

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

Rodrigo Tecchio

**Desenvolvimento de escala de classificação e
de ferramentas de previsão de ressacas para
a costa S/SE do Brasil, com base no fluxo de
energia das ondas**

São Paulo

2024

Rodrigo Tecchio

**Desenvolvimento de escala de classificação e
de ferramentas de previsão de ressacas para
a costa S/SE do Brasil, com base no fluxo de
energia das ondas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade

São Paulo

2024

*Dedico este trabalho àqueles que foram
minha luz em momentos de escuridão e força nas horas de dúvida: Deus, por guiar cada
passo; minha família e Nathalia, por amor e apoio incondicionais*

Agradecimentos

Ao concluir esta etapa tão significativa da minha jornada acadêmica, muitos são os sentimentos que se entrelaçam, dentre os quais, o mais proeminente é, sem dúvida, a gratidão. Primeiramente, expresso minha profunda gratidão a Deus, fonte de força e inspiração. Sua presença constante guiou-me diante dos desafios e sua Glória permitiu-me lograr grandes conquistas nesta jornada.

Um agradecimento muito especial é dirigido à minha família, o alicerce de tudo o que sou. O apoio incondicional, o amor e a crença incessante em minha capacidade foram cruciais para a minha perseverança e sucesso. Cada obstáculo enfrentado foi amenizado pela segurança que sua presença me proporciona.

À minha noiva, Nathalia Panaro, cujo amor, paciência e compreensão iluminaram os dias mais árduos. Ofereço minha mais sincera gratidão. Sua presença ao meu lado é um presente inestimável e sua parceria (desde o processo seletivo do mestrado) é uma das maiores fontes de alegria e motivação na minha vida.

Expresso minha profunda estima e reconhecimento ao meu orientador, Ricardo de Carmargo, cuja sabedoria, dedicação e orientação foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. Sua paciência, conhecimento e incentivo foram pilares que sustentaram minha jornada acadêmica.

Aos meus colegas do laboratório Master, em especial Danilo Couto e Matheus Bonjour, agradeço pela camaradagem, pelo aprendizado compartilhado e pelo ambiente colaborativo que tanto enriqueceram minha experiência de pesquisa. Vocês tornaram o laboratório não apenas um local de trabalho, mas um espaço de crescimento e descoberta.

Um agradecimento à Marinha do Brasil, em especial ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), por ter me selecionado para este curso. A oportunidade de fazer parte desta

Instituição e de poder contribuir para com o avanço do conhecimento em nossa área é uma honra que carrego com grande orgulho.

Estendo meus agradecimentos ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG-USP), pela excelente formação, recursos e ambiente acadêmico enriquecedor que disponibilizaram, os quais foram fundamentais para a realização desta pesquisa.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao Felipe Gaudino, amigo de longa data, por sua contribuição significativa na criação da plataforma SisMOPrer, por meio do seu apoio técnico. Um grande gesto de amizade verdadeira e solidariedade.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos. Esta dissertação é também um reflexo das inúmeras contribuições que cada um de vocês ofereceu ao longo desta jornada.

“A disciplina é a ponte entre metas e realizações ”

Jim Rohn

Resumo

Ressacas, fenômenos de sobrelevação do nível do mar causados por forçantes astronômicas e meteoceanográficas e amplificados pela ação das ondas, representam riscos significativos à navegação, à vida humana no mar e às áreas costeiras. Nesse sentido, a utilização de produtos derivados de modelos numéricos de previsão de ondas são essenciais para identificar ressacas e emitir alertas, de forma a garantir a segurança marítima, a engenharia costeira e o planejamento urbano. Com o objetivo de aprimorar as ferramentas de previsão de ressacas, novos produtos baseados no fluxo de energia das ondas (P_W kW/m) foram desenvolvidos. Buscando mensurar tais eventos, este trabalho objetivou criar uma escala de classificação específica para cada estado da costa Sul e Sudeste do Brasil, com base na energia total do evento (E_{total} kWh/m), no máximo P_W observado e na direção de propagação da energia, com dados da reanálise *Waverys*. Dessa forma, eventos com altura significativa das ondas (H_S) acima de 2,5m e duração mínima de 24h foram categorizados em cinco grupos usando o método *k-means*, dividindo a escala em três classes: Leve, Moderada e Severa, com duas subclasses para as duas primeiras categorias, cuja validação restringiu-se ao estado de Santa Catarina, devido à ausência de um banco nacional de informações sobre ressacas. A classificação de 40 eventos indicam que as regiões Norte e Centro-Norte de Santa Catarina têm sofrido danos até mesmo de ressacas de baixa intensidade, inclusive por alturas de onda abaixo do critério utilizado, provavelmente ocasionados pela ocupação desordenada da região costeira. Identificou-se ainda que a ocorrência de marés de sizígia foi determinante nesses casos, ressaltando a importância de considerá-las na avaliação de riscos de ressacas. Finalmente, para auxiliar nas previsões, desenvolveu-se um roteiro estruturado de análise desses eventos, bem como o Sistema de Monitoramento de Ondas para Previsão de Ressacas (SisMOPreR), uma plataforma web, que consolida uma série

de mapas, diagramas e informações em tempo real provenientes de boias e marégrafos, configurando-se como uma ferramenta integral para a predição de tais fenômenos.

Palavras chave: ressaca, avisos de ressaca, padrões meteorológicos, *K-means*, fluxo de energia de ondas

Abstract

Storm surges, phenomena of sea level rise caused by astronomical and meteoceanographic forces and amplified by wave action, pose significant risks to navigation, human life at sea, and coastal areas. In this context, the use of products derived from numerical wave prediction models is essential for identifying storm surges and issuing alerts, thereby ensuring maritime safety, coastal engineering, and urban planning. With the aim of enhancing storm surge prediction tools, new products based on wave energy flux (P_W kW/m) have been developed. This study aimed to create a specific classification scale for each state along the South and Southeast coast of Brazil, based on the total event energy (E_{total} kWh/m), the maximum observed P_W , and the direction of energy propagation, using data from the *Waverys* reanalysis. Consequently, events with a significant wave height (H_S) above 2.5m and a minimum duration of 24 hours were categorized into five groups using the *k-means* method, dividing the scale into three classes: Light, Moderate, and Severe, with two subclasses for the first two categories. The validation was limited to the state of Santa Catarina, due to the absence of a national database on storm surges. The classification of 40 events indicates that the Northern and North-Central regions of Santa Catarina have suffered damage even from low-intensity storm surges, including wave heights below the utilized criterion, likely caused by the disordered occupation of the coastal region. It was also identified that the occurrence of spring tides was a determining factor in these cases, highlighting the importance of considering them in storm surge risk assessments. Finally, to assist in predictions, a structured roadmap for analyzing these events was developed, along with the Wave Monitoring System for Storm Surge Prediction (SISMOPRER), a web platform that consolidates a series of maps, diagrams, and real-time information from buoys and tide gauges, establishing itself as an integral tool for predicting such phenomena.

Keywords: storm surge, storm surge warnings, weather patterns, K-means, wave energy flux

Lista de Figuras

2.1	Transferência de energia do vento para o mar.	34
2.2	Esquema representativo da formação das ondas. Representação da região de formação das vagas (e a pista) e região dos marulhos.	35
2.3	Definição de uma onda em um registro de tempo da elevação da superfície com cruzamentos por zero descendentes (painel superior) ou cruzamentos por zero ascendentes (painel inferior).	36
2.4	Definição da altura e do período da onda em um determinado registro de tempo.	37
2.5	Esquema ilustrativo das energias potencial e cinética das ondas.	40
2.6	Representação gráfica da aplicação do método do cotovelo para determinação da quantidade ideal de <i>clusters</i>	54
3.1	Localização das boias do PNBOIA utilizadas na validação da reanálise <i>Waverys</i>	56
3.2	Aviso de ressaca emitido pelo SMM	57
3.3	Fluxograma da metodologia aplicada para a validação da reanálise <i>Waverys</i> e avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM.	58
3.4	Fluxograma da metodologia aplicada para determinação dos percentis climatológicos e plotagem dos mapas de auxílio a tomada de decisão.	62
3.5	Costa S/SE brasileira com os 33 pontos sobre a isóbata de 100m.	63
3.6	Fluxograma da metodologia aplicada para a criação da escala de classificação de ressacas.	64

4.1	Distribuição de densidade de probabilidade para H_S na comparação entre boias e <i>Waverys</i>	67
4.2	Distribuição de densidade de probabilidade para T_P na comparação entre boias e <i>Waverys</i>	68
4.3	Diagramas de dispersão de H_S . Superior esquerdo Santos, superior direito Vitória, inferior esquerdo Rio Grande, inferior direito Itajaí.	68
4.4	Diagramas de dispersão de T_P . Superior esquerdo Santos, superior direito Vitória, inferior esquerdo Rio Grande, inferior direito Itajaí.	69
4.5	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo SMM e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio Grande do Sul.	74
4.6	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo SMM e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio de Janeiro.	75
4.7	Densidade de <i>trackings</i> de ciclones, para os anos de 2013 (esquerda) e 2016 (direita).	76
4.8	Mapa da esquerda, H_S x DIR_{med} das ondas e mapa da direita H_S , e direção e intensidade do vento. Mapas gerados com as simulações do modelo WW3 para o dia 08 de dezembro de 2023.	78
4.9	Mapa da esquerda, T_P x D_P e mapa da direita P_W x D_P . Mapas gerados com as simulações do modelo WW3 para o dia 08 de dezembro de 2023.	78
4.10	Percentis climatológicos de H_S para os 33 pontos ao longo da costa S/SE, calculados a partir dos dados de reanálise <i>Waverys</i>	79
4.11	Percentis climatológicos de T_P para os 33 pontos ao longo da costa S/SE, calculados a partir dos dados de reanálise <i>Waverys</i>	80
4.12	Diagramas de Hovmoller para H_S , H_{SP} e T_P e seus respectivos percentis climatológicos, para o período de 08 a 12 de dezembro de 2023	82
4.13	Diagramas de Hovmoller para P_{PAR} , P_{PER} e P_W e seus respectivos percentis climatológicos, para o período de 08 a 12 de dezembro de 2023.	83
4.14	Fluxo de energia perpendicular a isobatimétrica de 100 metros (P_{PER}) para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023.	85

4.15 Fluxo de energia paralelo a isobatimétrica de 100 metros (P_{PAR}) para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023.	86
4.16 Fluxo de energia oblíquo a isobatimétrica de 100 m (P_{45}) para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023.	87
4.17 Espectro de onda para o ponto 10 localizado na costa do Rio Grande do Sul.	88
4.18 Espectro de onda para o ponto 21 localizado na costa do Rio de Janeiro. . .	88
4.19 Evolução do espectro direcional para o ponto 19 localizado na costa de São Paulo. Na imagem é possível identificar a amplitude das ondas para cada faixa de períodos (gaussianas coloridas) e a intensidade do vento (retângulos).	90
4.20 Clusterização pelo método <i>K-means</i> para a costa do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro.	92
4.21 Visualização 3D da clusterização.	93
4.22 Municípios catarinenses pertencentes a zona costeira.	98
4.23 Evolução sinótica do evento de ressaca que atingiu Itapoá no período de 10 a 15 de agosto de 2017.	102
4.24 Alagamentos em Itajaí (superior esquerdo e direito), danos na orla de Navegantes (inferior esquerdo) e alagamentos em Balneário Rincão (inferior direito).	103
4.25 Evolução sinótica do evento de ressaca que atingiu a maior parte da costa catarinense nos dias 27 a 29 de outubro de 2016.	105
4.26 Eventos de ressacas comprovados para o estado de Santa Catarina.	106
4.27 Prognóstico de ondas para o dia 21 de fevereiro de 2024. H_S X D_{MEDS} (esquerda) e T_P X D_P	109
4.28 Prognóstico do Fluxo de energia de ondas (P_w) e Direção de pico para o dia 21 de fevereiro 1200Z, para a costa S/SE. Rodada de 00Z18FEV2024.	110
4.29 Diagramas de Howmoller para valores de H_S (esquerda) e sua correspondência com o percentil climatológico (direita) para a rodada de 00Z18FEV2024. . .	111
4.30 Espectro direcional para a Boia Florianópolis do PNBOIA para os dia 21 de fevereiro 1200Z (superior) e PLEDS para a mesma posição pela rodada de 00Z18FEV2024 da NOAA.	111

