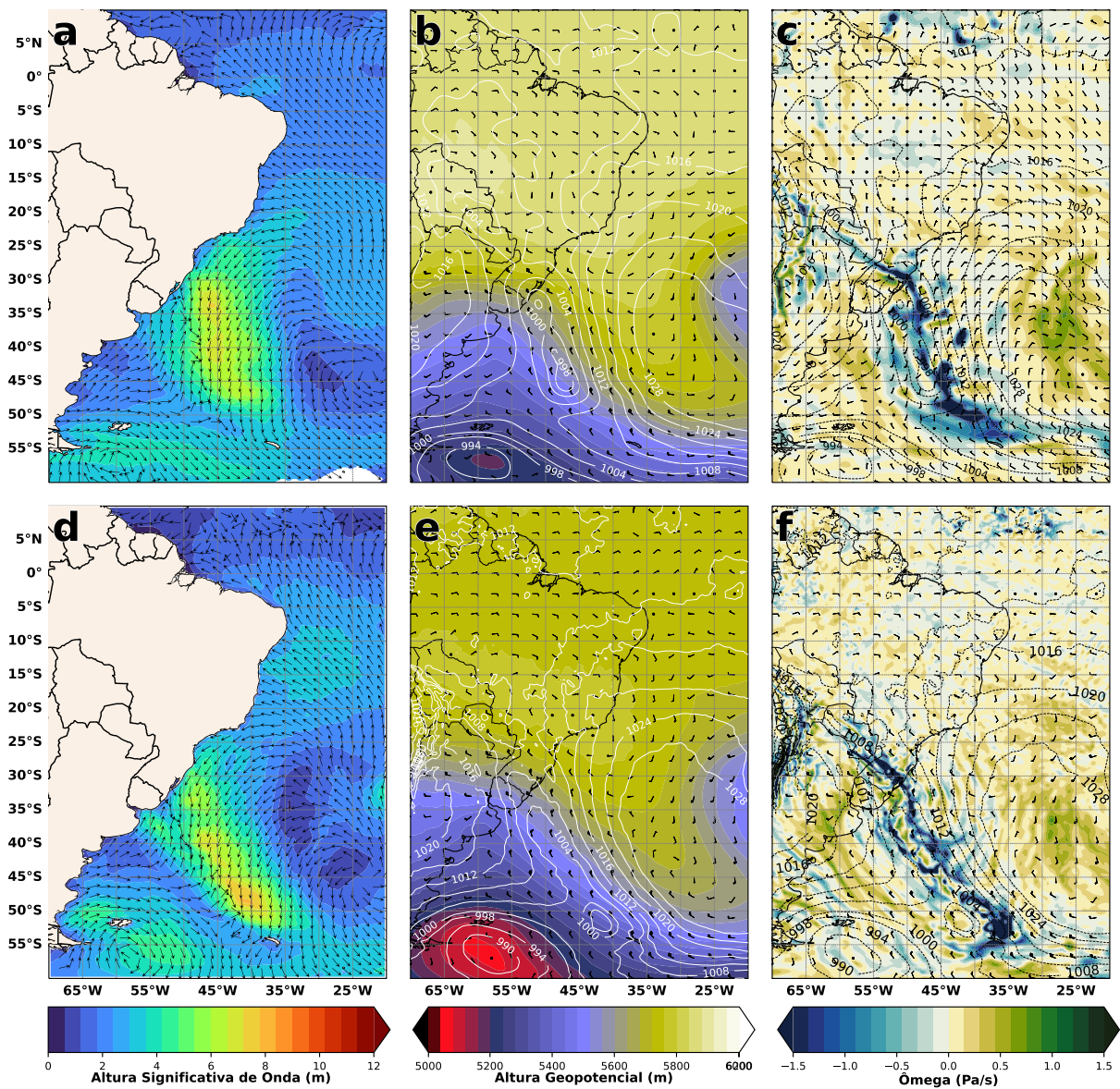


Figura 5.21: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

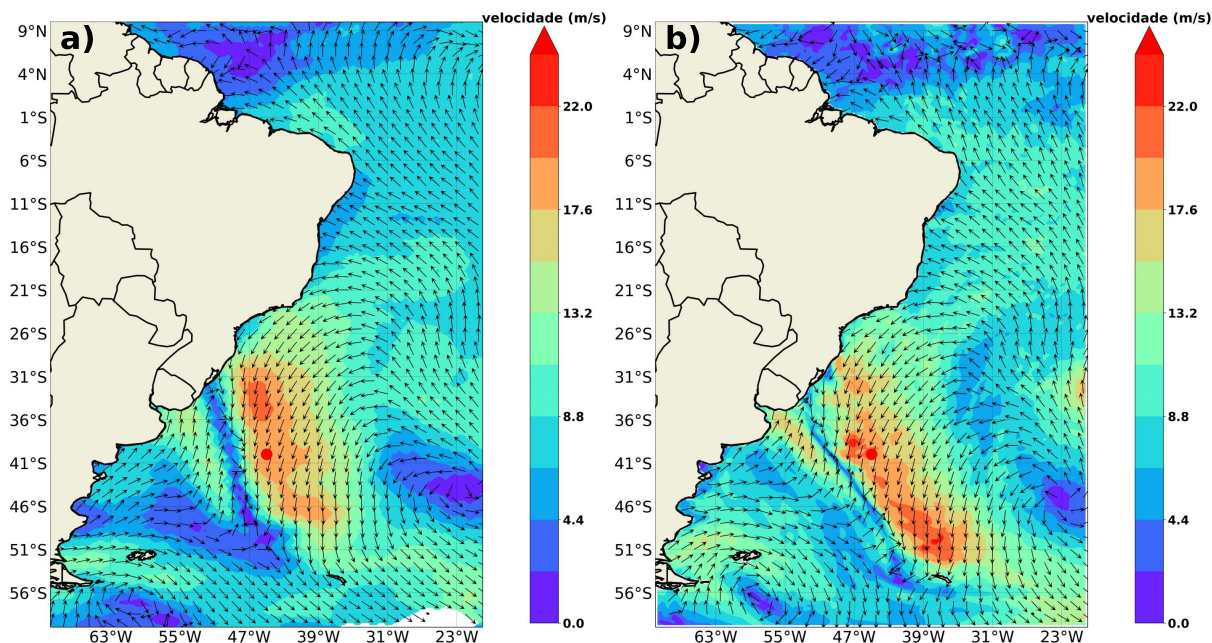


Figura 5.22: Velocidade do vento (m/s) e vetores de direção a 10 metros para 19/09/2002 às 18 UTC: (a) para a simulação H_{00} e (b) para a simulação H_{10} . O ponto vermelho representa o centro do ciclone segundo Gramscianinov et al. (2020).

O efeito da regionalização (Figura 5.23b) reduziu os valores de H_s em cerca de -2 metros na frente da frente fria, na porção mais próxima à costa. No entanto, intensificou os valores de H_s no final da frente fria, na porção sudeste da confluência de ventos (com valores acima de 3 metros). A correção do vento, mostrada na Figura 5.23c, indica um aumento nos valores de H_s ao longo da confluência de ventos da frente, principalmente onde está localizado o centro do ciclone (ponto vermelho), com valores próximos a 1 metro. Em relação ao termo S de interação não linear (Figura 5.19d), a influência não apresentou um padrão definido, mostrando variações tanto positivas quanto negativas nos valores simulados de H_s . Mais uma vez, observa-se que a magnitude da influência da regionalização é superior em relação à correção do vento e ao termo de interação não linear.

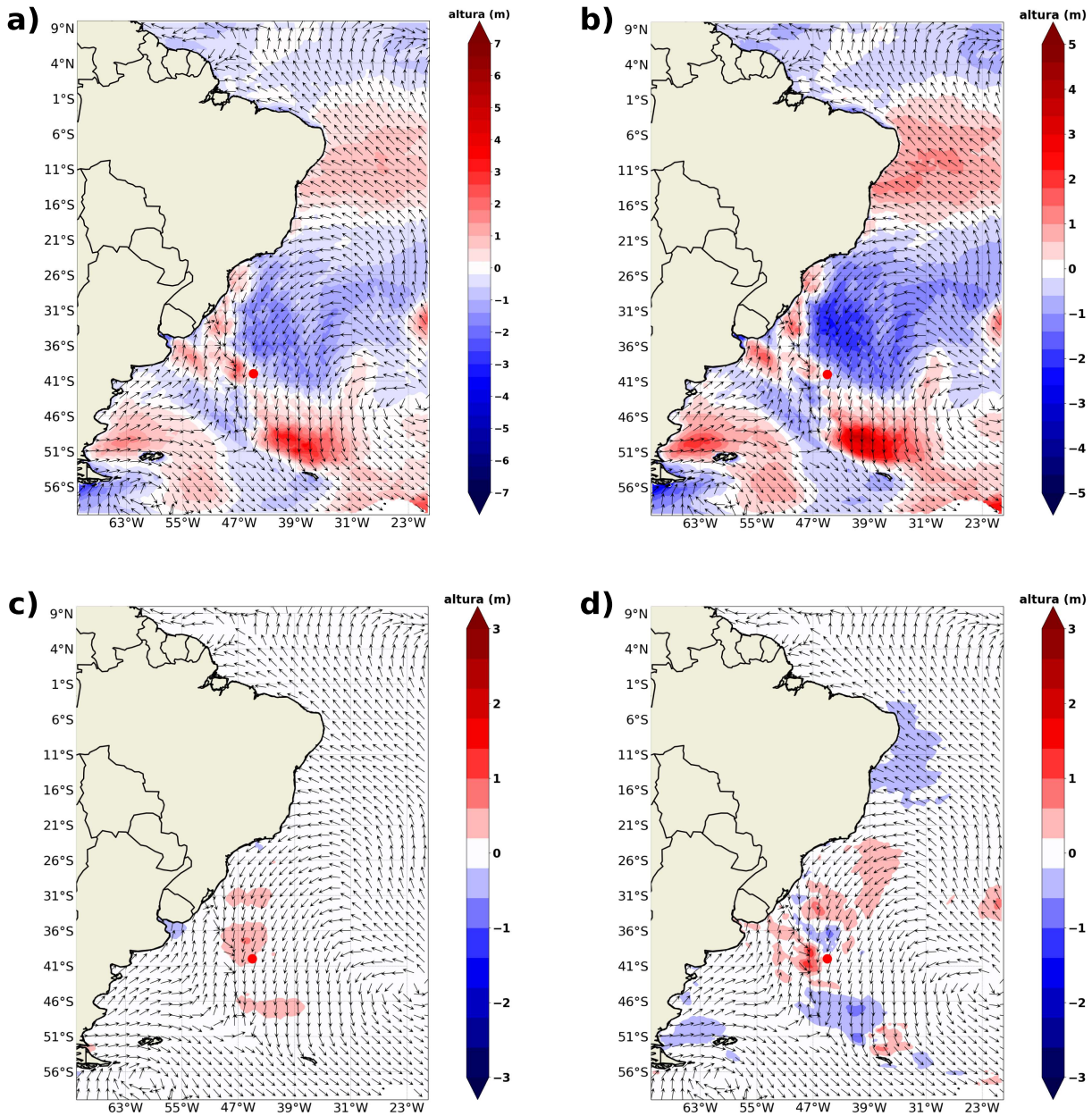


Figura 5.23: Mudança simulada na altura significativa de onda no dia 19/09/2002 às 18 UTC. (a) diferença entre H_{11} e H_{00} . (b) efeito devido a regionalização (ΔH_1), (c) a correção do vento (ΔH_2) e (d) a interação não-linear entre os fatores (ΔS); calculadas pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3. Os vetores de vento são referentes a simulação H_{00} .

5.4 Análise dos 10 ciclones mais intensos por setor

Uma categorização dos ciclones foi realizada a partir da identificação do setor do ciclone onde ocorreu o vento mais intenso ao longo de todo o seu ciclo de vida, conforme detalhado no Capítulo 4.

A partir da análise das trajetórias dos dez ciclones mais intensos em cada setor, con-

forme ilustrado na Figura 5.24, observa-se a seguinte distribuição:

- No setor 1, quatro ciclones mais intensos originaram-se na região da LA PLATA, um na ARG e cinco em regiões fora das áreas de ciclogênese pré-definidas;
- No setor 2, seis ciclones mais intensos surgiram na região da LA PLATA, três no SE-BR e dois na ARG;
- No setor 3, seis ciclones mais intensos tiveram origem na região da LA PLATA, três na ARG e um SE-BR;
- No setor 4, a maioria dos ciclones mais intensos teve origem na região da LA PLATA (4 casos), seguida pela região SE-BR (1 caso) e ARG (5 casos).

Esses resultados estão em concordância com estudos anteriores, os quais indicaram que, apesar da região ciclogênica da ARG ser mais ativa ao longo de todo o ano, a região da LA PLATA, que possui maior atividade durante o inverno, tende a gerar ciclones mais intensos [Hoskins e Hodges (2005); Gramscianinov et al. (2019, 2020)].

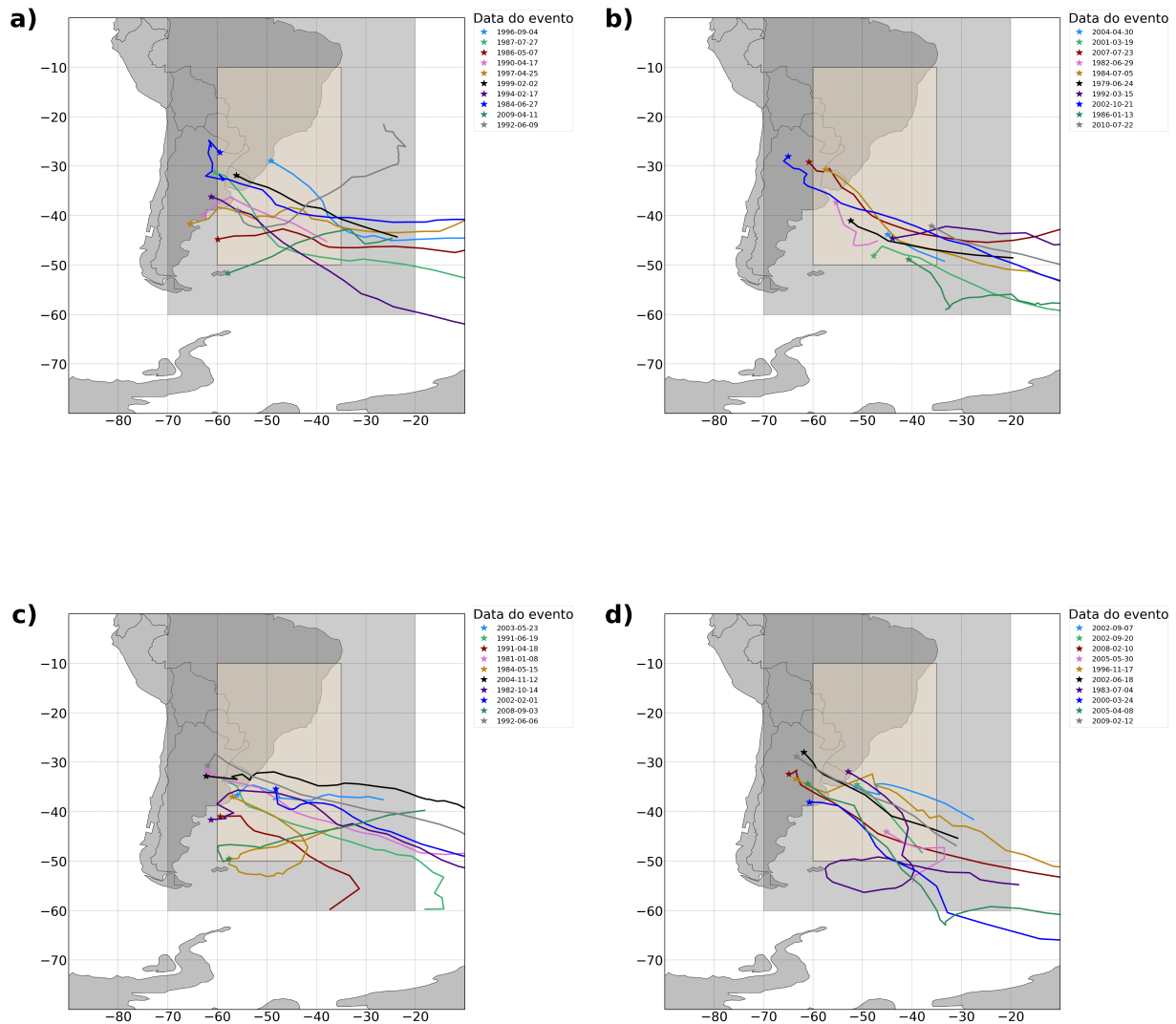


Figura 5.24: Trajetórias dos 10 ciclones com maior intensidade do vento ocorrendo: (a) no setor 4, (b) no setor 1, (c) no setor 3 e (d) no setor 2 do ciclone, seguindo a orientação definida na Figura 4.2

Nesta subseção, é realizada a avaliação sinótica dos eventos, seguindo a estrutura de mapas discutida no Capítulo 4. De acordo com a classificação do ciclone baseada no setor de vento mais intenso, optou-se por analisar dois eventos representativos para cada setor. As designações de "bom" ou "ruim" empregadas nas subseções refletem uma avaliação subjetiva da concordância entre as duas simulações.

Para cada setor, o primeiro evento a ser discutido foi aquele que ficou definido como "bom", caracterizado pela correspondência entre ambas as simulações. Em seguida, é analisado o evento rotulado como "ruim", marcado pela falta de concordância clara entre as simulações.

5.4.1 Setor 1

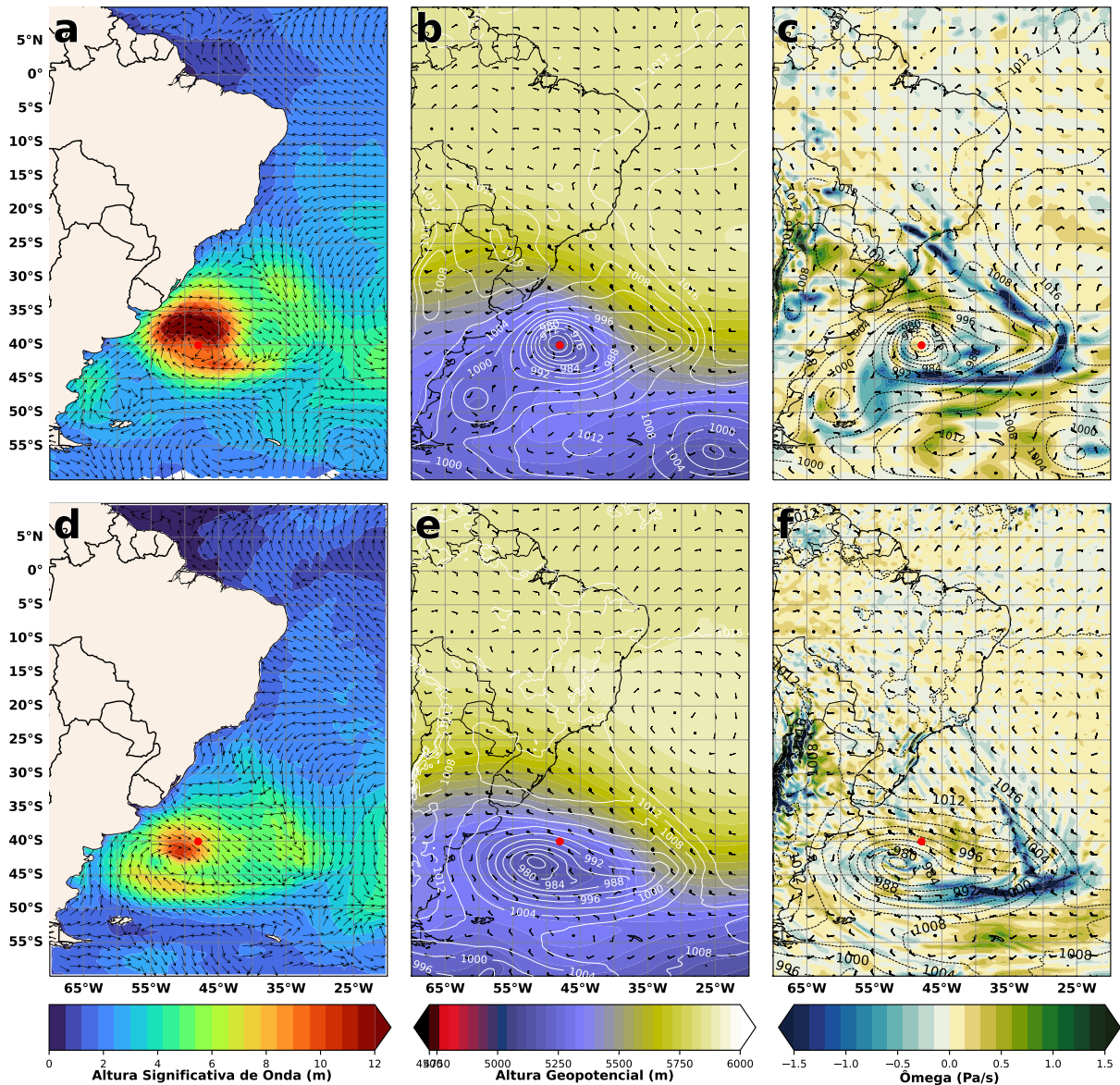


Figura 5.25: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

Na Figura [5.25a](#), é possível observar um núcleo de Hs ao redor do centro do ciclone (40° S, 48° O), abrangendo uma área maior na parte norte do centro do ciclone. Os valores de Hs superiores a 9 metros estão restritos às latitudes entre 32° S e 42° S e longitudes entre 44° O e 55° O, com uma diminuição na altura à medida que se distancia do centro. No mesmo campo, nota-se o padrão de vento ciclônico em torno do centro do ciclone e uma pista de ventos de sudoeste, possivelmente responsável pelas ondas mais altas na região norte do ciclone. Adicionalmente, o vento sudoeste se curva, convergindo com o vento

nordeste, em torno de 27° S. Em relação ao mapa de altura geopotencial (Figura 5.25b), destaca-se um centro fechado de altura geopotencial muito próximo ao local identificado como centro do ciclone, evidenciando o ajuste dinâmico do ciclone desde a superfície até as camadas superiores. O vento permanece ciclônico em 500 hPa, contornando o centro de menor altura geopotencial. Na Figura 5.25c, o centro de baixa pressão associado ao ciclone é ressaltado pela isóbara de 968 hPa, aproximadamente em 40° S e 47° O. A velocidade vertical é negativa (indicando movimento ascendente) nas regiões próximas à confluência dos ventos observada na superfície.

Já na simulação H_{10} , ilustrada na Figura 5.25d, os valores de Hs superiores a 9 metros são apresentados em uma pequena região a sudoeste do centro do ciclone (40° S, 48° O). A curvatura ciclônica, que na simulação H_{00} contorna o centro do ciclone, também está deslocado para sudoeste. A dinâmica do vento na parte norte do ciclone é diferente, mas a confluência dos ventos em 27° S parece ter sido representada, embora, nesta simulação, a confluência se estenda até latitudes mais altas. Posteriormente, na Figura 5.25e, destaca-se o centro de baixa altura geopotencial com menor gradiente ao seu redor e vento intensificado. Além disso, esse centro de baixa está deslocado mais ao sul em comparação à simulação H_{00} . Por fim, ao analisar o campo de pressão reduzida ao nível do mar na Figura 5.25f, é possível identificar um centro de baixa pressão definido pela isóbara de 978 hPa. As velocidades verticais negativas não acompanham toda a região da confluência dos ventos na superfície, como na primeira simulação.

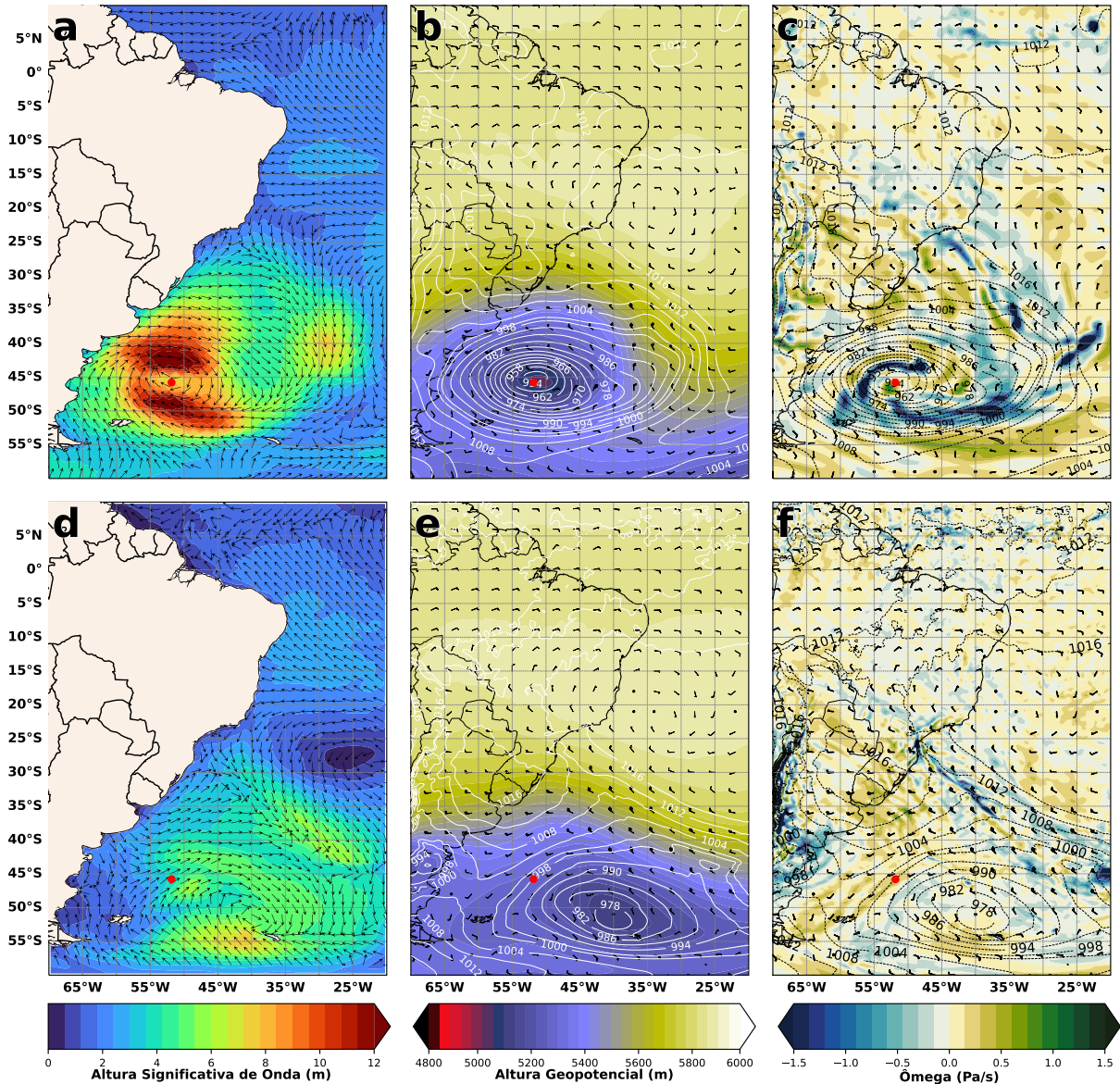


Figura 5.26: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial, pressão reduzida ao nível médio do mar e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

Na Figura 5.26a, observa-se um amplo núcleo de Hs ao redor do centro do ciclone (46° S, 51° O), englobando áreas tanto ao norte quanto ao sul do centro do ciclone. Valores de Hs superiores a 9,5 metros circundam o centro do ciclone, abrangendo uma vasta área entre 40° S e 50° S, indicando um evento de grande magnitude. No mesmo campo, o padrão de curvatura ciclônica ao redor do centro do ciclone é evidente, com correntes de vento oeste na parte norte e leste na parte sul. Adicionalmente, pode-se observar a confluência dos ventos em superfície ocorrendo em 26° S (próximo à costa do Rio de

Janeiro) e se estendendo até 41° S, onde há uma região com 7 metros de Hs. Em relação ao mapa de altura geopotencial (Figura 5.26b), um centro fechado de altura geopotencial muito próximo ao local identificado como centro do ciclone ressalta o ajuste dinâmico do ciclone desde a superfície até médios níveis. O vento ciclônico em 500 hPa contorna o centro de menor altura geopotencial, que possui um valor de 5078 metros. Na Figura 5.26c, o centro de baixa pressão associado ao ciclone é destacado pela isóbara de 954 hPa, aproximadamente em 46° S e 51° O. A velocidade vertical negativa (indicando movimento ascendente) é observada nas regiões próximas ao centro do ciclone em superfície.