4.31	Espectro direcional para a Boia Florianópolis do PNBOIA para os dia 21 de fevereiro 1200Z (superior) e PLEDS para a mesma posição pela rodada de 00Z18FEV2024 da NOAA.	112
4.32	Mapas dos principais parâmetros de ondas, gerados a partir das rodadas do WW3 realizadas pelo CHM.	115
4.33	Diagramas de Hovmoller para H_S (superior) e T_P (inferior) disponíveis na plataforma SisMOPreR.	115
4.34	Informações maregráfica em tempo real. Superior IBGE, inferior SIMCOsta.	116
4.35	Informações coletadas em tempo real e previsão do modelo WW3 disponíveis na plataforma SisMOPreR.	117
4.36	Informações espectrais disponíveis na plataforma SisMOPreR.	117
6.1	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio Grande do Sul.	155
6.2	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa de Santa Catarina.	156
6.3	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Paraná.	157
6.4	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa de São Paulo.	157
6.5	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio de Janeiro.	158

6.6	Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Espírito Santo.	159
6.7	Clusterização pelo método <i>K-means</i> para a costa do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo.	160
6.8	Visualização 3D da clusterização para a costa do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo.	161

Lista de Tabelas

4.1	Índices estatísticos obtidos entre a comparação dos dados coletados pelas boias e <i>Waverys</i>	66
4.2	Valores obtidos da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo SMM e <i>Waverys</i> (critério 1) para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul no ano de 2014.	70
4.3	Valores obtidos da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo SMM e reanálise <i>Waverys</i> (critério 2) para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul no ano de 2014.	71
4.4	Percentuais médios de avisos comprovados e cobertura de avisos, considerando o critério 1, para os 33 pontos.	72
4.5	Percentuais médios de avisos comprovados e cobertura de avisos, considerando o critério 2 para os 33 pontos.	73
4.6	Valores dos percentis para cada um dos 33 pontos, considerando os dois critérios.	81
4.7	Escala de classificação de eventos de ressaca para os estados da costa S/SE brasileira, contendo os valores para cada uma das variáveis que a compõem.	94
4.8	Eventos de ressaca no estado de Santa Catarina entre os anos de 2011 a 2021 registrados no Si2D e quantidade dos mesmos que foram classificados segundo a escala gerada.	97
4.9	Eventos de ressaca e sua classificação a partir da escala criada. Também é possível observar a energia total associada ao evento (E_{total}), o fluxo de energia máximo ocorrido (P_{Wmax}) e a direção média das ondas (Dir_{med}).	98

4.10	Eventos de ressaca que causaram danos financeiros que não se enquadraram no critério 1 e fases da lua correspondentes.	107
6.1	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul para os anos de 2011 a 2021. . .	137
6.2	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul para os anos de 2011 a 2021. . .	139
6.3	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa de Santa Catarina para os anos de 2011 a 2021.	142
6.4	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa de Santa Catarina para os anos de 2011 a 2021.	143
6.5	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Paraná para os anos de 2011 a 2021.	144
6.6	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Paraná para os anos de 2011 a 2021.	145
6.7	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa de São Paulo para os anos de 2011 a 2021.	145
6.8	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa de São Paulo para os anos de 2011 a 2021.	146
6.9	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Rio de Janeiro para os anos de 2011 a 2021.	148

6.10	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Rio de Janeiro para os anos de 2011 a 2021.	149
6.11	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Espírito Santo para os anos de 2011 a 2021.	151
6.12	Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Espírito Santo para os anos de 2011 a 2021.	153

Sumário

1. Introdução	27
1.1 Contextualização e apresentação da pesquisa	27
1.2 Objetivo geral do estudo	30
1.3 Objetivos específicos	31
2. Revisão Bibliográfica	33
2.1 Ondas oceânicas	33
2.2 Formação das ondas	33
2.3 Parâmetros característicos das ondas	35
2.3.1 Altura significativa de onda	37
2.3.2 Período da onda	38
2.3.3 Espectros direcionais de ondas	38
2.4 Fluxo de energia das ondas	39
2.5 Ressacas e suas definições	42
2.5.1 Como prever ressacas	43
2.6 Aspectos meteorológicos associados a ocorrência de ressacas e climatologia para a região de estudo	45
2.6.1 Aspectos meteorológicos associados a ressacas na costa S/SE	46
2.6.2 Climatologia de ondas	47
2.6.3 Climatologia da energia de ondas	49
2.7 Escalas de intensidade para tempestades costeiras	50
2.7.1 <i>K-Means</i> uma ferramenta para clusterização	52
2.7.1.1 Método do cotovelo (Elbow Method)	54

3. <i>Dados e Metodologia</i>	55
3.1 Base de dados utilizada	55
3.1.1 Waverys	55
3.1.2 PNBOIA	55
3.1.3 Avisos de ressaca	56
3.1.4 Informações vinculadas a eventos de Ressacas	56
3.2 Etapas Metodológicas	58
3.2.1 Validação da reanálise <i>Waverys</i> e avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM, quanto à efetiva ocorrência de ressacas	58
3.2.2 Climatologia e mapas de auxílio à tomada de decisão	61
3.2.3 Decomposição do fluxo de energia de ondas	62
3.2.4 Escala de classificação de ressacas para os estados da costa S/SE e validação com eventos confirmados	64
4. <i>Resultados e Discussão</i>	65
4.1 Validação da reanálise <i>Waverys</i>	65
4.2 Avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM	70
4.3 Ferramentas de auxílio a previsão de ressacas	77
4.3.1 Mapas com parâmetros característicos de onda	77
4.3.2 Percentis climatológicos e diagramas de Hovmoller	79
4.3.3 Decomposição do Fluxo de Energia de Ondas em componentes orto- gonais	84
4.3.4 Espectros direcionais de ondas	87
4.3.4.1 PLEDS - Plotagem da Evolução do Espectro Direcional	89
4.4 Escala de classificação para eventos de ressaca	91
4.4.1 Aplicação da escala para eventos de ressaca comprovados	95
4.4.1.1 Estado de Santa Catarina	96
4.4.1.2 Demais estados da costa S/SE	108
4.5 Roteiro para a previsão de ressacas	108
4.6 Sistema de Monitoramento de Ondas para a Previsão de Ressacas (SisMO- PreR)	114
5. <i>Conclusões</i>	119

<i>Referências</i>	123
6. ANEXO A	137
6.0.1 Comparações entre critérios	137
6.0.1.1 Costa do Rio Grande do Sul	137
6.0.1.2 Costa de Santa Catarina	142
6.0.1.3 Costa do Paraná	144
6.0.1.4 Costa de São Paulo	145
6.0.1.5 Costa do Rio de Janeiro	147
6.0.1.6 Costa do Espírito Santo	151
6.0.2 Séries Temporais	155
6.0.2.1 Rio Grande do Sul	155
6.0.2.2 Santa Catarina	156
6.0.2.3 Paraná	157
6.0.2.4 São Paulo	157
6.0.2.5 Rio de Janeiro	158
6.0.2.6 Espírito Santo	159
6.0.3 Escala de classificação de ressacas	160
6.0.3.1 Clusterização	160

Introdução

Neste capítulo serão apresentados a contextualização teórica, o objetivo geral, os objetivos específicos, a justificativa, a relevância e a viabilidade do estudo proposto. Também serão delineados a estrutura organizacional da dissertação e os temas a serem explorados em cada capítulo subsequente.

1.1 Contextualização e apresentação da pesquisa

Ressacas podem ser definidas como fenômenos de sobrelevação do nível do mar, de origem astronômica e meteoceanográfica. Quando combinadas à ação das ondas, essas elevações podem causar impactos significativos na costa, resultando em danos e prejuízos consideráveis (Lima et al., 2021; Parise et al., 2009). Esses eventos, dependendo de sua magnitude, frequentemente ganham destaque em diversos meios de comunicação (M. Lins-de Barros et al., 2018; Araujo et al., 2018). A origem do termo vem da palavra espanhola “resaca”, significando o fluxo e o refluxo das ondas do mar com lançamento de objetos pelas ondas na areia (saca) para, em seguida, trazer ou sugar de volta para o mar (resaca) (Gramática.net, 2023).

Comumente, é preciso a combinação de diversos fatores para a ocorrência de prejuízos mais significativos. Um desses fatores é o nível do mar mais elevado que o usual, podendo se dar por fenômenos astronômicos, geralmente associados a ocorrência de uma preamar de sizígia (Pugh, 1987) ou fatores meteorológicos como a passagem de frentes frias (Machado et al., 2019). Dessa forma, devido aos prejuízos que as ressacas podem causar, a capacidade de prevêê-las faz-se necessária para a segurança da navegação, a salvaguarda da vida humana no mar, a engenharia costeira e o planejamento urbano, sendo imprescindível entender seu

processo de formação de maneira interdisciplinar (Araujo et al., 2018).

Vanz e Fernandes (2012) analisaram os impactos das ressacas, especialmente em relação à proteção da vida humana no mar. Em seu estudo, que cobriu o período de 2009 a 2010 na costa sul do Brasil, foram identificados 26 acidentes marítimos, incluindo 11 naufrágios. Em relação às condições do mar, foi observado que 56% dos incidentes ocorreram com ondas superiores a 1,5 metros e, de forma surpreendente, os casos restantes aconteceram com ondas de altura inferior. As embarcações mais afetadas são as de pesca artesanal.

No Brasil, são atribuições do Serviço Meteorológico Marinho (SMM), a aquisição de dados e a produção de análises e previsões meteoceanográficas, como por exemplo, os avisos de ressaca, os quais são disseminados por meio de boletins e avisos de mau tempo, a fim de prover informações de segurança marítima na área sob responsabilidade do Brasil – METAREA V. De acordo com o Decreto nº 70.092, de 2 de fevereiro de 1972, a Marinha do Brasil é a instituição responsável pela prestação desse serviço, nos seguintes termos (Brasil, Marinha, 2023):

- É operado pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) por delegação de competência da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN); e
- Decorre dos compromissos assumidos pelo Brasil como Estado-Membro da Organização Meteorológica Mundial (OMM) e signatário da Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS);

Visando regulamentar as atividades atinentes à meteorologia marinha, a Marinha do Brasil criou a NORMAM-701, a qual estabelece que, na ocorrência de ondas com altura significativa (H_S) superior a 3 metros, para áreas costeiras, e de 4 metros ou superior, para as áreas oceânicas, sejam emitidos aviso de mau tempo. No caso de ondas que chegam a atingir a costa, esse valor passa a ser de 2,5 metros e avisos de possibilidade de ressaca são emitidos (Brasil, Marinha, 2023). Apesar das alturas serem bem acima do citado por Vanz e Fernandes (2012), esses valores são recomendações da OMM (World Meteorological Organization, 2018).

Atualmente, o SMM utiliza os resultados do modelo numérico de ondas *WAVEWATCH3* (WW3) para a tomada de decisão na emissão de avisos de mau tempo e de ressacas junto a costa (Brasil, CHM, 2024). O modelo é inicializado duas vezes ao dia (00Z e 12Z), podendo ser forçado pelos modelos globais GFS (*The Global Forecast System*), ICON (*Icosahedral*

Nonhydrostatic) e ICON-LAM (*Limited Area Mode*), e os resultados das simulações são disponibilizadas no site do CHM em formato de mapas (Brasil, CHM, 2024). A grade utilizada para a METAREA-V apresenta espaçamento de 9km, entretanto para a região costeira utiliza-se uma grade de maior resolução (BR-coast), aproximadamente 4km, sendo previstas variáveis como altura significativa de onda H_S , direção, período de pico (T_P), e direção média das ondas (Dir_{med}). Em proveito dessas simulações serão gerados novos produtos de auxílio a tomada de decisão quanto a ocorrência de ressacas.

Uma outra ferramenta muito utilizada, mas que foi descontinuada em 2019, é o Sistema de Previsão e Monitoramento Costeiro (SIMCos), desenvolvido pelo CPTEC. O projeto tinha como objetivo o estabelecimento de um sistema de monitoramento e previsão de variáveis que pudessem afetar as atividades costeiras e *offshore*, a partir da junção de diversos modelos numéricos como o WAVEWATCH, MOHID (*Water Modelling System*) e o WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) (Brasil, CPTEC, 2023). Essa iniciativa permitia monitorar 60 pontos localizados na isóbata de 100 metros espalhados ao longo de toda a costa brasileira e disponibilizava diagramas de *Hovmoller* dos principais parâmetros de onda, como também a associação desses valores ao ser percentil climatológico gerados por *hindcast* do WW3, para o período de 1979 a 2010. Outro parâmetro que o SIMCos disponibilizava era o fluxo de energia de ondas (P_W kW/m), bastante utilizado na engenharia oceânica e muito útil para a previsão de ressacas (Brasil, CPTEC, 2023).