Por outro lado, na simulação H_{10} , representada na Figura 5.26d, os valores de Hs superiores a 9 metros não são simulados. Identifica-se apenas uma região de giro ciclônico e valores de Hs em torno de 6 metros próximo a 51° S e 41° O, bastante distante do ponto vermelho, que indica o centro do ciclone conforme o rastreamento utilizado. Uma região de confluência de ventos é simulada próxima à área presente na simulação H_{00} , entretanto, deslocada para o sul, alcançando a costa de Santa Catarina. Na Figura 5.26e, o centro de baixa altura geopotencial com valor de 5138 metros é destacado e encontra-se deslocado em relação à simulação anterior. Por fim, ao analisar o campo de pressão reduzida ao nível do mar Figura 5.26f, identifica-se um centro de baixa pressão definido pela isóbara de 978 hPa, bem menos intenso que na simulação H_{00} , e não há valores de velocidade vertical indicando movimento ascendente nas proximidades do ciclone em superfície, como pode ser observado na Figura 5.26f.”

5.4.2 Setor 2

Na Figura 5.27, observa-se um evento semelhante ao descrito na seleção de eventos extremos estudados por Gramscianinov et al. (2020), na sessão 5.1.3. Este evento apresenta ondas extremas no lado quente do ciclone, com uma linha de convergência de ventos alongada no sentido N-S. Embora não haja mapas de advecção, é possível supor que exista uma forte advecção quente e que esse fluxo dentro do ciclone esteja associado à esteira transportadora quente, responsável pelo transporte de calor e umidade e pela sustentação da intensificação do sistema. Em relação ao mapa de altura geopotencial (Figura 5.27b), destaca-se um centro fechado, porém bastante extenso, de altura geopotencial abrangendo toda a área entre 57° O e 40° O. O centro de altura geopotencial em 500 hPa, deslocado em relação ao centro do ciclone em superfície, sinaliza a presença de uma estrutura baroclínica.

Este mesmo comportamento pode ser observado também na Figura 5.27d, que representa a simulação H_{10} , demonstrando que o modelo regional identificou esse evento, inclusive com um centro de altura geopotencial menor do que a simulação H_{00} (5249 metros e 5189 metros, respectivamente). Na Figura 5.27f, é possível observar movimento ascendente ao longo de toda a confluência de ventos em superfície, descrita anteriormente como uma convergência alongada no sentido N-S, ocorrendo em ambas as simulações H_{10} e H_{00} .

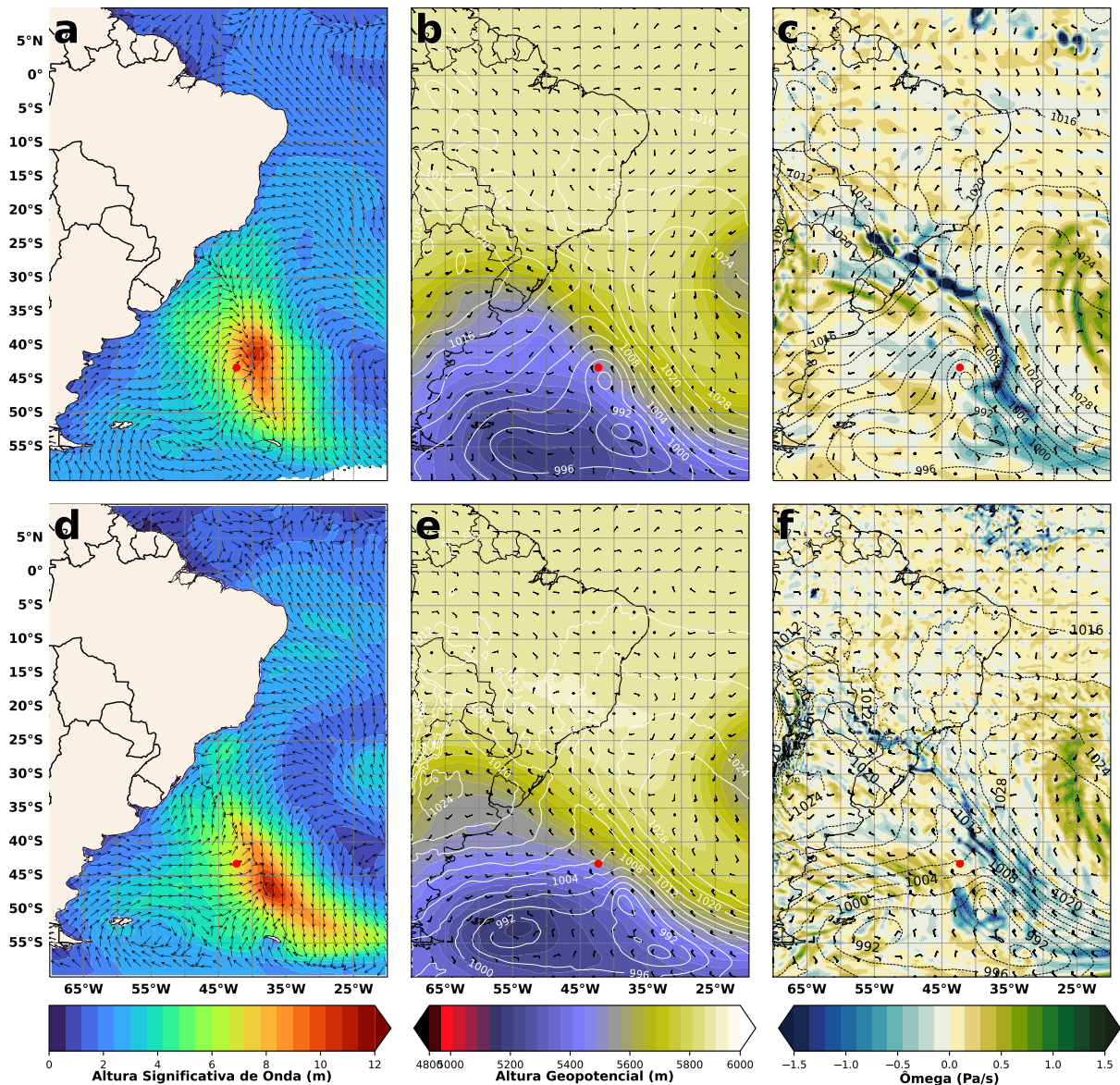


Figura 5.27: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

Na Figura 5.28, nota-se um resultado distinto na comparação entre as simulações. O modelo H_{00} simulou um ciclone com centro em 46°S e 50°O e uma pista de ventos do norte,

localizada a leste do centro do ciclone, onde são encontrados os valores mais intensos (cerca de 8 metros) de H_s (Figura 5.28a). Essa mesma simulação apresenta, na Figura 5.28b, um vórtice de 5342 metros de altura geopotencial na mesma posição onde se localiza o centro do ciclone em superfície, identificado pelo ponto vermelho no mapa. A Figura 5.28c corrobora com esse resultado, visto que há um centro de 976 hPa no mesmo local, com valores de velocidade vertical negativos, indicando movimento ascendente ao longo do eixo do cavado que se estende desde o centro do ciclone até 35°S de latitude, justamente onde ocorre a pista de vento em superfície responsável pelo valor extremo de onda.

Na Figura 5.28d, diferentemente da simulação H_{00} (Figura 5.28a), onde existe um movimento ciclônico com valores altos de H_s , nesta simulação não é reproduzido nenhum padrão semelhante. Embora haja uma estrutura de vórtice fechado em 500 hPa com núcleo de 5222 metros (Figura 5.28e), não é apresentada nenhuma configuração correspondente em superfície, exceto por um centro de baixa pressão de 986 hPa, que, no entanto, está localizado bem ao sul do evento simulado por H_{00} .

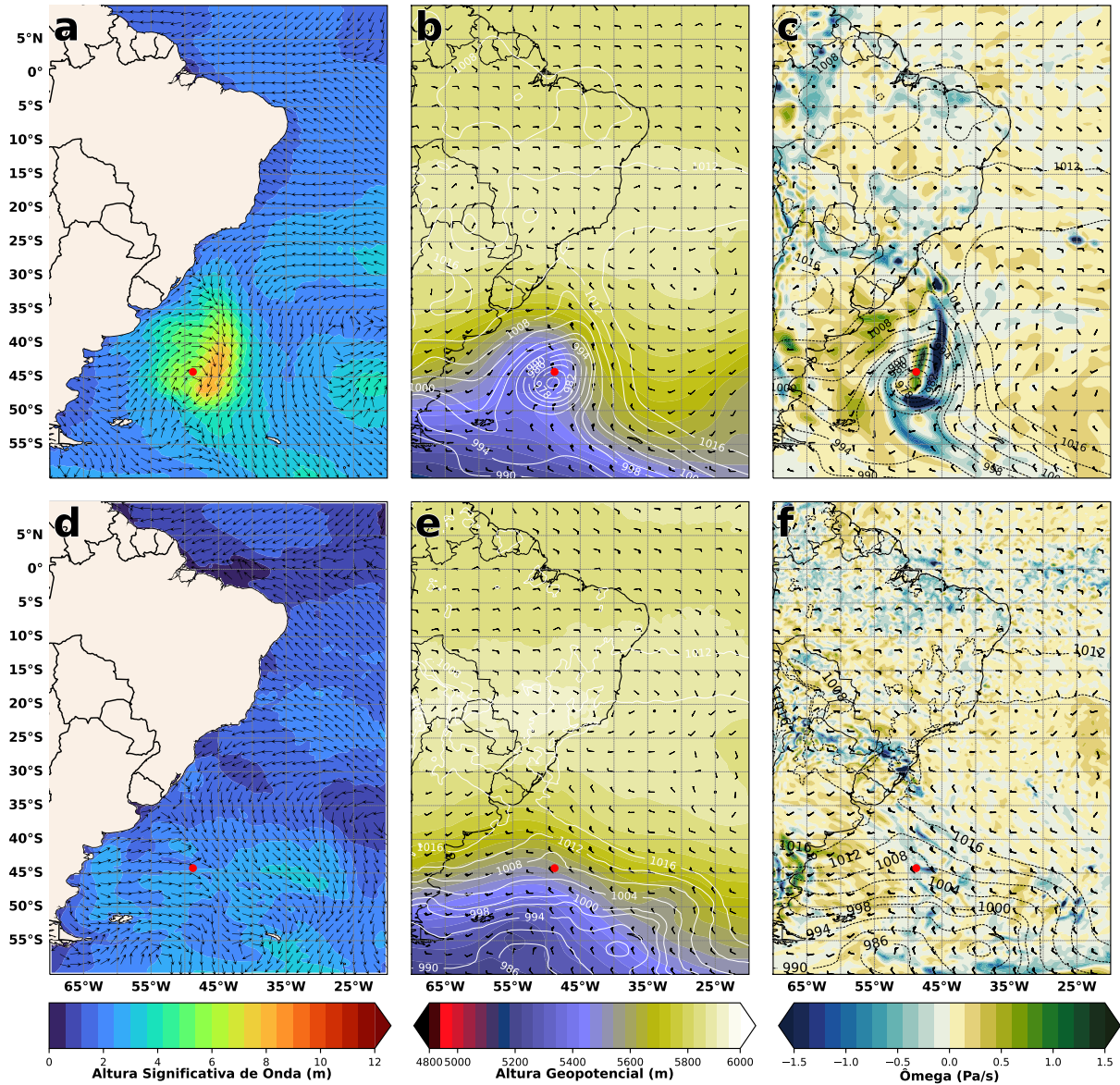


Figura 5.28: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

5.4.3 Setor 3

Na Figura 5.29a, é possível observar uma pista de vento ao sul do núcleo do ciclone (36°S e 47°O) com valores de H_s superiores a 9 metros. Os valores intensos de altura significativa estão restritos ao quadrante sul do ciclone, que possui um anticiclone associado logo abaixo dele (51°S e 46°O). Essa mesma circulação anticiclônica gera uma pista extensa na porção sudeste da grade de simulação, com um núcleo de H_s bastante intenso em 46°S e 21°O . Em relação ao mapa de altura geopotencial (Figura 5.29b), destaca-se um centro fechado de

altura geopotencial no leste da Argentina e sul do Uruguai, embora não seja um vórtice tão intenso quanto os ciclones discutidos anteriormente. A curvatura permanece ciclônica em 500 hPa, contornando o centro de menor altura geopotencial. Na Figura 5.25c, o centro de baixa pressão associado ao ciclone é ressaltado pela isóbara de 990 hPa. A velocidade vertical é negativa (indicando movimento ascendente) na porção sul e sudeste do centro do ciclone e também na região onde ocorre a confluência dos ventos na superfície.

Na simulação H_{10} , representada na Figura 5.29d, pouca diferença é observada, demonstrando boa correspondência entre as simulações global e regional na representação deste evento. O mesmo ciclone é apresentado, com a faixa de ventos ao sul do centro e valores de Hs acima de 9 metros nessa região. Entretanto, ele aparece deslocado a sudoeste em relação ao simulado por H_{00} . O núcleo está bem próximo à costa da Argentina em 40°S e 56°O . Na Figura 5.29e, o vórtice de geopotencial com valores mais baixos é apresentado na mesma posição do simulado por H_{00} . A Figura 5.29f reforça que o centro deste ciclone está deslocado em relação à simulação global e com menor intensidade, com valores de 1004 hPa no centro da circulação ciclônica, porém, mantendo o sinal de movimento vertical ascendente no quadrante sul e sudeste.

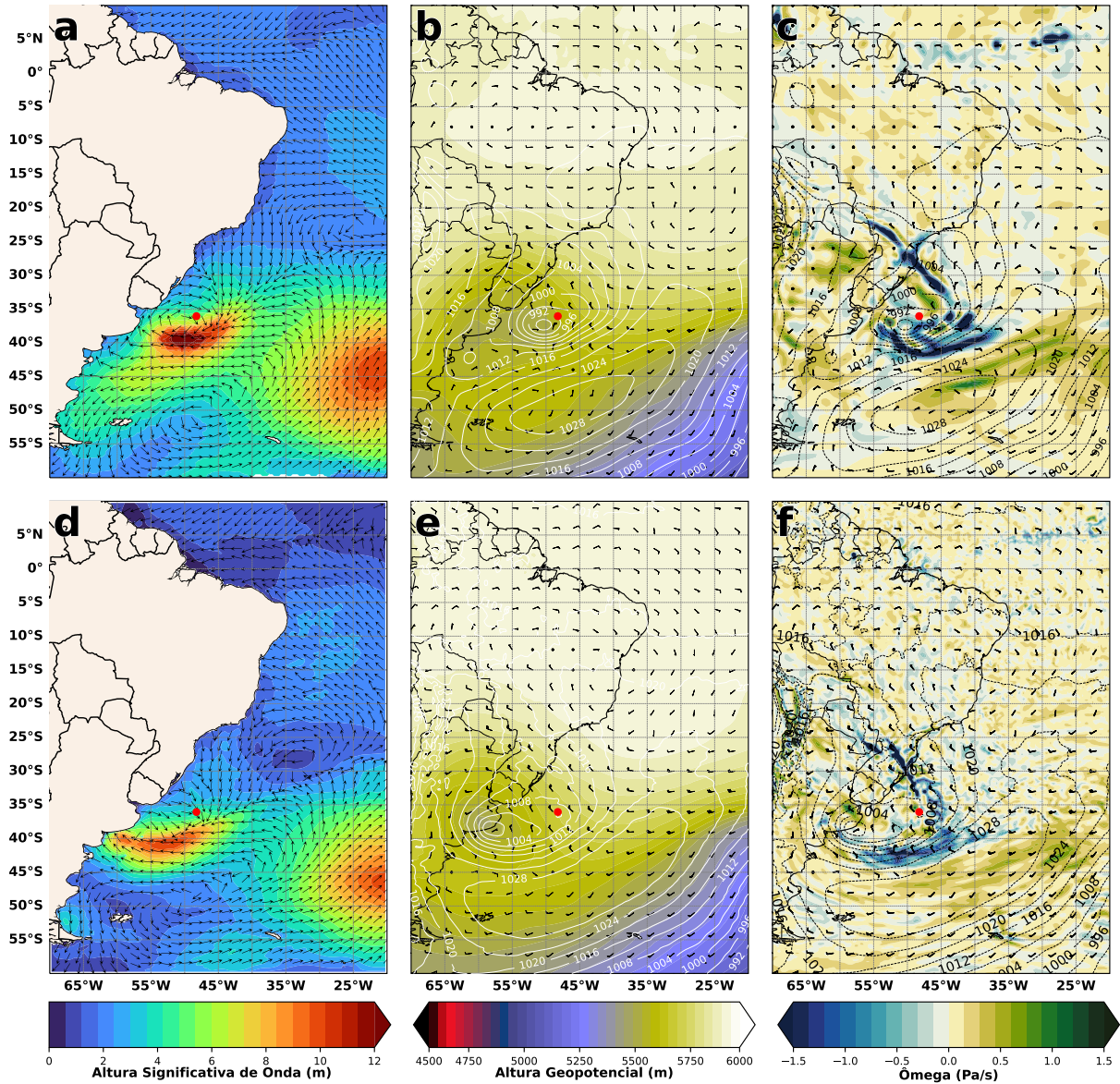


Figura 5.29: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

Na Figura 5.30a pode-se observar que o modelo H_{00} simulou um ciclone com centro em 41°S e 38°O , localizado mais distante da costa do que os eventos analisados anteriormente. É possível observar que ao longo de todo o quadrante sudoeste e noroeste do ciclone, valores intensos de H_s são simulados, variando entre 7 e 9,5 metros. A região mais intensa encontra-se no setor sudoeste, corroborando com a categoria definida como setor 3. Essa mesma simulação apresenta, na Figura 5.30b, um vórtice de 5267 metros de altura geopotencial na mesma posição onde se localiza o centro do ciclone em superfície, identificado pelo ponto vermelho no mapa. A Figura 5.30c corrobora com esse resultado, visto que há um

centro de 970 hPa no mesmo local, com valores de velocidade vertical negativos, indicando movimento ascendente ao longo do eixo do cavado que se estende desde o centro do ciclone até 25°S de latitude e também na porção sul do ciclone, onde está localizado a pista de vento que contribuiu para os maiores valores de Hs.

Na Figura 5.30d, diferentemente da simulação H_{00} (Figura 5.30a), onde existe um movimento ciclônico com valores altos de Hs, nesta simulação não é reproduzido nenhum padrão semelhante. Embora haja uma estrutura de vórtice fechado em 500 hPa com núcleo de 5327 metros (Figura 5.30e), não é apresentada nenhuma configuração correspondente em superfície.

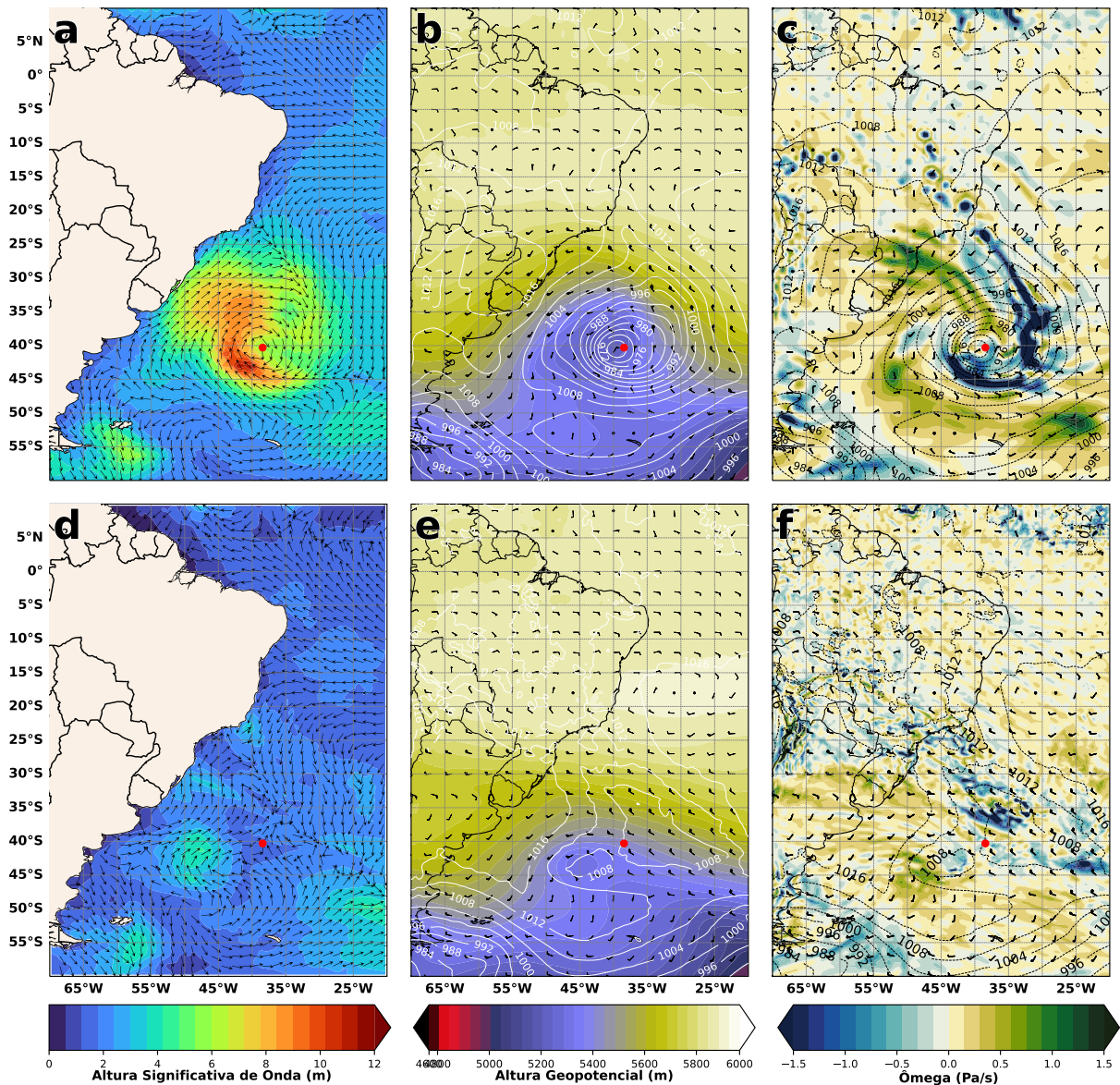


Figura 5.30: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

5.4.4 Setor 4

Na Figura 5.31a, é possível observar uma pista de vento de sudoeste a noroeste do núcleo do ciclone (46°S e 38°O) com valores de H_s superiores a 9,5 metros. Diferente dos eventos descritos no setor 3, os valores mais intensos de altura significativa não estão restritos a um quadrante do ciclone. Em relação ao mapa de altura geopotencial (Figura 5.31b), destaca-se dois centros fechados de altura geopotencial onde o vórtice localizado em 46°S e 37°O é o relativo ao evento analisado em superfície. Na Figura 5.25c, o centro

de baixa pressão associado ao ciclone é ressaltado pela isóbara de 968 hPa. A velocidade vertical é negativa (indicando movimento ascendente) na porção leste/sudeste e a oeste do centro do ciclone.

Na simulação H_{10} , representada na Figura 5.31d, é possível observar uma correspondência entre as simulações global e regional na representação deste evento. O mesmo ciclone é apresentado, mas, deslocado a oeste do centro do ciclone simulado por H_{00} e com destaque para os valores de altura significativa de onda mais intensas apenas na porção noroeste do centro do ciclone, que nesta simulação, encontra-se em 46°S e 46°O. Na Figura 5.31e, destaca-se pela presença dos dois vórtices de altura geopotencial valores mais baixos, bem similar a simulação na Figura 5.31b. A Figura 5.31f reforça que o centro deste ciclone está deslocado em relação à simulação global, com valores de 978 hPa no centro da circulação ciclônica, porém, mantendo o sinal de movimento vertical ascendente a leste e sudoeste do centro do ciclone.