O mesmo representa a quantidade de energia que atinge a costa por segundo, por metro longitudinal à linha de costa, e é calculado a partir dos parâmetros característicos das ondas, H_S , T , λ (Holthuijsen, 2007). Innocentini et al. (2014) propõem que P_W serve como um indicador confiável para prever a ocorrência de ressacas, estabelecendo um limiar de 31,25 kW/m para tal fenômeno. Araujo et al. (2018) prosseguem com essa linha de pesquisa, aplicando esse critério aos avisos de ressaca emitidos pelo SMM, com o intuito de validar, não apenas a ocorrência de ressacas sob esse limiar, mas também de identificar os padrões sinóticos associados a esses eventos. A investigação revelou que, dos 53 avisos analisados, 49 confirmaram a previsão de ressacas, correspondendo a uma taxa de acerto de 92,5%. Esta constatação reforça a viabilidade de P_W como um parâmetro viável para a predição de ressacas.

Possivelmente, o principal exemplo de aplicação prática do fluxo de energia das ondas seja pela engenharia oceânica, que o calcula para estimar a potência que pode ser extraída

por ondas na costa, para fins de geração de energia elétrica (Gunn e Stock-Williams, 2012; Espindola, 2017; Pegorelli et al., 2018).

No que tange ao emprego de P_W em estudos de ressacas, tempestades ou grandes ondulações, além dos trabalhos de Innocentini et al. (2014) e Araujo et al. (2018), pode-se citar Molina et al. (2019) que fazem a caracterização do fluxo de energia das tempestades ao longo da costa mediterrânea da Andalusia (ESP), bem como Carvalho et al. (2019) que avaliam dois métodos de caracterização de eventos de tempestade – Índice de Energia da Tempestade (*Storm Power Index (Dolan e Davis, 1992)*) e Energia Total das Ondas (E_{total}) e seus efeitos sobre as praias oceânicas entre a Ilha Grande e Cabo Frio no estado do Rio de Janeiro.

Diante dessas contribuições e reconhecendo-se a complexidade inerente aos eventos extremos marinhos, torna-se evidente a necessidade de aprimorar as ferramentas disponíveis para análise e gestão de riscos. Nesse contexto, a criação e a implementação de escalas robustas para a classificação de tempestades emerge como um passo crítico, uma vez que ao incorporarem uma diversidade de parâmetros – desde (H_S), passando pela velocidade dos ventos sustentada, até o raio da tempestade e a batimetria (Simpson, 1971; Dolan e Davis, 1992; Kantha, 2006; Jordan, 2008) –, refletem os esforços contínuos da comunidade científica em oferecer respostas mais precisas e abrangentes para os desafios impostos por tais fenômenos. Este trabalho, portanto, visa expandir as fronteiras do conhecimento nesse campo, propondo uma nova escala classificatória que tem como base P_W e posteriormente sua aplicação para eventos documentados no estado de Santa Catarina.

Diante do panorama apresentado, o presente estudo desdobra-se na seguinte pergunta de pesquisa **“Como desenvolver uma escala de classificação e ferramentas de previsão de ressaca para a costa S/SE do Brasil, com base no fluxo de energia das ondas ?”**.

1.2 *Objetivo geral do estudo*

O objetivo geral deste estudo é avaliar o fluxo de energia das ondas associado aos eventos de ressaca, ao longo das costas Sul e Sudeste do Brasil, bem como desenvolver uma escala para classificação desses eventos. Além disso, visa-se criar um produto operacional destinado a auxiliar na previsão de ressacas, o qual servirá como complemento aos modelos

de ondas já em uso.

1.3 Objetivos específicos

Para tanto, foram traçados os seguintes objetivos específicos:

- Validar os dados da reanálise *Waverys* (Law-Chune et al., 2021) com dados coletados *in-situ*, pelas boias de Rio Grande, Itajaí, Santos e Vitória, pertencentes ao Programa Nacional de Boias (PNBOIA);
- Avaliar os avisos de ressaca emitidos pelo Centro de Hidrografia da Marinha e comparar com os dados de reanálise, considerando dois critérios de ressaca: o primeiro, $H_S > 2.5\text{m}$ e o segundo $P_W > 31.25 \text{ kW/m}$, sugerido por Innocentini et al. (2014);
- Estabelecer locais de monitoramento ao longo da costa Sul/Sudeste e definir os percentis climatológicos para os principais elementos do sistema de ondas, bem como para P_W , de modo que se possa criar diagramas de Hovmöller. Esses diagramas irão correlacionar os percentis climatológicos, de forma a possibilitar o rastreamento dessas variáveis no decorrer do tempo e espaço;
- Plotar os espectros direcionais de ondas para os locais de monitoramento, em proveito das simulações do WW3 geradas pelo CHM;
- Decompor o fluxo de energia de ondas em componentes ortogonais, permitindo assim, uma análise mais precisa do potencial de erosão costeira;
- Criar uma escala de ressacas, a partir dos dados da reanálise *Waverys*, levando-se em consideração E_{total} , P_W e a direção, para cada estado da costa S/SE;
- Validar a escala de ressacas criada em cada estado, com as informações disponíveis no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (Si2D) (Brasil- SEPDEC, 2016);
- Desenvolver um roteiro detalhado para a tomada de decisão sobre a possibilidade de ressaca ao longo da costa e implementar um *website* que contemple a disponibilização de produtos auxiliares à tomada de decisão quanto à possibilidade de ressaca junto à costa.

Revisão Bibliográfica

2.1 Ondas oceânicas

Conforme descrito por Trujillo e Thurman (2011) e Espindola (2017), as ondas oceânicas manifestam-se por movimentações ascendentes e descendentes da superfície oceânica em uma localidade específica. Essas ondas podem variar desde pequenas ondulações até ondas gigantescas e altamente destrutivas, como os tsunamis, representando energia propagante na interface entre o oceano e a atmosfera.

As ondas oceânicas, originadas de tempestades, possuem a capacidade de transportar vastas quantidades de energia por grandes distâncias através da superfície oceânica. Esse transporte de energia culmina ao atingirem a costa, onde a energia contida nas ondas é dissipada durante o processo de arrebentação, resultando na erosão de praias e na destruição de estruturas artificiais (Espindola e Araújo, 2017). Esse fenômeno, frequentemente referido como ressaca, destaca o impacto significativo dessas ondas ao interagirem com a linha de costa (Espindola, 2017). No entanto, a ocorrência dos prejuízos mais significativos à costa não se dá apenas pela força das ondas; é necessário a conjunção de múltiplos fatores.

2.2 Formação das ondas

A formação das ondas inicia-se com a passagem dos ventos sobre os oceanos, um processo que transfere energia cinética do ar para a água. Essa interação entre o vento e a superfície do mar é fundamental na gênese das ondas. A quantidade de energia transferida depende da duração e intensidade com que o vento atua sobre a água, sugerindo que as ondas são, em essência, uma manifestação da energia eólica. Esta, por sua vez, origina-se da energia solar, continuamente renovada pela radiação solar e pelos processos

atmosféricos, destacando a conexão intrínseca entre as ondas, o vento e a energia solar (Dean e Dalrymple, 1991; Beserra, 2007).

Ao incidir sobre a superfície oceânica, o vento transfere momento, aplicando uma pressão que deforma a superfície da água. Esta deformação é um esforço da água para alcançar um novo estado de equilíbrio, resultando na formação de ondas que variam em frequência e direção. Assim, a interação vento-água não só gera ondas, mas também determina suas características (Trujillo e Thurman, 2011).

A teoria proposta por Phillips (1957) oferece um mecanismo detalhado para compreender esse fenômeno: as ondas são geradas pela ressonância entre a pressão do vento perpendicular à superfície do mar e a própria superfície da água que se propaga livremente. Este mecanismo resalta a importância da dinâmica entre a pressão atmosférica induzida pelo vento e a resposta adaptativa da superfície oceânica, culminando na formação de ondas (Holthuijsen, 2007).

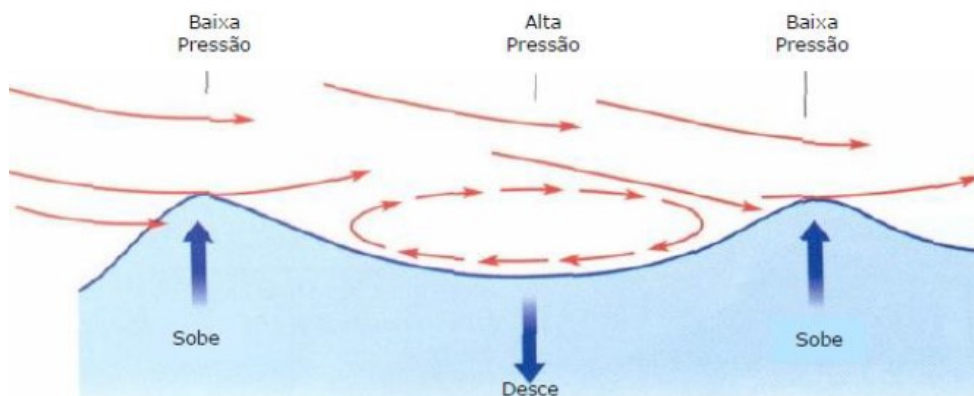


Figura 2.1: Transferência de energia do vento para o mar.

Fonte: Adaptado de (Trujillo e Thurman, 2011)

Na região onde as ondas são geradas, o vento mantém seu papel ativo, continuando a soprar e transferindo ainda mais energia para a superfície da água. Este processo contínuo de transferência de energia resulta na formação de ondas com diferentes períodos que, inicialmente, são pouco definidas. No entanto, com o passar do tempo e sob a influência constante do vento, os períodos e alturas dessas ondas tendem a aumentar, evidenciando um crescimento progressivo na definição e magnitude das mesmas (Dias da Silva, 2013).

Esta fase de crescimento ocorre na região de geração das ondas, onde a influência do vento é mais intensa. Aqui, as ondas são conhecidas como vagas, ou *sea* em inglês,

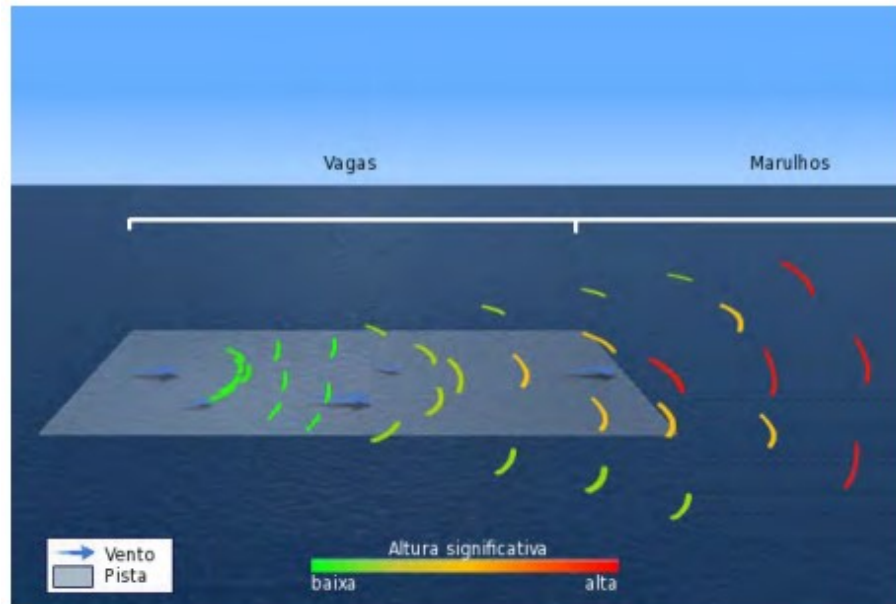


Figura 2.2: Esquema representativo da formação das ondas. Representação da região de formação das vagas (e a pista) e região dos marulhos.

Fonte: Adaptado de (COMET Program - UCAR, 2023)

caracterizadas por sua natureza inicialmente indefinida e a crescente definição à medida que ganham energia do vento (Soares, 2016).

Quando essas ondas começam a se afastar da região de geração, entram em um processo de dispersão. Durante a dispersão, ondas com períodos maiores viajam mais rapidamente que suas contrapartes mais curtas, levando à separação dos grupos de ondas com períodos semelhantes. Esse processo resulta em cristas de ondas que se tornam mais regulares e arredondadas, diferindo das características inicialmente formadas sob a direta influência do vento. As ondas que eventualmente deixam a área de influência direta do vento e se aproximam da costa são conhecidas como marulhos ou ondulações, e, no contexto do surf, são frequentemente referidas pelo termo em inglês *swell* (Soares, 2016).