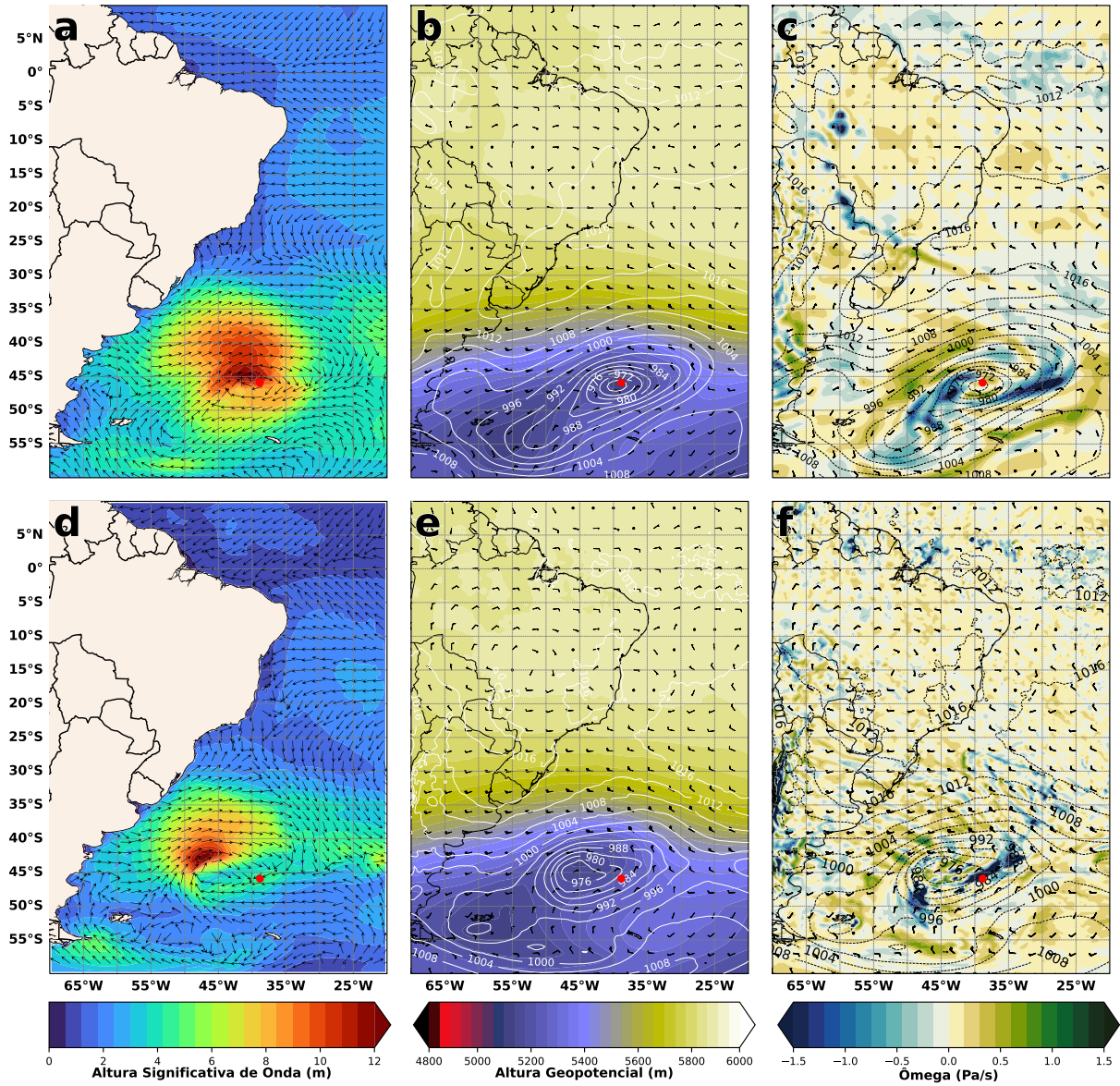


Figura 5.31: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

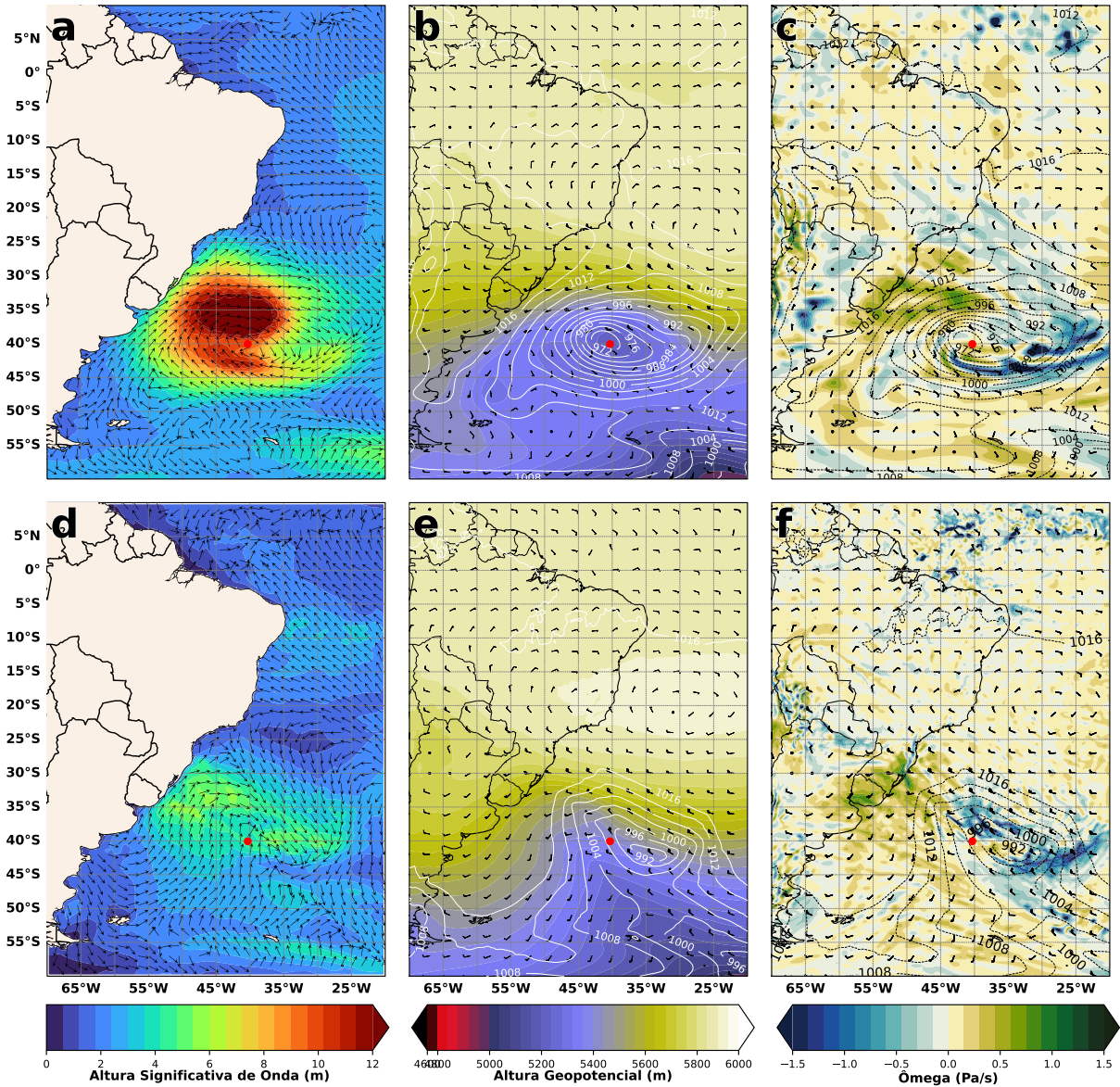


Figura 5.32: Comparação entre simulações H_{00} (a-c) e H_{10} (d-f). (a, d) Altura significativa de onda (m) e vetores de vento a 10 m; (b, e) altura geopotencial e vento em 500 hPa (barbela); (c, f) pressão reduzida ao nível médio do mar, vento a 10 m (barbela) e velocidade vertical em 500 hPa.

Na Figura 5.32a podemos observar que o modelo H_{00} simulou até então, o ciclone mais intenso em termos de altura de onda, com valores de H_s acima de 9,6 metros em quase todos os quadrantes, com centro em com centro em 41°S e 41°O . Essa mesma simulação apresenta, na Figura 5.32b, um vórtice de 5260 metros de altura geopotencial na mesma posição onde se localiza o centro do ciclone em superfície. A Figura 5.32c corrobora com esse resultado, visto que há um centro de 972 hPa no mesmo local, com valores de velocidade vertical negativos, indicando movimento ascendente ao longo do eixo do cavado que se estende desde o centro do ciclone até a borda direita do mapa, para leste, em 21°O .

Na Figura 5.32d, observamos que diferente da simulação H_{00} (Figura 5.32a), existe um giro ciclônico mas com valores menos intensos de Hs na mesma região. Em 500 hPa não há a estrutura simulada no modelo global, apenas um cavado inclinado a noroeste que se estende o sudoeste da grade até 36°S (Figura 5.32e). Em superfície, é possível observar um centro de baixa pressão de 990 hPa.

O principal argumento a favor da utilização de modelos regionais reside na suposição de que eles fornecem uma melhor representação de eventos mais energéticos. Entretanto, isso pode não se verificar em todas as situações, como mostrado nos resultados acima, especialmente em simulações climáticas.

Essa observação está em sintonia com os achados da próxima seção, que sugerem que a regionalização de um modelo global para obter resoluções mais elevadas não necessariamente resulta em um aumento na energia de sistemas extremos. Ou seja, uma grade mais refinada não garante automaticamente uma representação mais precisa dos eventos intensos.

5.4.5 Composições

Foram realizadas composições para analisar o efeito da correção do vento (Figura 5.33) e da regionalização (Figura 5.34), selecionando os 10 eventos mais intensos para cada categoria de ciclone, com base no setor onde ocorre o vento mais intenso. Em seguida, calculou-se a média desses eventos, centrada no ciclone, a fim de obter a composição. Essa abordagem permite avaliar o impacto dos fatores estudados neste trabalho, tanto no aumento quanto na redução da intensidade de Hs.

Iniciando a análise pelo setor 1 (Figura 5.33b), observa-se um efeito positivo na altura significativa das ondas neste setor; ou seja, a correção do vento promoveu um aumento médio de 0,7 metros nos valores de Hs nos ciclones deste setor. Um resultado semelhante foi observado no setor 2 (Figura 5.33c), porém com menor intensidade (aproximadamente 0,5 metros). Vale ressaltar que, para ambas as categorias de ciclones, o aumento de Hs ocorre majoritariamente no setor do ciclone onde há advecção quente, mas também é observado no lado oposto do ciclone, onde ocorre advecção fria.

Em relação aos eventos do setor 3 (Figura 5.33d), o aumento de Hs ficou na intersecção da divisão entre os ciclones dos setores 2 e 3, apresentando valores positivos de aproximadamente 0,5 metros. É comum haver uma disparidade entre a localização do vento máximo

e da onda máxima, uma vez que é esperado que o pico da onda ocorra no final da pista, considerando que a onda percorre toda a pista para se desenvolver. Portanto, é comum haver um deslocamento entre o máximo de vento e o máximo de Hs. É provável que alguns ciclones que possuem quase toda a pista de vento dentro do setor 2 apresentem o máximo de vento no final dessa pista, já no limite do setor 3, alterando assim a categoria do ciclone.

No setor 4, o maior aumento de altura foi de 0,8 metros, localizado no setor 4, porém valores positivos de aumento de Hs foram observados em todas as direções em relação ao centro do ciclone (Figura 5.33a).

É importante ressaltar que, ao categorizar os ciclones de acordo com a posição onde ocorre o máximo da velocidade do vento, há muita variação na posição da pista relativa ao centro do ciclone. Por exemplo, a Figura 5.33 mostra uma área de aumento de altura das ondas mais abrangente do que os outros casos. Isso provavelmente ocorre porque a análise inclui ciclones em diferentes fases do ciclo de vida, consequentemente com tamanhos variados.

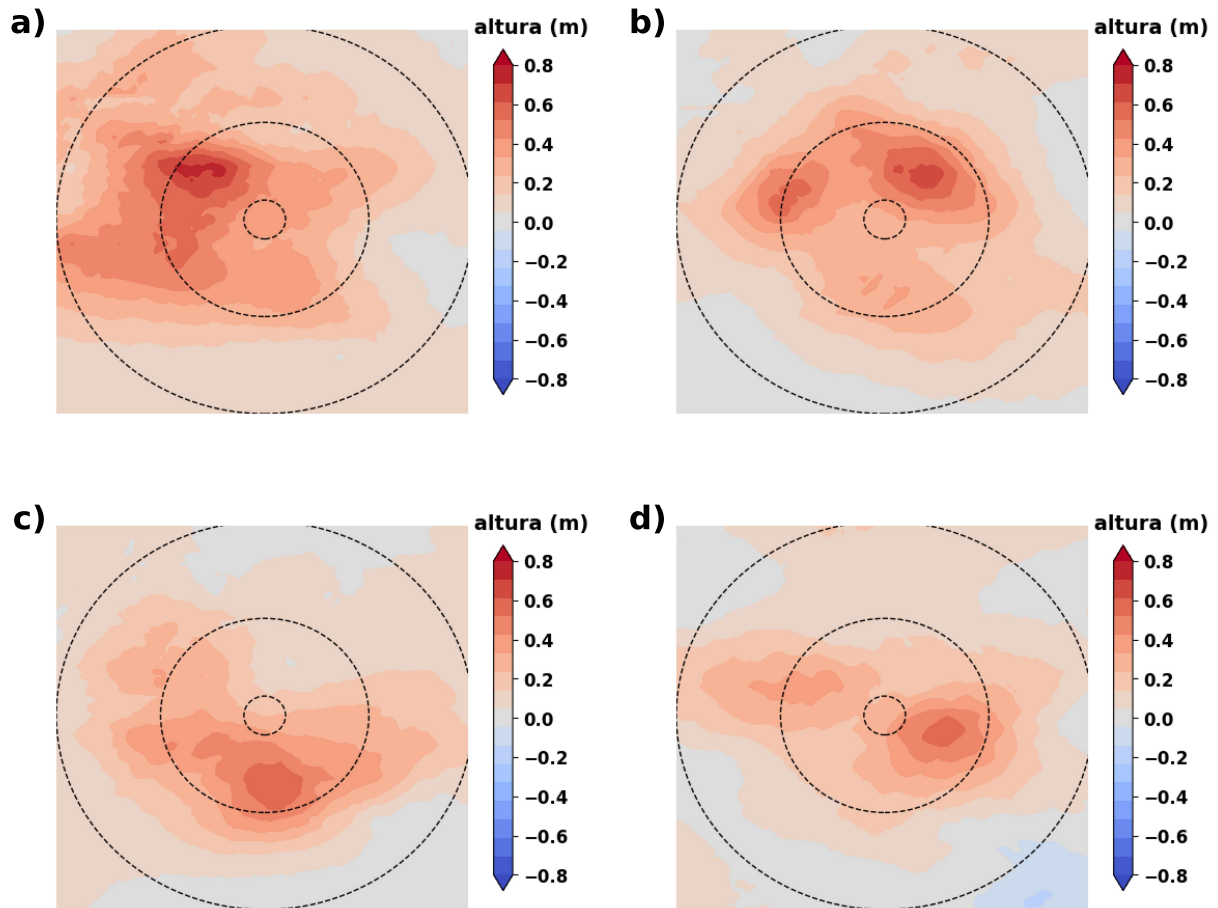


Figura 5.33: Composições dos 10 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da correção do vento nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1° , 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2.

Ao examinar os impactos da regionalização na representação de eventos extremos de ondas (Figura 5.34), observa-se uma diminuição na altura significativa de onda (H_s) em todas as categorias de ciclones, independentemente da localização do vento máximo (setores 1, 2, 3 ou 4).

No setor 1 (Figura 5.34b), a queda de H_s foi mais pronunciada nos setores 4 e 1, sendo especialmente expressiva no setor 1, com valores de até -6 metros. No setor 2, a diminuição nos valores de H_s foi de aproximadamente -4 metros, com ênfase no núcleo máximo situado na intersecção entre os setores 1 e 2, aspecto já abordado previamente.

Os ciclones com vento máximo no setor 3 se sobressaem, uma vez que a redução de H_s resultante da regionalização alcançou -6 metros, concentrada no centro do quadrante que define o setor. No setor 4, o padrão se assemelha àquele observado na análise do efeito da correção do vento (Figura 5.33). Existem valores de maior magnitude concentrados no

centro do setor 4; no entanto, redução nos valores de Hs gerados pela regionalização se estendem por todos os outros setores, embora com menor intensidade.