2.3 Parâmetros característicos das ondas

O estudo das ondas oceânicas envolve a análise de parâmetros cruciais que definem suas características fundamentais: comprimento, altura e profundidade de propagação. Esses elementos são essenciais, pois permitem a dedução de outras propriedades importantes das ondas, como as velocidades e as acelerações induzidas, estabelecendo assim, uma base

sólida para a compreensão do seu comportamento no oceano (Dean e Dalrymple, 1991).

Contudo, para adentrar na complexidade das ondas marítimas, é necessário primeiro esclarecer o conceito de uma onda de maneira precisa. Muitas vezes, qualquer perturbação na superfície do mar é genericamente identificada como onda, uma noção que carece de precisão técnica. Uma onda, na sua definição mais rigorosa, é identificada pelo perfil de elevação da superfície do mar entre dois pontos de cruzamento zero consecutivos, ascendente ou descendente, conforme ilustrado na Figura 2.3 (Holthuijsen, 2007).

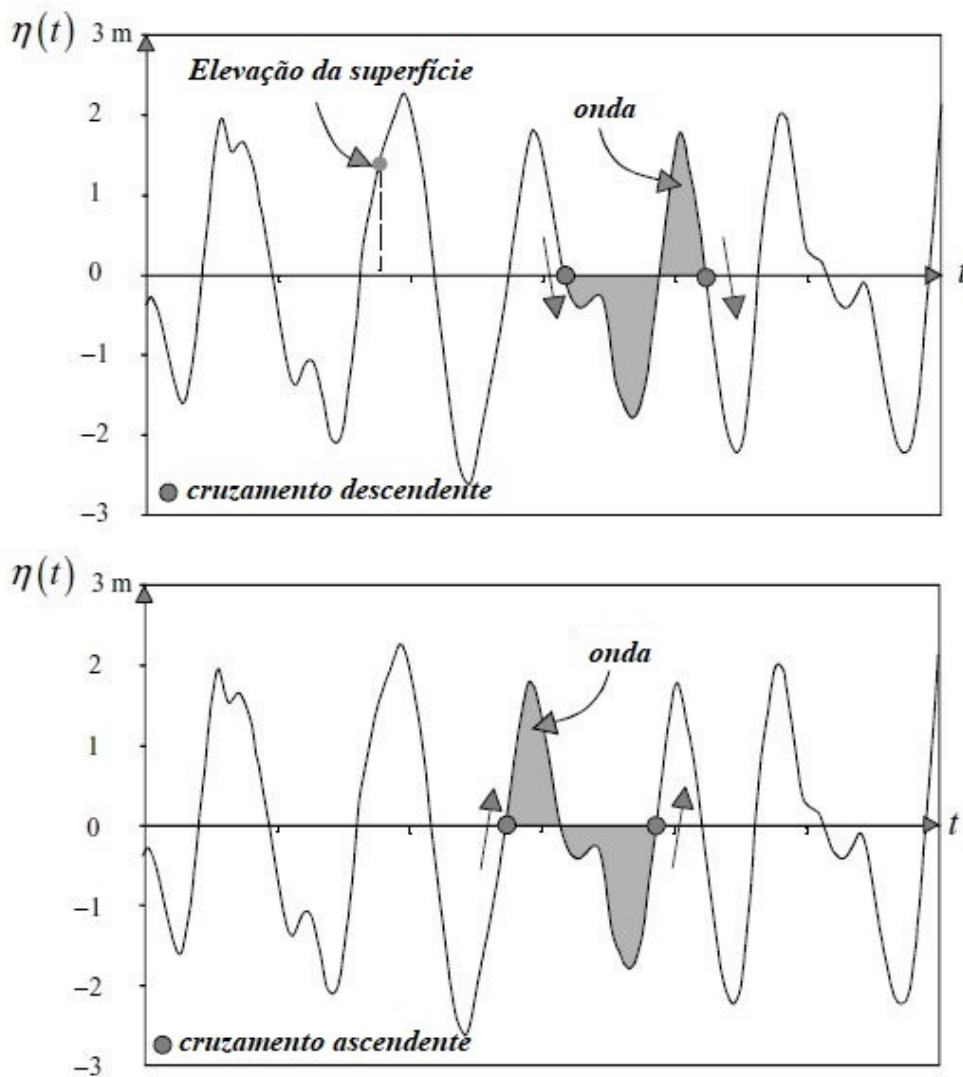


Figura 2.3: Definição de uma onda em um registro de tempo da elevação da superfície com cruzamentos por zero descendentes (painel superior) ou cruzamentos por zero ascendentes (painel inferior).

Fonte: Adaptado de (Holthuijsen, 2007).

Também referente à caracterização, Espindola (2017) cita que as ondas oceânicas são caracterizadas por parâmetros como H_S e T_P , obtidos através da análise dos momentos do

espectro de densidade de variância da onda, $E(f)$.

2.3.1 Altura significativa de onda

A altura significativa de onda (H_s) é o valor médio do terço superior das alturas de onda, medidas em um determinado intervalo de tempo, definida por Holthuijsen (2007) como sendo 2.1:

$$H_s = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j \quad (2.1)$$

Onde j , é o número de classificação da onda, com base na altura da onda, ou seja, $j=1$ será a onda mais alta registrada e N é o número de ondas registradas. Apesar da maneira incomum, utilizada para se caracterizar H_s , experimentos tem demonstrado que o valor encontrado pela Equação 2.1, se aproxima dos valores estimados visualmente.

Para Holthuijsen (2007), outra forma de se estimar a altura significativa é a partir do espectro de onda, 2.2, onde m_0 é o momento de ordem n do espectro $E(f)$. Entretanto, os valores obtidos costumam ser de 5% a 10% maiores que os calculados pela Equação 2.1.

$$H_s \approx H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.2)$$

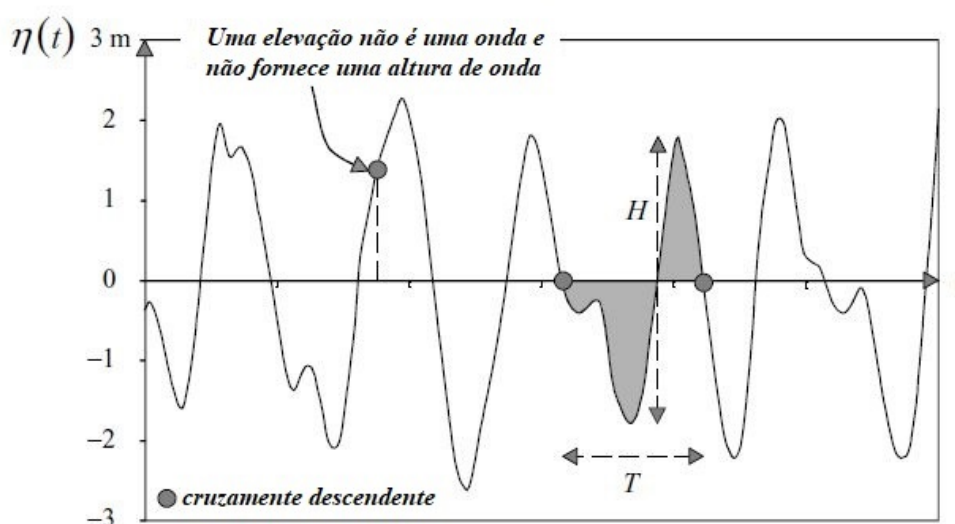


Figura 2.4: Definição da altura e do período da onda em um determinado registro de tempo.

Fonte: Adaptado de (Holthuijsen, 2007).

Outro parâmetro das ondas é a altura máxima (H_{MAX}) que podem atingir durante uma tempestade. Comumente esse valor é considerado (Holthuijsen, 2007):

$$H_{MAX} \approx 2H_S \quad (2.3)$$

2.3.2 Período da onda

O período T de uma onda pode ser naturalmente definido como o intervalo de tempo transcorrido entre o início e o fim da onda (entre o primeiro zero descende e o próximo). Uma vez que este período de onda é definido com cruzamentos de zeros, é denominado período de intersecção zero, T_0 (Holthuijsen, 2007).

Holthuijsen (2007), cita outros parâmetros utilizados para caracterizar o período da onda. Um deles é o período significante T_S (Equação 2.4), definido a partir do um terço das ondas mais altas, onde N e j são os mesmo que na definição de H_S .

Outro parâmetro é o período de pico T_P , que corresponde à frequência com maior densidade espectral (Dias, 2007), sendo um parâmetro importante por representar as ondas mais energéticas. No caso de marulhos, (*swell*) T_S é praticamente igual a T_P , já para vagas (*sea*) T_S é aproximadamente $0,95T_P$ (Holthuijsen, 2007).

$$T_s = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_{0,j} \quad (2.4)$$

2.3.3 Espectros direcionais de ondas

A importância das características direcionais das ondas do mar é destacada em diversos setores da ciência e engenharia, onde o espectro direcional das ondas se faz fundamental para simular condições marítimas realistas, visando à análise de interações com embarcações e estruturas marítimas (Mendes, 2005).

O espectro direcional $S(k)$ [ou $S(f,\theta)$] é uma ferramenta que quantifica como a energia das ondas se distribui em relação ao número de onda, k , (ou frequência, f) e direção. Isso permite identificar as várias fontes de energia das ondas no local observado, como as ondulações de tempestades distantes e as ondas formadas localmente pelo vento, por meio de uma análise do espectro direcional. A orientação da propagação energética das ondas e o período com maior energia são cruciais para várias aplicações práticas, incluindo o

design e a gestão de estruturas marítimas e costeiras, bem como a previsão de tempestades (Wyatt, 1997).

Holthuijsen (2007) destaca que para a obtenção de espectros direcionais, sejam uni ou bidimensionais, empregam-se técnicas como a análise de registros da variação do nível do mar. Esses registros são adquiridos diretamente no local (*in situ*) ou através de métodos de sensoriamento remoto e, em seguida, aplica-se Fourier. Adicionalmente, a previsão de espectros pode ser realizada utilizando modelos computacionais, os quais se baseiam em dados de entrada como ventos, marés e a topografia do fundo (Holthuijsen, 2007).

Como o objetivo deste trabalho é apenas transformar os espectros direcionais em uma ferramenta de auxílio à previsão de ressacas, a partir dos espectros direcionais produzidos pelas simulações do WW3, as quais são geradas pelo CHM, não haverá aprofundamento acerca da forma pela qual os mesmos são obtidos.

2.4 Fluxo de energia das ondas

A energia total contida em uma onda consiste do somatório entre a energia potencial (E_P), resultante do deslocamento da superfície livre e da energia cinética (E_C), devido ao fato de que as partículas de água em todo o fluido estão em movimento (Figura 2.5). Esse parâmetro, tal como sua transmissão, são importantes na determinação de como as ondas mudam ao se propagarem em direção à costa, bem como na energia necessária para sua geração (Dean e Dalrymple, 1991).

O fluxo de energia de uma onda de gravidade de superfície é uma grandeza vetorial que pode ser interpretada como a quantidade de energia que ultrapassa, por segundo, uma placa vertical imaginária, paralela à crista da onda, cujos lados são um metro horizontal e h metros verticais, onde h é a profundidade local (Araujo et al., 2018; Innocentini et al., 2014). Assim, sua unidade no Sistema Internacional de Unidades (S.I.) é $J s^{-1} m^{-1} = W/m$. Em outras palavras, ele representa a quantidade de energia que atinge a costa por segundo, por metro longitudinal à linha de costa.