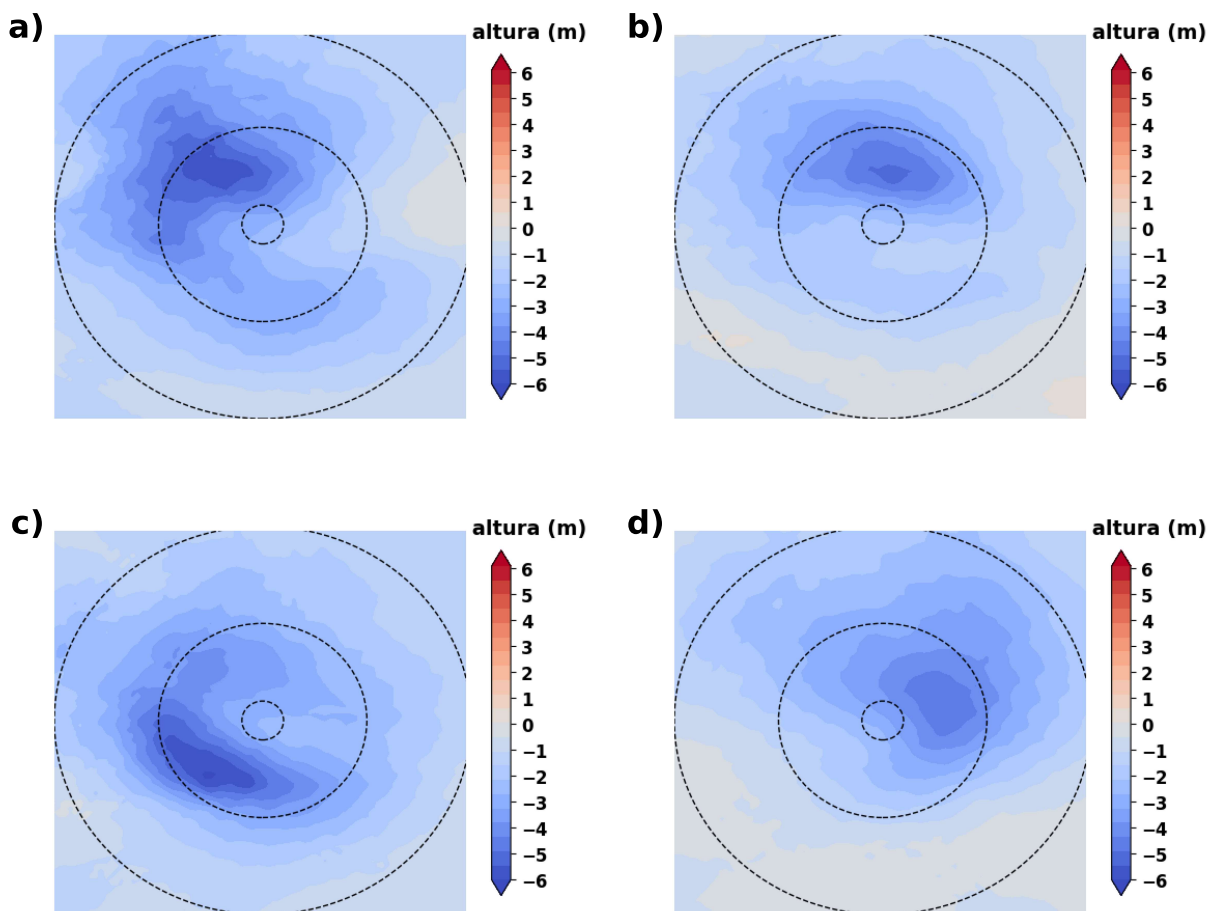


Figura 5.34: Composições dos 10 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da regionalização nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2.

5.5 Análise dos 50 ciclones mais intensos por setor

Com o objetivo de tornar a análise mais robusta, foi realizada uma análise para 50 ciclones. A Figura 5.35 mostra a trajetória dos 50 ciclones mais intensos para cada setor e a Tabela abaixo sumariza os resultados em termos estatísticos da quantidade de ciclones que são originados em cada região ciclogênica, seguindo as definições propostas no trabalho de Gramcianinov et al. (2019).

É possível notar que os resultados para 50 ciclones, corroboram com o que foi apresentado para os 10 mais intensos. A região LA PLATA possui o maior percentual em relação ao total de ciclones, com ARG sendo a segunda e SE-BR a terceira.

Categorias	Setores			
	Setor 1	Setor 2	Setor 3	Setor 4
ARG (%)	20	6	20	30
LA PLATA (%)	22	34	28	28
SE-BR (%)	12	16	10	2
Total de Ciclones	50	50	50	50

Tabela 5.5 - Percentual de ciclones por setor

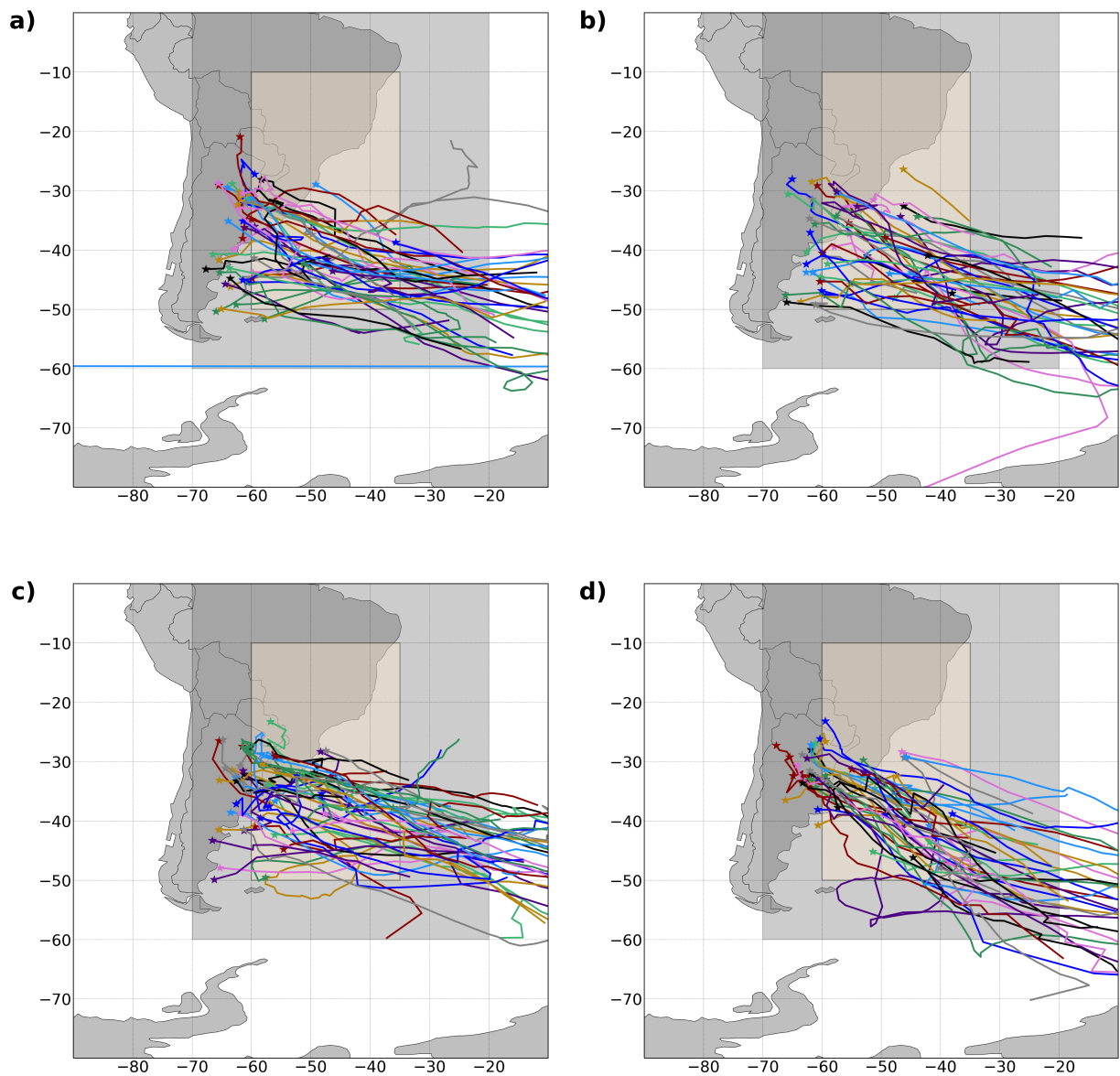


Figura 5.35: Trajetórias dos 50 ciclones com maior intensidade do vento ocorrendo: (a) no setor 4, (b) no setor 1, (c) no setor 3 e (d) no setor 2 do ciclone, seguindo a orientação definida na Figura 4.2

5.5.1 Composições

Podemos observar que, apesar de ter aumentado a amostra nesta análise de composições, a média dos 50 eventos mais intensos é muito próxima do que foi observado na Figura 5.33 e 5.34, com o comportamento esperado de ter valores de aumento ou redução nos valores simulados de Hs menos intensos (vale observar que o intervalo da barra de cores foi ajustado de -0,6 a 0,6) Iniciando a análise pelo setor 1 (Figura 5.33b), observa-se um efeito positivo na altura significativa das ondas neste setor, ou seja, a correção do vento promoveu um aumento médio de 0,3 metros nos valores de Hs nos ciclones deste setor. Um resultado semelhante foi observado no setor 2 (Figura 5.33d).

Em relação aos eventos do setor 3 (Figura 5.36d), o aumento de Hs foi mais intenso, da ordem de 0,4 metros e no setor 4, foi o setor em que a correção do vento teve maior influencia, com aumento superior a 0,6 metros (Figura 5.36a).

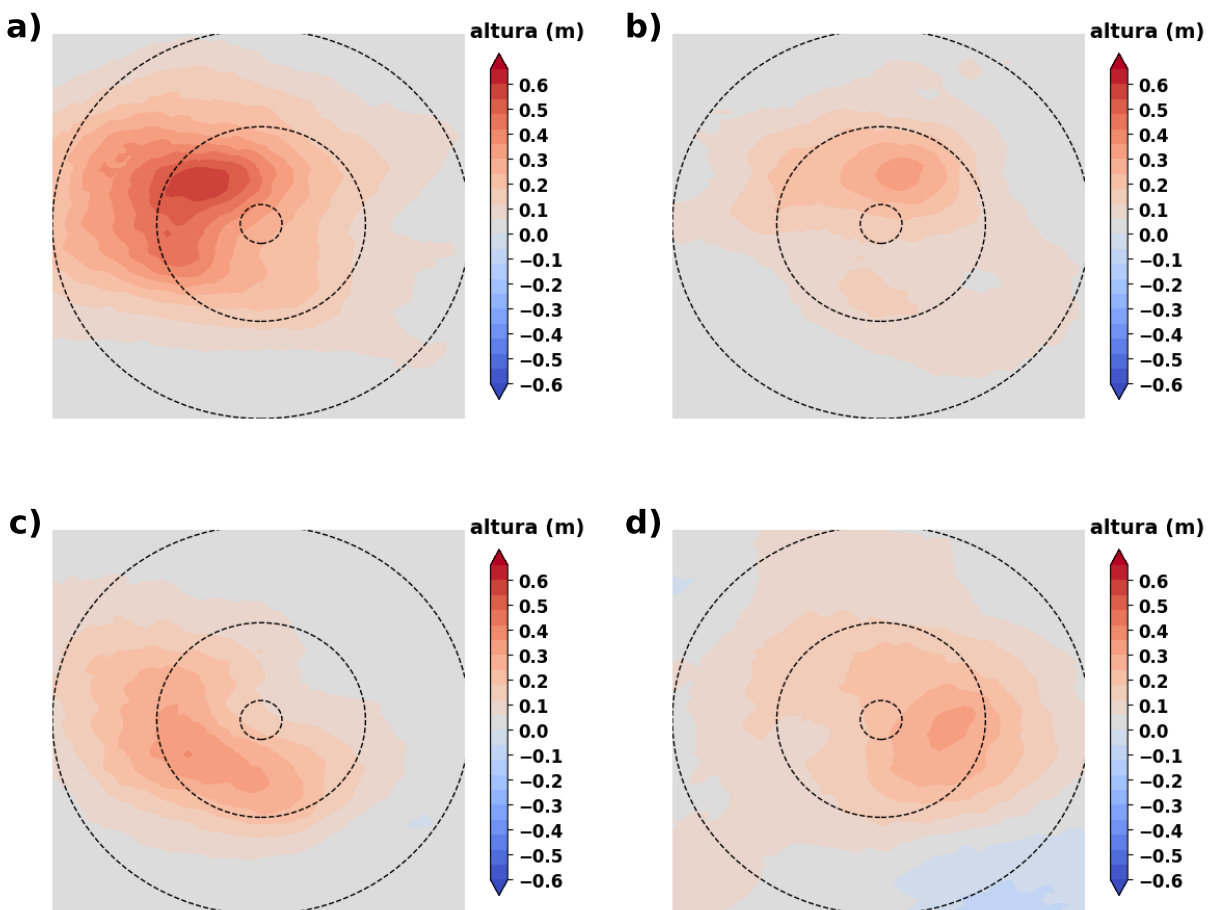


Figura 5.36: Composições dos 50 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da correção do vento nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2.

Ao examinar os impactos da regionalização na representação de eventos extremos de ondas (Figura 5.37), observa-se uma diminuição na altura significativa de onda (H_s) em todas as categorias de ciclones, independentemente da localização do vento máximo (setores 1, 2, 3 ou 4), o que também foi observado na Figura 5.34.

No setor 1 (Figura 5.37b), a queda de H_s foi de -1,5 metros. No setor 2, a diminuição nos valores de H_s foi de aproximadamente -1,5 metros e foi localizada na região de interseção entre o setor 1 e 2.

Os ciclones com vento máximo no setor 3 se sobressaem, uma vez que a redução de H_s resultante da regionalização alcançou -3,5 metros, concentrada no centro do quadrante que define o setor, padrão que também foi observado na Figura 5.34c. No setor 4, o padrão se assemelha àquele observado na análise do efeito da correção do vento (Figura 5.37) pois foi o setor em que a influência do fator analisado foi mais expressiva, atingindo valores de -4,5 metros.

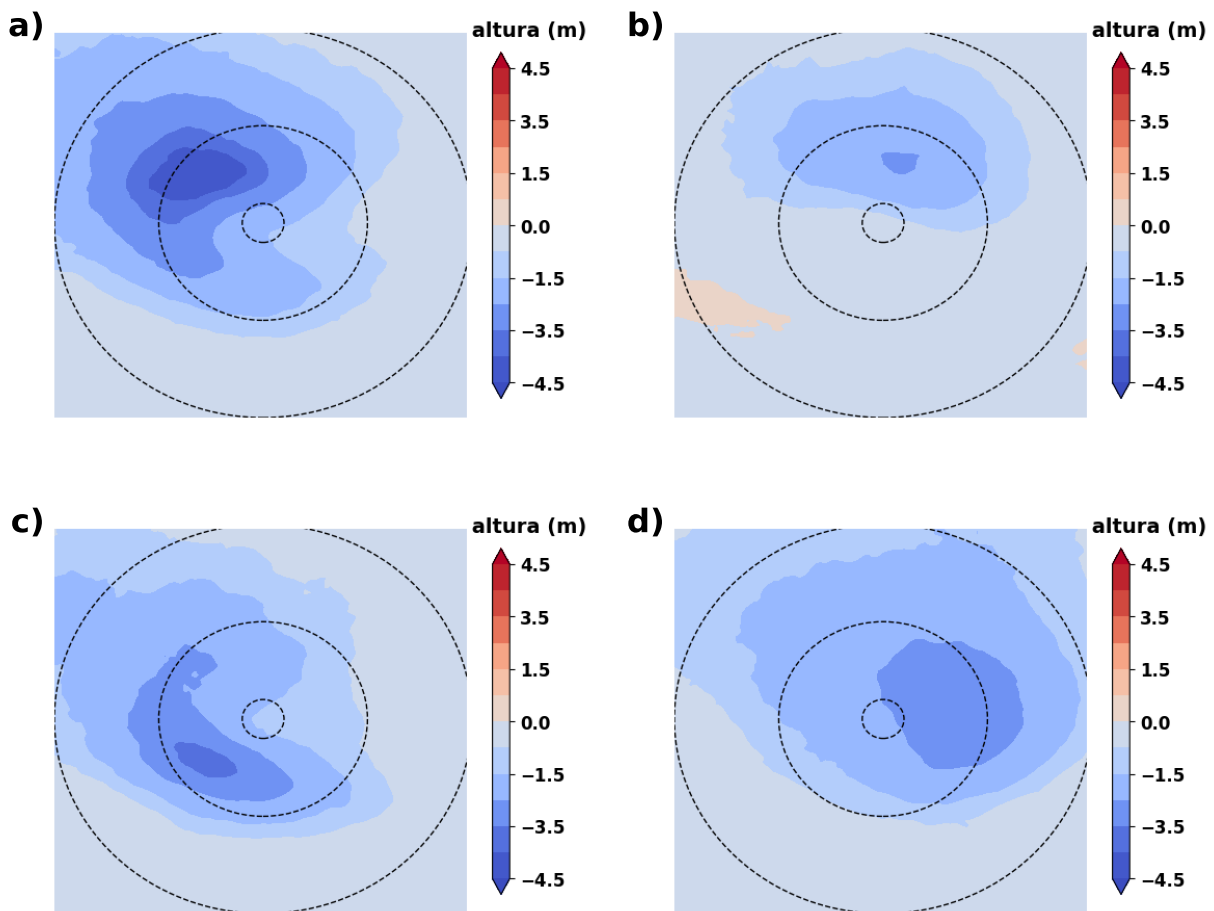


Figura 5.37: Composições dos 50 eventos mais intensos, ilustrando o impacto da regionalização nos ciclones de maior intensidade do vento nos seguintes setores: (a) 4, (b) 1, (c) 3 e (d) 2. Os círculos concêntricos representam as distâncias de 1°, 5° e 10° a partir do centro do ciclone, respectivamente. A disposição dos setores segue o esquema apresentado na Figura 4.2.

Considerações Finais

No presente estudo, buscou-se contribuir com o conhecimento a respeito dos impactos que a correção do vento de superfície e da regionalização dinâmica tem na representação de eventos extremos de vento e onda no sudoeste do Atlântico Sul.

O objetivo central foi de analisar simulações climáticas conduzidas com modelo de onda WW3, utilizando diferentes combinações de regionalização e correção do vento, para o período de 1979 a 2018, com o intuito de avaliar o desempenho deles em representar padrões climáticos e simular eventos intensos. Para alcançar esse objetivo foram realizadas: (i) execução de uma rodada adicional do WW3 global com a correção do vento, visando compor o conjunto de quatro simulações requeridas para avaliar a relevância de dois fatores, correção do vento e regionalização; (ii) avaliação das simulações, efetuada por meio de comparação com dados observados disponíveis e resultados de reanálise; (iii) comparação da representação de dois eventos extremos distintos estudados por [Gramcianinov et al. \(2020\)](#), entre a rodada global e regional; (iv) estudo do padrão sinótico associado aos eventos mais intensos de cada categoria, onde foi localizado a região aonde ocorreu o vento mais intenso do ciclone; (v) análises da influência da correção do vento e da regionalização, separadamente, por meio de composições por setor.

A análise pontual conduzida em quatro pontos selecionados revelou um desempenho variável das simulações regionais e globais. As simulações regionais demonstraram menores erros para o ponto de Rio Grande, enquanto as simulações globais apresentaram menores erros e melhores índices de habilidade (IC e D_{Pielke}) para os demais pontos. Em todos os pontos avaliados, a simulação regional apresentou valores expressivos somente na componente dispersiva do MSE, sugerindo a possibilidade de um erro de fase em suas rodadas. As análises pontuais sazonais indicaram que todas as simulações confirmaram que o período

mais energético das ondas é o outono/inverno, que ocorre entre os meses de março e agosto, em consonância com os resultados encontrados por Pianca et al. (2010).

As análises dos eventos extremos indicaram que a regionalização dinâmica tem um impacto maior nos valores de Hs do que a correção do vento e a interação não linear entre esses fatores. Essa observação sugere a importância da escolha de estratégias de modelagem adequadas ao se investigar fenômenos em simulações climáticas. As composições indicam que a correção do vento, aumentou a magnitude de Hs, normalmente intensificando Hs na região do setor onde o evento é classificado, mas para os eventos de setor 1 e 2 trouxe um aumento na intensidade de Hs tanto na região de advecção quente e fria do ciclone. Por outro lado, a regionalização atuou em sua maioria com uma diminuição da intensidade de Hs, indicando uma atenuação do evento.

Uma limitação do alcance dos resultados foi de que não foi possível estabelecer uma relação entre as condições sinóticas existentes no momento do evento extremo e sua representação, boa ou má, na simulação regional e global. Contudo, observamos que, nos eventos onde a simulação regional não teve correspondência em superfície com a global, ou seja, o centro do ciclone e as regiões mais intensas de Hs não estão presentes no mesmo local e/ou com menos intensidade, constatou-se uma falta correspondência também em níveis médios. Nestes casos, o centro de menor altura geopotencial estava deslocado ou inexistente, sugerindo que a ausência do evento pode ser atribuída a uma representação inadequada da estrutura sinótica e dinâmica do evento nos níveis baixos e médios da atmosfera. Contudo, a estrutura de altos níveis nas simulações regionais não foi objeto específico de análise do presente estudo.

A comparação individual dos eventos com observações ou reanálises é um processo desafiador, muitas vezes resultando em desigualdades entre as simulações climáticas. Observa-se que, embora os modelos regionais sejam comumente preferidos para a representação de eventos mais energéticos, nem sempre esta suposição se verifica. Uma resolução mais alta, obtida através da regionalização de um modelo global, não necessariamente resulta em uma representação mais precisa dos eventos mais profundos. Este trabalho realça a necessidade de ferramentas mais robustas para analisar o desempenho dos modelos, principalmente os regionais. Não é suficiente usar apenas métricas tradicionais, sobretudo quando lidamos com sistemas transientes, onde pequenas mudanças de posição podem alterar o todo evento.

Outro ponto deve ser levado em consideração é de que a grade limitada de um modelo regional pode atenuar a entrada de perturbações na borda oeste. Essas perturbações, provenientes do Pacífico, são cruciais para a ciclogênese à leste dos Andes. Adicionalmente, identificamos que a falta de acoplamento oceano-atmosfera pode influenciar a posição e intensificação dos ciclones.

Em síntese, este estudo buscou iluminar as complexidades na modelagem de eventos extremos de vento e onda. Embora a representação precisa de eventos climáticos específicos em simulações climáticas seja desafiadora, esperamos que as descobertas desta pesquisa ajudem a avançar na compreensão desses fenômenos e na melhoria dos modelos de previsão. Ao aprofundar o conhecimento sobre as características dinâmicas e estatísticas desses eventos, é possível contribuir para o aperfeiçoamento dos modelos numéricos de previsão e para o estabelecimento de políticas e práticas mais resilientes e sustentáveis em áreas impactadas por esses fenômenos.

Em relação a trabalhos futuros e considerando as limitações encontradas, uma possível estratégia seria a utilização de um *downscaling* estatístico baseado no modelo global, com o intuito de obter um campo mais refinado que, potencialmente, traria contribuições diferentes e válidas das que foram encontradas. Dentro do escopo do projeto WeSACEx, foi realizada uma regionalização com outro modelo de mesoescala, o RegCM4 (Giorgi et al., 2012). Uma publicação recente (Crespo et al., 2022), indicou que esse modelo tem uma tendência de superestimar e extrapolar os casos, o que contrasta com os resultados encontrados com o WRF. Análises similares às propostas neste trabalho podem ser realizadas em estudos futuros. Há espaço para expandir a contribuição nesse entendimento e uma maneira de fazê-lo seria utilizar outros resultados gerados dentro do mesmo projeto.

Referências Bibliográficas

Aguiar D. F., McInnes K., Melo Filho E., Romeu M. A. R., Fontoura J. A. S., Extreme Wave Analysis Based on 31 Years Data from WW3 Model: Study off Southern Brazilian Coast, *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2021, vol. 93, p. e20190111

Agência Brasil, 2021 Petróleo: produção na Bacia de Santos ultrapassa 70% do total nacional Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2021-05/petroleo-producao-na-bacia-de-santos-ultrapassa-70-do-total-nacional>. [Online; Acesso em: 11 de março de 2023]

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, 2021 Blocos Exploratórios sob Concessão e Campos de Produção. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/shapefile-de-dados>. [Online; Acesso em: 10 de dezembro de 2022]

Alves J. H. G., Ribeiro E. O., Matheson J. A. M. L., Ribeiro C. E. P., Reconstituição do clima de ondas no sul-sudeste brasileiro entre 1997 e 2005, *Revista Brasileira de Geofísica*, 2009, vol. 27, p. 427

Ardhuin F., Rogers E., Babanin A. V., Filipot J.-F., Magne R., Roland A., Van Der Westhuysen A., Queffelec P., Lefevre J.-M., Aouf L., et al., Semiempirical dissipation source functions for ocean waves. Part I: Definition, calibration, and validation, *Journal of Physical Oceanography*, 2010, vol. 40, p. 1917

Atlas R., Hoffman R. N., Ardizzone J., Leidner S. M., Jusem J. C., Smith D. K., Gombos D., A Cross-calibrated, Multiplatform Ocean Surface Wind Velocity Product for Me-

- teorological and Oceanographic Applications, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, vol. 92, p. 157
- Barros N. B., Sacarmino I. S., Bruns R. E., *Planejamento e Otimização de Experimentos*. Editora da Unicamp Campinas, SP, 1995
- Battjes J. A., Janssen J. P. F. M., , 1978 in , *Coastal engineering 1978*. pp 569–587
- Box G. E. P., Hunter J. S., Hunter W. G., *Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery 2nd ed edn*. Wiley series in probability and statistics, Wiley-Interscience Hoboken, N. J., 2005
- Campos R. M., *Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extra-tropicais no Atlântico Sul*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2009, Dissertação de Mestrado
- Campos R. M., Alves J. H. G. M., Guedes Soares C., Guimaraes L. G., Parente C. E., *Extreme wind-wave modeling and analysis in the South Atlantic Ocean*, *Ocean Modelling*, 2018, vol. 124, p. 75
- Campos R. M., Alves J. H. G. M., Soares C. G., Guimaraes L. G., Parente C. E., *Extreme wind-wave modeling and analysis in the south Atlantic ocean*, *Ocean Modelling*, 2018, vol. 124, p. 75
- Campos R. M., Camargo R., Harari E. J., *Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul*, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2010, vol. 25, p. 141
- Campos R. M., Guedes Soares C., *Comparison of HIPOCAS and ERA wind and wave reanalyses in the North Atlantic Ocean*, *Ocean Engineering*, 2016, vol. 112, p. 320
- Campos R. M., Parente C. E., de Camargo R., *Extreme Wave Analysis in Campos Basin (Rio de Janeiro - Brazil) Associated With Extra-Tropical Cyclones and Anticyclones*. In *Volume 2: Structures, Safety and Reliability* , American Society of Mechanical Engineers, 2012

- Cardoso A. A., Ciclones subtropicais e ventos em superfície no sudoeste do Oceano Atlântico Sul: climatologia e extremos, 2019
- Cardoso J. H. G., Análise Bivariada de Extremos de Ondas e Vento na Bacia de Campos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2004, Dissertação de Mestrado
- Cavaleri L., Wave modeling—Missing the peaks, *Journal of Physical Oceanography*, 2009, vol. 39, p. 2757
- Cavaleri L., Alves J.-H. G. M., Ardhuin F., Babanin A., Banner M., Belibassakis K., Benoit M., Donelan M., Groeneweg J., Herbers T. H. C., Hwang P., Janssen P. A. E. M., Janssen T., Lavrenov I. V., Magne R., Monbaliu J., Onorato M., Polnikov V., Resio D., Rogers W. E., Sheremet A., McKee Smith J., Tolman H. L., van Vledder G., Wolf J., Young I., Wave modelling – The state of the art, *Progress in Oceanography*, 2007, vol. 75, p. 603
- Cavaleri L., Rizzoli P. M., Wind wave prediction in shallow water: Theory and applications, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, vol. 86, p. 10961
- Crespo N. M., Silva N. P. d., Palmeira R. M. d. J., Cardoso A. A., Kaufmann C. L. G., Lima J. A. M., Andrioni M., de Camargo R., da Rocha R. P., Western South Atlantic Climate Experiment (WeSACEx): extreme winds and waves over the Southeastern Brazilian sedimentary basins, *Climate Dynamics*, 2022, vol. 60, p. 571
- Curcic M., Haus B. K., Revised Estimates of Ocean Surface Drag in Strong Winds, *Geophysical Research Letters*, 2020, vol. 47
- da Silva N. P., Crespo N. M., Kaufmann C. L. G., Lima J. A. M., Andrioni M., Camargo R., Rocha R. P. d., Adjustment of extreme wind speed in regional climate downscaling over southwestern South Atlantic, *International Journal of Climatology*, 2022, vol. 42, p. 9994
- Fisher R. A., , 1992 in , Springer Series in Statistics. Springer New York pp 82–91
- Fox D. G., Judging air quality model performance: a summary of the AMS workshop on dispersion model performance, Woods Hole, Mass., 8–11 September 1980, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1981, vol. 62, p. 599