De acordo com a teoria linear das ondas de gravidade de superfície (Airy, 1841), a magnitude do fluxo de energia (P_W) de uma onda na interface ar-mar é dada por:

$$P_W = \rho g \int_0^{\infty} C_g(f) E(f) df \quad (2.5)$$

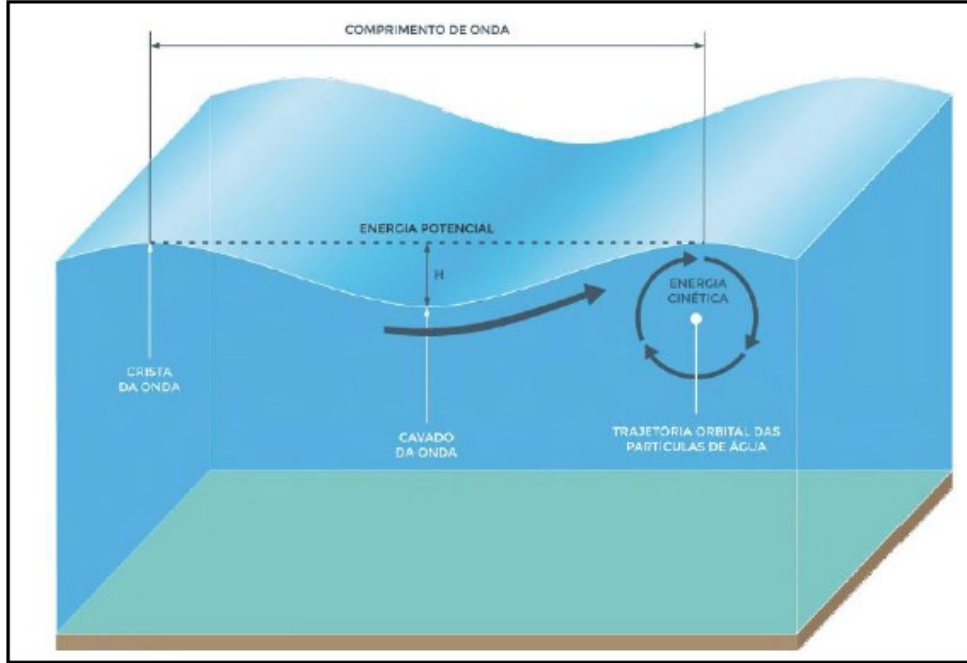


Figura 2.5: Esquema ilustrativo das energias potencial e cinética das ondas.

fonte: (Godoi e Harari, 2021)

Onde $C_g(f)$ é a velocidade de grupo da onda (unidades no S.I.: m/s), isto é, a magnitude da velocidade de propagação da energia da onda, g aceleração gravitacional, aproximadamente $9,81 \text{ m/s}^2$, f é a frequência, ρ é a densidade da água do mar, aproximadamente 1027 kg/m^3 e $E(f)$ o espectro de densidade de variância de frequência unidimensional.

Definindo a velocidade média do grupo:

$$\bar{C}_g = \frac{1}{E} \int_0^{\infty} C_g(f) E(f) df \quad (2.6)$$

onde,

$$\bar{E} = \int_0^{\infty} E(f) df \quad (2.7)$$

segue que,

$$P_W = \frac{\rho g \bar{C}_g H_s^2}{16} \quad (2.8)$$

sendo que,

$$H_S \approx 4\sqrt{\bar{E}} \quad (2.9)$$

e para águas profundas

$$C_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (2.10)$$

teremos:

$$P_W = \frac{\rho g H_s^2}{16} \frac{gT}{4\pi} = \left(\frac{\rho g^2}{64\pi} \right) * H_s^2 T \quad (2.11)$$

Como

$$\frac{\rho g^2}{64\pi} \approx 500 \frac{kg}{m \cdot s^4} \quad (2.12)$$

temos que, quando H_S é expresso em metros e T é expresso em segundos:

$$P_W = 0.5 H_s^2 T \frac{kW}{m} \quad (2.13)$$

A formulação apresentada acima pode ser encontrada em muitos livros, como por exemplo, Dean e Dalrymple (1991) e Holthuijsen (2007). Para Innocentini et al. (2014), as Equações 2.11 e 2.13 podem ser utilizadas como indicadores de possibilidade de ressaca. Nesse sentido, faz-se útil a definição de limites teóricos para H_S e para T_P , a partir dos quais um determinado evento requeira atenção especial.

Para uma interpretação mais intuitiva dos resultados, a potência de onda é convertida em altura significativa potencial (H_{SP}), que é definida como a altura que o sistema de ondas teria se seu período fosse uniformemente de 10 segundos. Assim, para um determinado sistema de ondas com um P_W específico, H_{SP} representa uma medida padronizada que facilita comparações diretas entre diferentes sistemas de ondas, independentemente de suas características de período originais. H_{SP} é dado por:

$$H_{SP} = \sqrt{\frac{P_W}{10 * 0.5}} (m) \quad (2.14)$$

Considerando que a NORMAM-701 prevê a emissão de avisos de possibilidade de ressaca em situações que H_S for superior à 2,5m que junto à costa, juntamente com o período de 10 segundos utilizado por Innocentini et al. (2014), obtém-se um valor para P_W de 31,25 kW/m, podendo ser considerado como limiar teórico, uma primeira aproximação do fluxo de energia incidente com potencial de causar condições de ressaca independente dos valores individuais de H_S ou T_P (Araujo et al., 2018).

As equações listadas acima são empregadas para águas profundas. Dean e Dalrymple (1991), trazem uma expressão para uma profundidade arbitrária. A mesma é obtida empregando-se a relação de dispersão na definição da velocidade de grupo (C_g) (Equação 2.15).

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = nc \quad (2.15)$$

No qual ω é a frequência em radianos e k o número de onda, n representa a relação entre a velocidade de grupo (C_g) e a velocidade da ondas c .

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad e \quad c = \frac{w}{k} \quad e \quad c = \frac{\lambda}{T} \quad (2.16)$$

Sendo h a profundidade local, é possível reescrever C_g com parâmetros como o comprimento de onda (λ) e do período (T).

$$C_g = \left[\frac{\lambda}{2T} + \frac{2\pi h}{T \sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)} \right] \quad (2.17)$$

Logo, o fluxo energia de ondas, considerando uma profundidade arbitrária é dado por:

$$P_W = \frac{\rho g H_S^2}{16T} \left[\frac{\lambda}{2} + \frac{2\pi h}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)} \right] \quad (2.18)$$

2.5 Ressacas e suas definições

Segundo o dicionário Michaelis (2024), a palavra ressaca significa o fluxo e refluxo das ondas, decorrente da agitação do mar. Já o dicionário Aulete (2024) a define como o forte movimento das ondas do mar ao se chocarem contra o litoral. Como já foi dito anteriormente, a origem do termo vem da palavra espanhola “resaca”, sendo “saca”, o lançamento de objetos pelas ondas na areia para, em seguida, trazer ou sugar de volta para o mar “re” (Gramática.net, 2023).

Na língua inglesa, o fenômeno conhecido como ressaca é referido como *Storm Surge*, que, segundo Pugh (1987), representa o aumento do nível do mar provocado por uma tempestade severa. De acordo com Murty (1984), as ressacas são caracterizadas por variações no nível da água de corpos costeiros ou interiores, com períodos de oscilação que variam de alguns minutos a vários dias, sendo essas flutuações resultantes da influência de forças atmosféricas.

O termo *Storm Surge* é amplamente empregado na literatura europeia para descrever as variações no nível da água do Mar do Norte, enquanto na literatura americana, expressões como maré de vento (*Wind Tide*) e maré de tempestade (*Storm Tide*) são utilizadas para referir-se ao mesmo fenômeno (Murty, 1984). Por outro lado, na literatura russa, as ressacas ou *Storm Surges* são conhecidas como maré meteorológica oceânica (*Meteorological Ocean Tide*), conforme descrito por Lappo e Rozhdestvenskiy (1977).

Lima et al. (2021) ampliam essa definição, caracterizando as ressacas como fenômenos que elevam o nível do mar devido à causas astronômicas e meteoceanográficas. Esses eventos, juntamente com a ação das ondas, produzem impactos significativos no litoral, podendo ocasionar danos e prejuízos consideráveis. De forma complementar, Bitencourt et al. (2002) ressaltam que o aumento do nível do mar é influenciado, principalmente, pela maré meteorológica, que causa o "empilhamento" de água na costa devido à ação do vento sobre a superfície marinha.

Além disso, Benavente et al. (2006) cita outros dois elementos que contribuem para o fenômeno de empilhamento de água: o efeito do barômetro invertido, desencadeado por centros de baixa pressão, e o aumento na altura de arrebentação das ondas, conhecido como *shoaling* ou empinamento. Esses fatores resultam em um elevado nível da água na zona de arrebentação, permitindo que as ondas alcancem áreas mais internas do que o usual.

Melo (2017) conduziu uma análise detalhada sobre o conceito de ressaca, propondo que esse termo seja utilizado especificamente para descrever eventos de ondas "grandes" na costa. Ele sugere que o critério para distinguir entre ondas "grandes" e "pequenas" deveria ser estabelecido com base na altura significativa das ondas (H_S), levando em consideração a climatologia de ondas do local. Segundo essa perspectiva, "ressaca" referir-se-ia, exclusivamente, às condições oceânicas relacionadas à ondas, sem associação com mau tempo, tempestades ou qualquer tipo de variação no nível do mar, seja ela de origem astronômica ou não. Essa proposta, fundamentada nas conclusões deste estudo, visa evitar confusões ao agrupar fenômenos de naturezas distintas sob a mesma denominação.

2.5.1 Como prever ressacas

Antes da era dos computadores, as técnicas utilizadas para previsão de ressacas eram analíticas, empíricas, gráficas (nomogramas) e estatísticas (relações de regressão) WMO

(2021). Com o surgimento do computador vieram os modelos numéricos de previsão, que até pouco tempo atrás eram basicamente bidimensionais, integrados verticalmente com três variáveis independentes, sendo elas as duas coordenadas horizontais e o tempo, e como variável dependente geralmente a amplitude da onda e as componentes x e y da corrente (WMO, 2021).

De acordo com a WMO (2021) e Resio e Westerink (2008), aproximadamente 75% dos modelos operacionais utilizados na previsão de ressacas são bidimensionais. Isso se deve ao fato de que os processos físicos que governam as ressacas são, em sua maior parte, bidimensionais por natureza. Por essa razão, o uso de modelos hidrodinâmicos de profundidade média tem se mostrado eficaz na produção de previsões precisas para esses eventos. Uma vantagem adicional desses modelos é sua flexibilidade, permitindo que sejam facilmente adaptáveis a diferentes regiões e escalas.

Em muitos países, os modelos de ressaca, tem apresentado resultados muito bons a ponto de serem utilizados operacionalmente. Para os Estados Unidos podemos citar três modelos, o SLOSH (*Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes*), desenvolvido pelo NWS (*National Weather Service*) Jelesnianski et al. (1992). O modelo de circulação costeira e de tempestade ADCIRC (*ADvanced CIRCulation*) (Luettich et al., 1992) desenvolvido na Universidade da Carolina do Norte, e que vem sendo utilizado por diversos órgãos federais como o Corpo de Engenheiros do Exército, NOAA, Guarda Costeira, Agência Federal de Gestão de Emergências entre outros. Os resultados da modelagem ADCIRC podem ser observados nesse endereço <https://cera.coastalrisk.live/>. Outro modelo que já vindo sendo utilizado a muito tempo é o CH3D-SMSS, (*Storm Surge Modeling System with Curvilinear-grid Hydrodynamics in 3D*) desenvolvido por Sheng (1986), atualmente na Universidade da Florida.

Na Europa, e mais especificamente nos Países Baixos, a previsão de ressacas é de vital importância. Desde a década de 1980, o Real Instituto de Tecnologia da Holanda tem empregado o modelo conhecido como DCSM (*Dutch Continental Shelf Model*) (Verlaan et al., 2005). Adicionalmente, o modelo Delft3D, fruto de uma iniciativa privada e caracterizado por ser de código aberto, também ganhou destaque pela sua ampla aplicabilidade na previsão de ressacas (Deltares, 2013).

No Brasil, o início da modelagem numérica de ressacas remonta aos anos 80, com destacada contribuição da Universidade de São Paulo, especialmente para a plataforma

SE brasileira. Entre esses estudos, destaca-se o trabalho de Camargo e Harari (1994), que utilizaram cartas sinóticas de pressão atmosférica e um modelo numérico tridimensional para modelar ressacas na região sudeste do Brasil, modelo esse inicialmente desenvolvido por Harari (1984). Ainda nessa região Ruiz et al. (2021), empregaram o modelo Delft3D para analisar ressacas ocorridas em 2016. Em Santos Ribeiro et al. (2018) criaram um sistema de alerta precoce para tempestades usando um modelo numérico bidimensional. Seguindo essa linha, Costa et al. (2020) desenvolveram o Sistema de Previsão Operacional de Santos (SOFS), uma plataforma totalmente automatizada destinada ao monitoramento e à previsão, em curto prazo (menos de 3 dias), de aspectos como elevação da superfície do mar, correntes, temperatura e salinidade no Sistema Estuarino Santos-São Vicente-Bertioga, baseando-se no *Princeton Ocean Model* (POM).

Embora diversos estudos tenham empregado a modelagem numérica para a previsão de ressacas, operacionalmente identificou-se apenas a utilização por parte da Defesa Civil dos municípios da Baixada Santista e também pela Praticagem do Porto de Santos (Ribeiro et al., 2018). Assim, a previsão de ressacas para as demais regiões da costa brasileira ocorre com a utilização dos modelos de onda, conforme praticado atualmente pelo Centro de Hidrografia da Marinha.