- Gan M. A., Rao V. B., Surface Cyclogenesis over South America, *Monthly Weather Review*, 1991, vol. 119, p. 1293
- Garreaud R. D., Wallace J. M., Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South America, *Monthly Weather Review*, 1998, vol. 126, p. 2713
- Giorgi F., Coppola E., Solmon F., Mariotti L., Sylla M., Bi X., Elguindi N., Diro G., Nair V., Giuliani G., et al., RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains, *Climate Research*, 2012, vol. 52, p. 7
- Gramscianinov C. B., Camargo R., Campos R. M., Soares C. G., Silva Dias P. L., Impact of Extratropical Cyclone Intensity and Speed on the Extreme Wave Trends in the Atlantic Ocean, *Climate Dynamics*, 2022, vol. 60, p. 1447
- Gramscianinov C. B., Campos R. M., de Camargo R., Hodges K. I., Guedes Soares C., da Silva Dias P. L., Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases, *Ocean Engineering*, 2020, vol. 216, p. 108111
- Gramscianinov C. B., Campos R. M., Guedes Soares C., de Camargo R., Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean, *Ocean Engineering*, 2020, vol. 213, p. 107745
- Gramscianinov C. B., Hodges K. I., Camargo R., The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones, *Climate Dynamics*, 2019, vol. 53, p. 4115
- Guimarães P. V., Farina L., Jr. E. E. T., Analysis of extreme wave events on the southern coast of Brazil, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, vol. 14, p. 3195
- Hackerott J. A., Pezzi L. P., Bakhoday Paskyabi M., Oliveira A. P. d., Reuder J., de Souza R., de Camargo R., The role of roughness and stability on the momentum flux in the marine atmospheric surface layer: a study on the southwestern atlantic ocean, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, vol. 123, p. 3914
- Hallak R., Pereira Filho A. J., Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS:

- sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2011, vol. 26, p. 591
- 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.*, 1973, vol. 8, p. 1
- Hasselmann S., Hasselmann K., Computations and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part I: A new method for efficient computations of the exact nonlinear transfer integral, *Journal of Physical Oceanography*, 1985, vol. 15, p. 1369
- Hodges K. I., Lee R. W., Bengtsson L., A comparison of extratropical cyclones in recent re-analyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25, *Journal of Climate*, 2011, vol. 24, p. 4888
- Holthuijsen L. H., Booij N., Bertotti L., The Propagation of Wind Errors Through Ocean Wave Hindcasts, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1996, vol. 118, p. 184
- Hoskins B. J., Hodges K. I., A New Perspective on Southern Hemisphere Storm Tracks, *Journal of Climate*, 2005, vol. 18, p. 4108
- Istoé, 2021 Petróleo: produção na Bacia de Santos ultrapassa 70% do total nacional Disponível em: <https://istoe.com.br/petroleo-producao-na-bacia-de-santos-ultrapassa-70-do-total-nacional>. Acesso em: 01 de março de 2023
- Izaguirre C., Méndez F. J., Espejo A., Losada I. J., Reguero B. G., Extreme wave climate changes in Central-South America, *Climatic Change*, 2013, vol. 119, p. 277
- Law-Chune S., Aouf L., Dalphinnet A., Levier B., Drillet Y., Drevillon M., WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period, *Ocean Dynamics*, 2021, vol. 71, p. 357

- Lunt D. J., Chandan D., Haywood A. M., Lunt G. M., Rougier J. C., Salzmann U., Schmidt G. A., Valdes P. J., Multi-variate factorisation of numerical simulations, *Geoscientific Model Development*, 2021, vol. 14, p. 4307
- Lunt D. J., Haywood A. M., Schmidt G. A., Salzmann U., Valdes P. J., Dowsett H. J., Loptson C. A., On the causes of mid-Pliocene warmth and polar amplification, *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 321-322, p. 128
- Ma Y., Yang Y., Mai X., Qiu C., Long X., Wang C., Comparison of Analysis and Spectral Nudging Techniques for Dynamical Downscaling with the WRF Model over China, *Advances in Meteorology*, 2016, vol. 2016, p. 1
- Machado A. A., Calliari L. J., Melo F. Klein A. H., Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes, 2010
- Machado D. M., Um Estudo Sobre o Clima de Ondas e o Transporte de Lama ao Largo da Praia do Cassino, RS, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2013, Dissertação de Mestrado
- Mendes A. L. T., Investigação sobre a dispersão direcional de ondas de gravidade na Baía de Campos, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2005, Tese de Doutorado
- Nascimento M. X., Análise das condições Meteo-Oceanográficas na Região da Baía de Santos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2013, Dissertação de Mestrado
- NOAA, 2022 ETOPO 2022 15 Arc-Second Global Relief Model <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>, doi: <https://doi.org/10.25921/fd45-gt74>
- Nunes A. M. B., Satellite-enhanced dynamical downscaling for the analysis of extreme events, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, vol. 121, p. 10

- Osinski R. D., Radtke H., Ensemble hindcasting of wind and wave conditions with WRF and WAVEWATCH III® driven by ERA5, *Ocean Science*, 2020, vol. 16, p. 355
- Paiva V., Kampel M., Camayo R., Comparison of Multiple Surface Ocean Wind Products with Buoy Data over Blue Amazon (Brazilian Continental Margin), *Advances in Meteorology*, 2021, vol. 2021, p. 1
- Palmeira A. C. P. A., Modelagem numérica de eventos extremos de altura significativa de ondas na região oeste do Atlântico Sul, Universidade de São Paulo, USP/IAG, 2002, Dissertação de Mestrado
- Palmer T. N., Raisanen J., Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate, *Nature*, 2002, vol. 415, p. 512
- Parente C. E., Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 1999, Tese de Doutorado
- Parente C. E., Nogueira I. C. M., Martins R. P., Ribeiro E. O., , 2015 in Martins R. P., Grossmann-Matheson G. S., eds, , *Meteorologia e Oceanografia*. Elsevier Rio de Janeiro Chapt. 2 pp 55–96
- Parente C. E., Souza M. H. S., Wave Climate Off Rio de Janeiro. In *Coastal Engineering 1988: Proceedings of the Twenty-First International Conference* , vol. 1, 1989, p. 201
- Pereira H. P. P., Violante-Carvalho N., Nogueira I. C. M., Babanin A., Liu Q., de Pinho U. F., Nascimento F., Parente C. E., Wave observations from an array of directional buoys over the southern Brazilian coast, *Ocean Dynamics*, 2017, vol. 67, p. 1577
- Petrobras, 2020 Bacia de Santos <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-santos.htm>
- Phillips O. M., On the generation of waves by turbulent wind, *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, vol. 2, p. 417
- Pianca C., Mazzini P. L. F., Siegle E., Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis, *Brazilian Journal of Oceanography*, 2010, vol. 1, p. 58

- Pianca C., Mazzini P. L. F., Siegle E., Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis, *Brazilian Journal of Oceanography*, 2010, vol. 58, p. 53
- Pielke R. A., *Mesoscale Meteorological Modeling: Volume 98 3 edn. International geophysics series*, Academic Press San Diego, CA, 2013
- Pierson W. J., Moskowitz L., A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii, *Journal of Geophysical Research*, 1964, vol. 69, p. 5181
- Pinho U. F., *Caracterização do estado de mar na Bacia de Campos*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2003, Tese de Doutorado
- PNBOIA, 2023 Programa Nacional de Boias Oceanográficas (PNBOIA) <http://www.pnboia.com.br/>
- Poder360, 2021 Petróleo: produção na Bacia de Santos ultrapassa 70% do total nacional Disponível em: <https://www.poder360.com.br/economia/petroleo-producao-na-bacia-de-santos-ultrapassa-70-do-total-nacional/>. [Online; Acesso em: 10 de março de 2023]
- Ponce de León S., Guedes Soares C., Sensitivity of wave model predictions to wind fields in the Western Mediterranean sea, *Coastal Engineering*, 2008, vol. 55, p. 920
- Reboita M. S., Rocha R. P. d., Ambrizzi T., Sugahara S., South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3), *Climate Dynamics*, 2009, vol. 35, p. 1331
- Rocha R. P., Sugahara S., Silveira R. B., Sea waves generated by extratropical cyclones in the South Atlantic Ocean: hindcast and validation against altimeter data, *Weather and forecasting*, 2004, vol. 19, p. 398
- Rochford P. A., , 2016 SkillMetrics: A Python package for calculating the skill of model predictions against observations

- Rodríguez M. G., Nicolodi J. L., Gutiérrez O. Q., Losada V. C., Hermosa A. E., , 2016 in , Coastal Research Library. Springer International Publishing pp 37–66
- Rogers W. E., Dykes J. D., Wang D., Carroll S. N., Watson K., , 2012 Technical report Validation test report for WAVEWATCH III. NAVAL RESEARCH LAB STENNIS DETACHMENT STENNIS SPACE CENTER MS
- Romeu M. A. R., Fontoura J. A. S., Melo E., Typical Scenarios of Wave Regimes off Rio Grande do Sul, Southern Brazil, *Journal of Coastal Research*, 2015, vol. 31, p. 61
- Saha S., Moorthi S., Pan H.-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y.-T., ya Chuang H., Juang H.-M. H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P. V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J.-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C.-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R. W., Rutledge G., Goldberg M., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, vol. 91, p. 1015
- Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y.-T., Chuang H.-y., Iredell M., et al., The NCEP climate forecast system version 2, *Journal of Climate*, 2014, vol. 27, p. 2185
- Seluchi M. E., Marengo J. A., Tropical—Midlatitude exchange of air masses during summer and winter in South America: climatic aspects, *International Journal of Climatology*, 2000, vol. 20, p. 1167
- Sharmar V. D., Markina M. Y., Gulev S. K., Global Ocean Wind-Wave Model Hindcasts Forced by Different Reanalyses: A Comparative Assessment, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, vol. 126, p. 1
- Silva F. L., Investigações sobre a chegada dispersiva de ondulações (swell) em situações de BOM TEMPO na Baía de Campos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 2008, Dissertação de Mestrado

- Silva M., Silva Junior R., Nascimento G., Gomes H., Holanda S., Sistema de alerta para áreas de risco, utilizando o modelo de mesoescala WRF para o município de Maceió-Alagoas em julho de 2013, *Revista Brasileira de Geografia Física*, 2016, vol. 9, p. 2213
- Silva N. P. d., Camargo R. d., Impact of wave number choice in spectral nudging applications during a South Atlantic convergence zone event, *Frontiers in Earth Science*, 2018, vol. 6, p. 232
- Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., Powers J. G., , 2005 Technical report A description of the advanced research WRF version 2. National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale
- Souza D. C., Silva R. R., Ocean-Land Atmosphere Model (OLAM) performance for major extreme meteorological events near the coastal region of southern Brazil, *Climate Research*, 2021, vol. 84, p. 1
- Souza D. C., Silva R. R., Silva P. G., Fetter Filho A. F. H., Mendez F. J., Werth D., A hybrid regional climate downscaling for the southern Brazil coastal region, *International Journal of Climatology*, 2022
- Souza M. H. S., Clima de Ondas ao Norte do Estado do Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 1988, Dissertação de Mestrado
- Stein U., Alpert P., Factor Separation in Numerical Simulations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1993, vol. 50, p. 2107
- Stopa J. E., Cheung K. F., Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Ocean Modelling*, 2014, vol. 75, p. 65
- Takacs L. L., A two-step scheme for the advection equation with minimized dissipation and dispersion errors, *Monthly Weather Review*, 1985, vol. 113, p. 1050
- Taylor K. E., Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, vol. 106, p. 7183

- Teixeira J. C., Abreu M. P., Guedes Soares C., Uncertainty of Ocean Wave Hindcasts Due to Wind Modeling, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1995, vol. 117, p. 294
- Tolman H., Accensi M., Alves J. H., Ardhuin F., Barbariol F., Benetazzo A., Bennis A. C., Bidlot J., Booij N., Boutin G., Campbell T., Chalikov D., Chawla A., Cheng S., Collins C., Filipot J. F., Foreman M., Janssen P., Leckler F., Westhuysen A., User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 5.16. 1st ed. London: W W Norton & Co Inc, 2016
- Tolman H. L., A third-generation model for wind waves on slowly varying, unsteady, and inhomogeneous depths and currents, *Journal of Physical Oceanography*, 1991, vol. 21, p. 782
- Tolman H. L., Alleviating the garden sprinkler effect in wind wave models, *Ocean Modelling*, 2002, vol. 4, p. 269
- Tolman H. L., , 2002 Technical report Validation of WAVEWATCH III version 1.15 for a global domain. NOAA/NWS/NCEP/OMB Tech. Note 213
- Tolman H. L., Balasubramaniyan B., Burroughs L. D., Chalikov D. V., Chao Y. Y., Chen H. S., Gerald V. M., Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models at NCEP, *Weather and Forecasting*, 2002, vol. 17, p. 311
- Tolman H. L., Chalikov D., Source Terms in a Third-Generation Wind Wave Model, *Journal of Physical Oceanography*, 1996, vol. 26, p. 2497
- Van Vledder G. P., Akpınar A., Wave model predictions in the Black Sea: Sensitivity to wind fields, *Applied Ocean Research*, 2015, vol. 53, p. 161
- Violante-Carvalho N., Investigações sobre o Clima de Ondas na Bacia de Campos e Correlação com Situações Meteorológicas Associadas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Programa de Engenharia Oceânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), 1998, Dissertação de Mestrado
- Warner J. C., Armstrong B., He R., Zambon J. B., Development of a coupled ocean-atmosphere-wave-sediment transport (COAWST) modeling system, *Ocean Modelling*, 2010, vol. 35, p. 230

- Wentz F. J., Scott J., Hoffman R., Leidner M., Atlas R., Ardizzone J., Remote Sensing Systems Cross-Calibrated Multi-Platform (CCMP) 6-hourly ocean vector wind analysis product on 0.25 deg grid, Version 2.0, 2015
- Wigley T. M. L., Impact of extreme events, Nature Publishing Group UK London, 1985, vol. 316, p. 106
- Wilks, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences 2 edn. International Geophysics, Academic Press, 2014
- Willmott C. J., Some comments on the evaluation of model performance, Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, vol. 63, p. 1309
- Young I. R., Ribal A., Multiplatform evaluation of global trends in wind speed and wave height, Science, 2019