2.6 Aspectos meteorológicos associados a ocorrência de ressacas e climatologia para a região de estudo

O entendimento detalhado da climatologia e dos aspectos meteorológicos relacionados às ondas e à energia das ondas é fundamental para a elaboração de projetos de engenharia costeira e *offshore*, como portos e plataformas de petróleo. Esse conhecimento, especialmente a altura de onda em determinados períodos de retorno, é crucial para o design dessas estruturas, tanto em regiões próximas à costa quanto em mar aberto. Assim, para aprimorar o entendimento da área de estudo, é importante considerar os padrões climáticos e meteorológicos associados às ondas (Piumbini, 2009).

Nesta seção serão apresentados a climatologia de ondas e do fluxo de energia de ondas para a região de estudo, a fim de propiciar um melhor entendimento desses fenômenos.

2.6.1 Aspectos meteorológicos associados a ressacas na costa S/SE

Ao longo dos anos, vários estudos foram realizados com o intuito de determinar as condições atmosféricas associadas a eventos de ressaca na região S/SE do Brasil, entre os quais pode-se citar, (Parise et al., 2009), Gramscianinov et al. (2020) e Sondermann et al. (2023), os quais relacionam as grandes ondulações à presença de um centro de alta pressão sobre o continente e um centro de baixa sobre o oceano.

Para Gramscianinov et al. (2020), a posição do centro de alta em relação aos centros de baixa, exerce papel essencial na intensificação das tempestades, devido ao aumento do gradiente de pressão horizontal. Além disso, esse centro de alta interfere na velocidade de deslocamento do centro de baixa, que por sua vez, impacta no tamanho da pista e na intensidade dos ventos.

Durante essas tempestades, os ventos costumam ser predominantes do quadrante S/SW, ou seja, paralelos à costa e, devido ao transporte de Ekman (Ekman, 1905), ocasionam empilhamento de água junto a mesma, aumentando o nível do mar nessas regiões (Saraiva et al., 2003; Campos et al., 2010; Sondermann et al., 2023).

Ainda relacionado a padrões atmosféricos, Machado et al. (2019) buscou identificar os associados aos anos de ocorrência de El Niño, identificando quatro padrões atmosféricos considerados favoráveis à ocorrência de ressacas nos litorais S/SE do Brasil, sendo eles:

- Um sistema de baixa pressão atmosférica sobre o oceano, conhecido como ciclone extratropical, acompanhado por um sistema de alta pressão logo atrás do ciclone, criando o que é denominado “pistas de vento”.
- A presença de alta pressão pós-frontal localizada entre o litoral do Uruguai e da Argentina foi observada em 50% dos casos estudados, corroborando com os achados de estudos anteriores.
- Alta pressão pós-frontal desta vez com seu centro sobre o Uruguai, apresentou características sinóticas quase idênticas ao segundo padrão. No entanto, a localização dessa alta pressão se deu mais sobre o continente, o que resultou na predominância de ventos de sudoeste.
- Sistema de baixa pressão no continente, o qual foi considerado como um caso particular, pois ocorreu isoladamente. Além disso, a configuração sinótica que contribuiu

para este evento de ressaca, indicou a presença de um sistema de alta pressão ao sul do ciclone no continente, gerando um forte gradiente de pressão e ventos mais intensos no litoral do Rio Grande do Sul.

Pesquisas indicam que a ocorrência de tempestades é notavelmente mais intensa nas regiões sul e sudeste do Brasil, durante os meses de outono e inverno. Esse fenômeno é atribuído à combinação de frequentes processos ciclogênicos e à incursão de massas de ar frio, conforme documentado por Parise et al. (2009), Campos et al. (2010), Souza et al. (2019) e Tecchio et al. (2023).

Uma contribuição pioneira para os ciclones foi alcançada por, Gan et al. (1991), os quais identificam duas áreas principais de ciclogênese na América do Sul: uma na Argentina, ligada à instabilidade baroclínica dos ventos de oeste, e outra no Uruguai, associada à instabilidade baroclínica impulsionada pela presença dos Andes. Essa análise foi aprofundada por Reboita et al. (2010), que reconheceram uma terceira área significativa de ciclogênese na porção Sul-Sudeste do Brasil.

Em um estudo mais recente sobre essas regiões, Gramcianinov et al. (2019) conclui que as mesmas estão posicionadas; na costa central da Argentina, entre 55°S e 40°S; outra no nordeste argentino e região uruguaia adjacente ao estuário do Rio da Prata, em 30°S; e uma terceira ao longo da costa sul-sudeste do Brasil, variando entre 30°S e 25°S no verão e 35°S e 30°S no inverno.

2.6.2 Climatologia de ondas

Conforme descrito por Piumbini (2009) e Holthuijsen (2007), o regime de ondas de um local específico é determinado por meio de análises estatísticas realizadas sobre um extenso conjunto de dados de ondas, abrangendo um período considerável (superior a 10 anos). Geralmente, essas análises focam na avaliação da altura significativa das ondas, na análise de sua distribuição ao longo de extensos períodos e no cálculo de seus períodos de retorno.

Por causa da sua variabilidade em todas as escalas temporais, o clima de ondas de uma região não é algo simples de se determinar (Nogueira, 2014). Para Young (1999), a utilização de boias, escalares ou direcionais, podem fornecer uma boa estimativa do estado do mar, a partir de coletas com intervalo de amostragem de 20 a 30 minutos. Contudo,

financeiramente é muito custoso manter essas boias em funcionamento, de forma a se obter uma estimativa de longo prazo do clima de ondas de uma determinada região.

Devido à carência de dados coletados *in-situ*, a utilização de modelos numéricos para caracterizar o clima de ondas de determinados locais tem se demonstrado uma excelente ferramenta. Entre os trabalhos que utilizaram esses modelos, pode-se citar o de Pianca et al. (2010), que apresentam o clima de ondas para toda a costa brasileira, com base em uma série temporal de onze anos (Jan/1997-Dez/2007), obtida através de dados de reanálise do modelo operacional NOAA WAVEWATCH-III (NWW3); o de Dias da Silva (2013), que utiliza 31 anos de dados (1979-2010) gerados a partir de *hindcasts* do WW3, forçados pela reanálise CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) Saha et al. (2010). Ainda considerando toda a costa brasileira, Eguchi e Klumb-Oliveira (2023), caracteriza o clima para ondas de tempestade ($H_S > 2,5\text{m}$), utilizando 41 anos de reanálises do projeto ERA-5.

Em escala regional, Alves et al. (2009) reconstróem o clima de ondas para a costa S/SE do Brasil, para o período de janeiro de 1997 a dezembro de 2005, sendo chamado de “Reconstituição dos Campos de Onda Pretéritos no oceano Atlântico Sul (COPAS)”, utilizando-se os resultados do model (WW3), e Nogueira (2014), utiliza 15 anos (1996 - 2010) de simulações do modelo numérico WAVEWATCH III, para a Bacia do Espírito Santo, com o intuito de caracterizar o padrão climatológico e suas variabilidades mensais e sazonais. Ainda nessa região, Piumbini (2009), utiliza 45 anos de dados de reanálise do ECMWF, para determinar o clima de ondas de gravidade e de agitação marítima.

Para a Bacia de Campos, Parente (1999) e Parente et al. (2015), categorizam o estado do mar em: bom tempo; bom tempo com *swell*; mau tempo - com tempestade de SW; mau tempo - com tempestade de SE, a partir de 3.5 anos de dados coletados por boias.

Sintetizando os resultados para a climatologia de ondas da costa sul do Brasil, determinada por Pianca et al. (2010), observa-se para o verão, ondas predominantes de NE (28,4%) de S (26,7%), sendo que as ondas de NE apresentam alturas que variam entre 1 – 2 m (18,4%), com períodos de 6 – 8 s (16,3%) e as ondas de S, se aproximam da região com alturas entre 1 – 2 m (11,4%) e 2 – 3 m (10,9% com períodos de 8 – 10 s (9,6%) e 10 – 12 s (8,7%), ondas de L (22,2%) aproximam-se da região com alturas dominantes, variando entre 1 - 2 m (13,5%) e períodos de 6 – 8 s (12,9%).

Para o outono, a direção dominante das ondas é S (36,7%), com alturas entre 2 – 3 m

(14,1%) e períodos de 10 – 12 s (15,9%) e as ondas mais altas também são de S, atingindo até 7,3 m, e os períodos mais longos de SE, com 15s (Pianca et al., 2010).

Para o inverno a direção de incidência da onda dominante é S (30,2%), com alturas variando de 2 a 3 m (12,9%) e períodos de 10 – 12 s (12,5%). Em segundo lugar, são as ondas de NE (26,4%), com alturas entre 2 – 3 m (13%) e períodos de 6 – 8 s (17,5%). As ondas mais altas se aproximam da região pelo SW, atingindo 6,9 m (Pianca et al., 2010).

Já na primavera, existe a dominância das ondas de NE (35,2%), com altura variando de 1 a 2 m (16,4%) e 2 – 3 m (13,6%) e períodos de 6 – 8 segundos (23,1%). A ocorrência de ondas de S é de 25,5%, com alturas entre 1 – 2 m (10,4%) e entre 2 – 3 m (11,4%) e períodos de 8 - 10 s (11%). As ondas mais altas são de NE, com 5,9 m (Pianca et al., 2010).

Para a região SE, Pianca et al. (2010), conclui que a direção predominante das ondas no verão é de S (29,2%), com alturas entre 1 e 2 m (16,1%) e períodos de 10 a 12 s (11,3%). Em segundo lugar temos as ondas de L, que ocorrem durante 27% dos meses de verão com alturas entre 1 - 2 m (20,4%) e períodos de 6 - 8 s (18,3%). As ondas de NE e de SE contribuem de maneira semelhante, com (22,1% e 20,1%) e com alturas entre 1 - 2 m (16,7% e 12,9%, respectivamente) e períodos de 6 - 8 s (13,9%) e 8 - 10 s (10,4%), respectivamente.

No outono a direção dominante é de S (47,2%) com alturas entre 1 - 2 m (19,6%) e 2 - 3 m (18,7%) e períodos de 10 - 12 s (20,7%). Para o inverno as ondas de sul continuam sendo dominantes (38,1%) com alturas entre 2 - 3 m (17,1%) e períodos períodos de 10 - 12 s (16%). As ondas de L contribuem com 27% com alturas entre 1 - 2 m (13,3%) e 2 - 3 m (11,3%) e períodos períodos de 6 - 8 s (14,7%) (Pianca et al., 2010).

Por fim, a primavera tem ondas de L dominando com 33,7% com alturas entre 1 - 2 m (20,1%) e períodos de 6 - 8 s (23,8%). Além disso ondas de S (27,9%) apresentam alturas entre 1 - 2 m (12,9%) e 2 - 3 m (12,3%) e períodos de 8 - 10 s (9,2%) e 10 - 12 s (7,8%) (Pianca et al., 2010).

2.6.3 Climatologia da energia de ondas

Nas últimas décadas, o mundo tem buscado encontrar soluções energéticas ambientalmente sustentáveis. Para isso, um grande esforço científico foi feito em pesquisas sobre energia eólica, solar, biomassa, ondas e outras fontes renováveis (Espindola e Araújo, 2017).

Em escala global, vários estudos foram conduzidos visando avaliar o potencial energético das ondas, entre eles Gunn e Stock-Williams (2012), que realizaram a quantificação das fontes de fluxo de energia de ondas global, a partir da utilização de dados do modelo WW3. Para a América do Sul, pode-se listar o estudo de López et al. (2015), que executaram a primeira avaliação do recurso de energia das ondas no Peru. Nesse mesmo ano, Alonso et al. (2015), conduziram também a quantificação dos recursos de energia das ondas no Uruguai, utilizando 31 anos de *hindcasts* do WW3.

Em relação à climatologia da energia de ondas para a costa brasileira, destacam-se os trabalhos de Espindola e Araújo (2017), que efetuaram a caracterização dos recursos de energia das ondas para toda a costa, utilizando trinta e cinco anos de dados de reanálise do projeto ERA-Interim, e de Pegorelli et al. (2018), que estimaram o potencial energético das ondas na costa brasileira, usando dados de boias do PNBOIA e 10 anos de previsões (2005 a 2015) do WW3.

Como esperado, a costa S/SE apresenta os maiores valores de fluxo de energia de ondas. Isso se deve, principalmente, à ação das frentes frias que atuam nessa região e à ação dos ventos gerados pela alta subtropical do Atlântico Sul (Pegorelli et al., 2018). Colaborando com os resultados de Pegorelli et al. (2018), Espindola (2017) identifica o inverno como a estação mais energética e associa isso à intensificação dos fenômenos atmosféricos, fato que também justifica o aumento de H_S e T_P .

2.7 Escalas de intensidade para tempestades costeiras

Segundo Mendoza et al. (2011), uma tempestade pode ser caracterizada como uma perturbação atmosférica violenta acompanhada de ventos fortes, entre outros elementos. Quando isso acontece no mar, as consequências imediatas são o aumento da altura das ondas e, por vezes, do nível do mar (*storm surge*). Esses fenômenos provocam uma série de respostas morfodinâmicas, como a erosão de praias e a inundação de zonas baixas, o que gera consequências importantes na geomorfologia costeira.

A magnitude desses processos é proporcional ao conteúdo energético da tempestade (Mendoza et al., 2011), ou seja, dependerá da altura das ondas, as quais são controladas por fatores como a duração, a intensidade e a pista de ventos (Holthuijsen, 2007; Eguchi e Albino, 2022). Como consequências desses processos, observam-se os danos nas infra-

estruturas existentes, a perturbação dos ecossistemas costeiros e um efeito negativo na utilização costeira em geral (Mendoza et al., 2011).

Segundo Orejarena-Rondón et al. (2022), grande parte dessa energia é perdida no oceano superior por mecanismos turbulentos, mas a maior parte da energia é dissipada numa zona estreita perto da costa, conhecida como zona de arrebentação. A arrebentação das ondas na referida zona induz à dinâmica costeira, onde correntes intensas transportam sedimentos em direção à costa ou ao o mar, bem como ao longo da costa, promovendo alterações morfológicas contínuas (Orejarena-Rondón et al., 2022).

Mendoza et al. (2011) citam que uma forma de estimar o impacto causado por esses fenômenos é a utilização de uma escala de intensidade de tempestades, em que cada tempestade é associada a uma determinada classe, em termos de uma variável que caracteriza o seu potencial de risco.

Como exemplos de escalas, pode-se citar a utilizada para furacões, de Saffir-Simpson (Simpson, 1971; Saffir, 1977), que se baseia na velocidade sustentada dos ventos e que continua sendo utilizada até hoje. Em 2006, Kantha (2006) propõe uma nova escala, visto que três (Katrina, Rita e Wilma), dos quatro furacões que atingiram a Costa do Golfo do México em 2005, chegaram à categoria 5, causando danos graves, bem como a perda de vidas. Para seu índice (*Hurricane Surge Index* - HSI), Kantha (2006) considera o raio da tempestade com ventos de furacão (R), a intensidade do vento máximo sustentado V_{Max} e duas constantes normalizadas, $R_0 = 60\text{km}$ e $V_{Max0} = 33 \text{ m/s}$

$$HSI = \left(\frac{R}{R_0} \right) \left(\frac{V_{\max}}{V_{\max0}} \right)^2 \quad (2.19)$$

Jordan (2008) desenvolveu um novo índice para tempestades tropicais, levando-se em consideração ventos máximos, raio de ventos máximos, pressão, velocidade de translação e batimetria do local. Com o passar dos anos, outros fatores foram incorporados de forma a mensurar de maneira mais eficaz a intensidade das tempestades. É o caso do *Storm Surge Hazard Potential Index* - (SSHPI), desenvolvido por (Islam et al., 2021), que utiliza parâmetros que são frequentemente disponibilizados em tempo real, como a intensidade máxima do vento, o raio do vento de 50 kt, a velocidade de translação da tempestade, a geometria costeira e a batimetria do local.

Buscando mensurar a magnitude de tempestades extratropicais, que diferentemente dos furacões, possuem ventos de menor intensidade (10 a 25 m/s), deslocamento lento e

duração de vários dias, mas que originam ondas com alturas próximas a das tempestades tropicais, Dolan e Davis (1992) propõem uma escala que considera H_S e o tempo de duração, denominado-o de *Storm Power Index* (SPI). A escala é dividida em cinco classes: fraca, moderada, significativa, severa e extrema (Dolan e Davis, 1992).

$$SPI = \int_{t_1}^{t_2} (H_S)^2 dt \quad (2.20)$$

Adotando uma abordagem distinta, Molina et al. (2019) utilizam o fluxo de energia das ondas (P_W), definido na equação 2.11 e a duração dos eventos (d_i), para classificar as tempestades na costa da Andaluzia, na Espanha, separando-as nas mesmas cinco classes, que Dolan e Davis (1992).

$$E_{Total} = \int_0^{d_i} (P_W) dt \quad (2.21)$$

Kümmerer et al. (2023) citam que os limiares de tempestade são muitas vezes selecionados arbitrariamente e, além disso, ocorre subjetividade na definição das escalas de intensidade (Dolan e Davis, 1992). A forma de classificação dos conjuntos de dados gerados também costuma variar de autor para autor. Por exemplo, Molina et al. (2019) utilizam para classificar seus eventos de tempestade, a técnica desenvolvida por JENKS e CASPALL (1971), denominada *Natural Breaks*, também conhecida como *Jenks Optimization*. Trata-se de um método de classificação de dados estatísticos que busca reduzir a variância dentro das classes e maximizar a variância entre as mesmas. Dolan e Davis (1992) utilizam a técnica de clusterização, chamada de *average linkage* (média das ligações), sendo que a semelhança entre clusters é a distância média entre todos os pares de observações entre dois clusters.

Para o presente estudo será adotada a técnica de clusterização denominada *K-means*, a qual será detalhada no item seguinte.

2.7.1 *K-Means* uma ferramenta para clusterização

O *K-means* é uma técnica de clusterização desenvolvida por MacQueen (1967), que se destaca por sua simplicidade e eficácia, sendo amplamente utilizada em uma variedade de campos, incluindo mineração de dados, aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões. O algoritmo particiona um conjunto de dados em K grupos distintos, garantindo

que cada ponto pertença ao grupo com a média mais próxima (Jain, 2010). Essa abordagem interativa minimiza a soma dos quadrados das distâncias entre os pontos e os centroides de seus respectivos *clusters*, o que torna o *K-means* particularmente eficiente para identificar estruturas agrupadas em grandes conjuntos de dados (MacQueen, 1967).

Dentre as vantagens significativas do *K-means*, destacam-se sua facilidade de implementação e a rapidez com que pode processar grandes conjuntos de dados. No entanto, a escolha do número de *clusters* (K) pode afetar substancialmente os resultados. Além disso, métodos como o "*Elbow Method*" (Método do cotovelo) são comumente aplicados para determinar um K apropriado (Tibshirani et al., 2001). Às vezes, o *K-means* também pode convergir para mínimos locais ou ser sensível a *outliers*. Tal fato motivou o desenvolvimento de variações robustas do algoritmo (Arthur e Vassilvitskii, 2007).

Essa técnica de agrupamento tem encontrado aplicações diversificadas em estudos de meteorologia e oceanografia, dada a sua capacidade de lidar com grandes conjuntos de dados e identificar padrões distintos dentro deles. Por exemplo, Hartigan e Wong (1979) o aplicaram na análise de dados meteorológicos para identificar padrões climáticos regionais, revelando tendências e variações no clima que poderiam não ser imediatamente aparentes. Em oceanografia, por exemplo, o mesmo foi empregado no reconhecimento de padrões de concentração de clorofila, durante o verão no mar do norte da China, com o emprego de imagens de satélite, (Kim et al., 2009).

Um estudo conduzido por Steinley (2006) demonstrou a eficácia do *K-means* na classificação de eventos extremos de temperatura e precipitação, o que é crucial para o planejamento de resposta a desastres naturais e à gestão agrícola. Adicionalmente, a pesquisa de Liu e Weisberg (2005) o empregou para examinar padrões de circulação oceânica, contribuindo para um melhor entendimento das dinâmicas costeiras e processos de ressurgência.

Em se tratando de ressacas, pode-se citar o trabalho realizado por Sondermann et al. (2023), no qual o *K-means* foi utilizado para analisar padrões de ressacas na costa do Estado de São Paulo. Esse trabalho se concentrou na identificação das condições atmosféricas em larga escala, as quais acabam favorecendo tais eventos. Nesse mesmo viés, Laviola da Silva et al. (2023) o utiliza para caracterizar os padrões atmosféricos associados a eventos extremos de ondas, para a costa S/SE brasileira.

É evidente que a flexibilidade do *K-means*, quando aplicada a dados ambientais, pode desempenhar um papel fundamental na previsão e no monitoramento de fenômenos meteo-

rológicos e oceânicos, ajudando na formulação de estratégias de mitigação e adaptação, em face das mudanças climáticas e seus impactos nos sistemas terrestres e marinhos (Cheng e Bernstein, 2018).

2.7.1.1 Método do cotovelo (Elbow Method)

O método do cotovelo é uma técnica utilizada para determinar o número ideal de *clusters* em análises de *K-means*. A essência do método é a análise da variação percentual da soma das distâncias quadradas entre os pontos e o centro do *cluster* em função do número de *clusters*. Como destacado por Ketchen e Shook (1996), essa abordagem possibilita aos pesquisadores determinar uma quantidade de *clusters*, tal que, a inclusão de um adicional não resulta em um aprimoramento significativo do modelo. Esse procedimento é especialmente valioso em contextos nos quais a configuração dos dados não é explicitamente evidente, contribuindo para prevenir tanto a excessiva, quanto a insuficiente agrupação.

Syakur et al. (2018) ressaltaram a relevância do método do cotovelo em sua pesquisa sobre a aplicação de *K-means* para agrupamento geoespacial. Evidenciaram que a utilização dessa técnica permitiu a identificação de um ponto de inflexão, indicativo do número ótimo de *clusters*. Esse ponto, muitas vezes analogizado ao “cotovelo” de um braço, denota o momento em que o declínio na soma das distâncias internas aos *clusters* passa a ser menos acentuado (Figura 2.6).

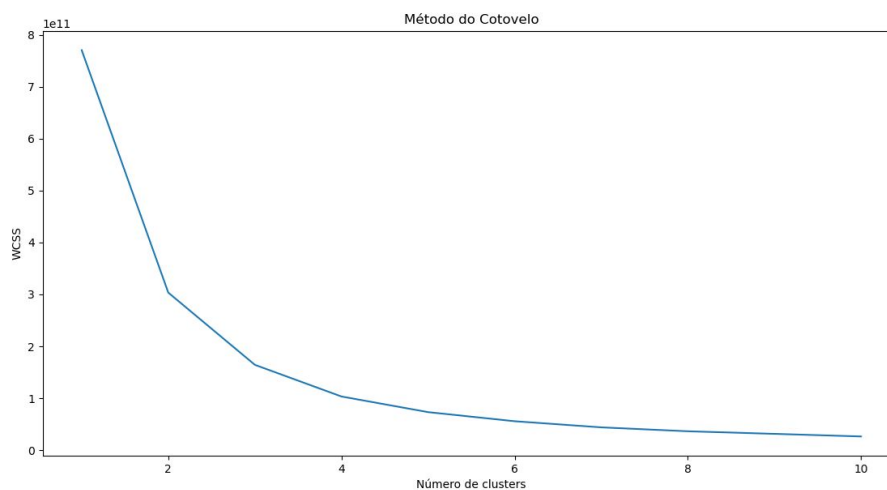


Figura 2.6: Representação gráfica da aplicação do método do cotovelo para determinação da quantidade ideal de *clusters*.

Dados e Metodologia

3.1 Base de dados utilizada

3.1.1 Waverys

Para este estudo foram empregados os dados do *Waverys* (Law-Chune et al., 2021), uma ferramenta do *Copernicus Marine Service*, que fornece informações sobre o campo de ondas global, com um espaçamento de grade de $0,2^\circ$, abrangendo o período de 1993 a 2021, com dados disponibilizados a cada 3 horas. Adicionalmente, ela assimila dados do campo de ondas e espectros direcionais coletados pelo satélite Sentinel-1.

Dentro das pesquisas realizadas para comparar as reanálises Waverys e ERA-5, destacam-se os trabalhos de Law-Chune et al. (2021), que analisaram (H_S), comparando ambas as reanálises com dados de altimetria do satélite HY-2A e registros de boias. Por outro lado, Fanti et al. (2021) focaram em avaliar não apenas H_S , mas também (T_P), o período médio (T_M) e a direção média das ondas (Dir_M), utilizando dados de boias e comparando-os com as mesmas reanálises, especialmente em condições extremas de onda. Os resultados desses estudos indicaram que a reanálise *Waverys* apresenta desempenho superior ao do ERA-5, com melhores parâmetros estatísticos, o que justifica a preferência por sua utilização em análises subsequentes.

3.1.2 PNBOIA

Para avaliar a reanálise *Waverys*, utilizou-se os dados fornecidos por quatro boias do PNBOIA: Rio Grande, fundeada na longitude $49,86^\circ\text{W}$ e latitude $31,53^\circ\text{S}$; Itajaí, na longitude $47,52^\circ\text{W}$ e latitude $28,48^\circ\text{S}$; Santos, na latitude $25,28^\circ\text{S}$ e longitude $44,92^\circ\text{W}$ e Vitória, na latitude $19,93^\circ\text{S}$ e longitude $39,70^\circ\text{W}$, conforme ilustrado na 3.1. O intervalo dos dados

disponibilizados pelo CHM variam de acordo com a boia, sendo a série mais extensa a da boia de Rio Grande, que abrange de 2009 a 2018. Notou-se a ausência de dados em períodos prolongados para todas as boias mencionadas.

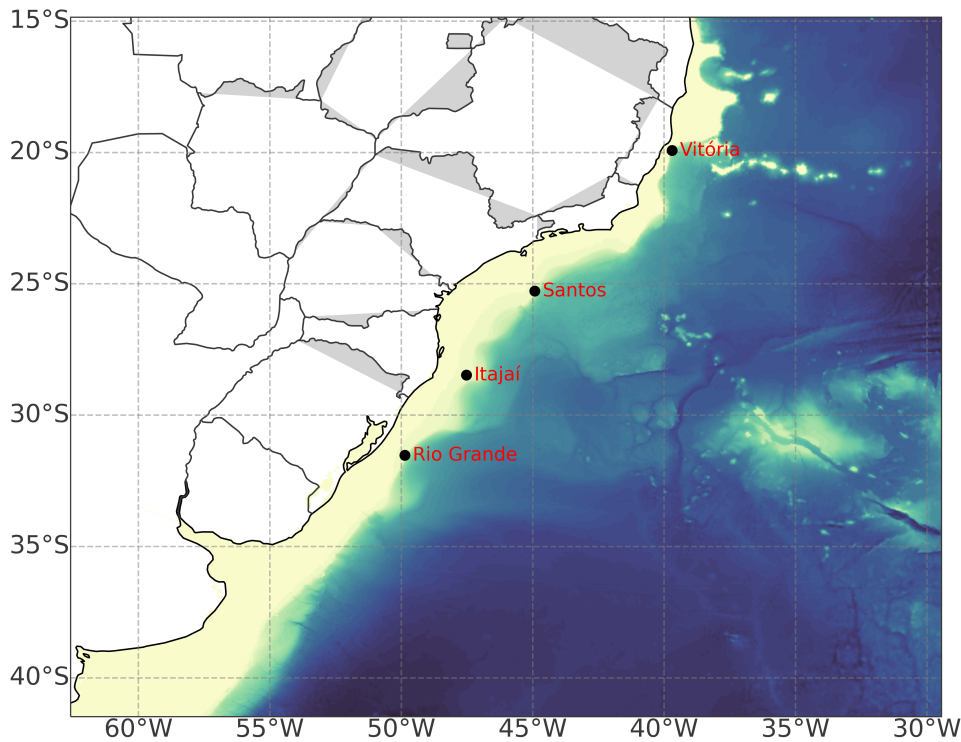


Figura 3.1: Localização das boias do PNBOIA utilizadas na validação da reanálise *Waverys*

3.1.3 Avisos de ressaca

Os Avisos de ressaca utilizados nesse estudo foram fornecidos pelo CHM e abrangem o período de 2011 a 2021. Dentre as informações disponibilizadas nos referidos avisos citam-se as regiões de ocorrência da ressaca, direções e alturas esperadas, além da data e hora de início do aviso e sua validade. Na figura 3.2 é apresentado o aviso de ressaca emitido no dia 21 de setembro de 2021. As informações contidas nos avisos foram organizadas por ano e por estado.

3.1.4 Informações vinculadas a eventos de Ressacas

De forma a verificar a efetiva ocorrência das ressacas e validar os avisos emitidos pelo SMM, utilizou-se as informações disponibilizadas pelo Sistema Integrado de Informações Sobre Desastres (Si2D)(Brasil-MDR, 2021). Esse sistema foi elaborado pela Secretaria

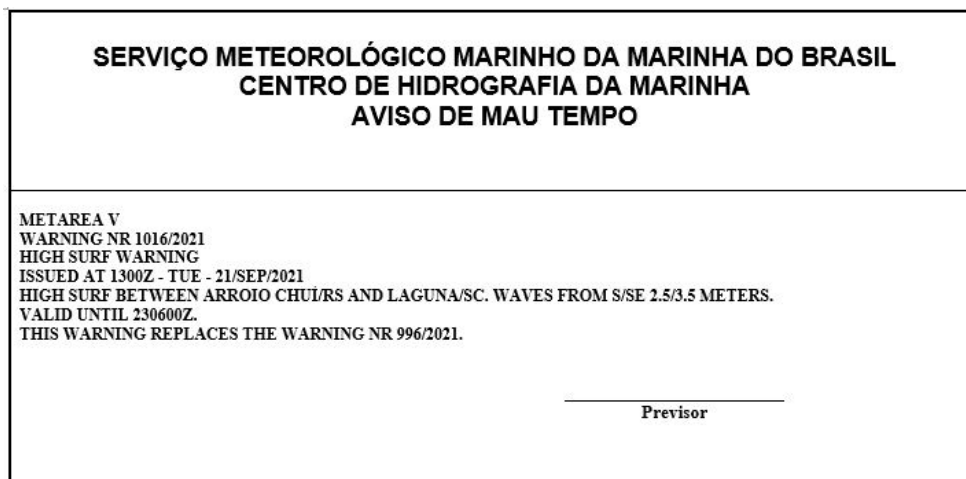


Figura 3.2: Aviso de ressaca emitido pelo SMM

Fonte: (Brasil, CHM, 2024)

Nacional de Proteção e Defesa Civil, do Ministério da Integração Nacional (SEDEC/MI), juntamente com o Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (CEPED UFSC), com vistas a qualificar os dados e as informações sobre desastres, de maneira a fornecer subsídios à gestão de riscos e desastres no Brasil.

O Si2D tem como objetivo qualificar e dar transparência à gestão de riscos e desastres no Brasil, por meio da informatização de processos e disponibilização de informações sistematizadas (Brasil Defesa Civil, 2024), ficando a cargo de estados e municípios fomentarem as informações (Defesa Civil- RS, 2012). No S2iD é possível:

- Registrar desastres ocorridos no município/estado;
- Consultar e acompanhar os processos de reconhecimento federal de situação de emergência ou de estado de calamidade pública;
- Consultar e acompanhar os processos de transferência de recursos para ações de resposta;
- Consultar e acompanhar os processos de transferência de recursos para ações de reconstrução; e
- Buscar informações sobre ocorrências e gestão de riscos e desastres, com base em fontes de dados oficial.

3.2 Etapas Metodológicas

Os procedimentos metodológicos apresentados abaixo foram empregados de forma que os objetivos gerais e específicos deste estudo fossem atendidos.

3.2.1 Validação da reanálise *Waverys* e avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM, quanto à efetiva ocorrência de ressacas

Ao longo das últimas décadas, diversas reanálises de ondas, tanto globais quanto regionais, têm sido desenvolvidas e aprimoradas a partir da assimilação de dados atmosféricos e oceanográficos obtidos por meio de modelos numéricos, satélites e observações *in-situ*. A confiabilidade e a aplicabilidade dessas reanálises para análise dos riscos costeiros têm aumentado significativamente, conforme destacado por (Muis et al., 2016; Fanti et al., 2021). De acordo com Fanti et al. (2021), dentre as opções disponíveis, a reanálise de ondas *Waverys* apresenta um melhor desempenho em relação a reanálise ERA-5, ou seja, representa melhor os principais parâmetros de onda. Crespo et al. (2023) complementam essa avaliação, apontando que a *Waverys* oferece uma representação mais fidedigna da velocidade do vento e da altura significativa das ondas (H_S).

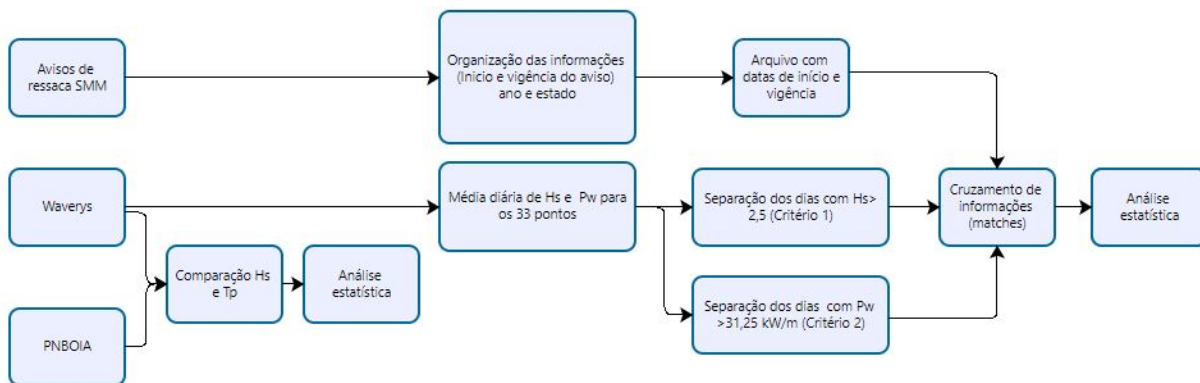


Figura 3.3: Fluxograma da metodologia aplicada para a validação da reanálise *Waverys* e avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM.

Para validar a reanálise *Waverys*, e avaliar os avisos de ressaca emitidos pelo SMM, seguiu-se a metodologia apresentada no fluxograma da Figura 3.3, sendo a primeira etapa à comparação com os dados coletados pelas boias de Rio Grande, Itajaí, Santos e Vitória, pertencentes ao PNBOIA. A validação ocorreu apenas para as variáveis H_S e T_P . Subsequentemente, foram empregadas as métricas estatísticas abaixo, aos moldes de Hallak e Pereira Filho (2011).

1. Erro Médio (Viés ou ME ou BIAS em inglês)

Sendo W uma variável qualquer e d_i a diferença entre o observado e o previsto ou simulado no ponto i do espaço bidimensional ($i = 1, 2, 3, \dots, N$) no tempo t [$W_{ip} = W(x,y,t)$] e o medido ou observado para uma mesma variável, no mesmo ponto no espaço e no tempo [$W_{io} = W(x,y,t)$]. O viés permite avaliar se o dado simulado tem tendência de superestimar ou subestimar em relação ao observado. Esta tendência também é chamada de erro sistemático.

$$d_i = W_{is} - W_{io} \quad (3.1)$$

$$ME = BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (3.2)$$

2. Erro Absoluto Médio (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |d_i| \quad (3.3)$$

O MAE, por considerar valores absolutos da diferença, elimina o problema ocasionado por erros individuais positivos e negativos. Dessa forma, por ser menos afetado por pontos com valores anormalmente extremos (*outliers*), é considerado preciso e robusto, como medida da habilidade de simulações reproduzirem a realidade.

3. Erro Quadrático Médio (MSE)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{is} - W_{io})^2 \quad (3.4)$$

O MSE é similar ao MAE, porém mais sensível aos grandes erros, por elevar as diferenças individuais ao quadrado. MSE é sempre positivo.

4. Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (W_{is} - \hat{W}_{io})^2} \quad (3.5)$$

O RMSE, em adição ao MSE, é usado para expressar a acurácia dos resultados simulados e tem a vantagem de apresentar os valores do erro nas mesmas dimensões da variável que está sendo analisada.

5. Erro Quadrático Médio dispersivo e dissipativo (MSE_{DIS} e MSE_{DISS})

Takacs (1985) divide o MSE em dois termos, sendo um dissipativo (ou de fase) e o outro dispersivo (ou de amplitude):

$$MSE_{DISS} = [\sigma(W_{io}) - \sigma(W_{is})]^2 + (\bar{W}_{io} - \bar{W}_{is})^2 \quad (3.6)$$

$$MSE_{DISP} = 2(1 - \rho)\sigma(W_{io})\sigma(W_{is}) \quad (3.7)$$

Onde σ representa o desvio padrão da variável analisada, enquanto ρ denota o coeficiente de correlação espacial (CCE) entre os campos horizontais de W_{io} e W_{is} .

$$\rho = \frac{COV(W_{io}W_{is})}{\sigma_s\sigma_o} \quad (3.8)$$

6. Índice de Concordância (IC)

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (W_{is} - W_{io})^2}{\sum_{i=1}^N (|W_{is} - \bar{W}_{io}| + |W_{io} - \bar{W}_{io}|)^2} \quad (3.9)$$

Willmott (1982) propôs o IC de forma que se possa mensurar o tamanho relativo das diferenças entre os erros sistemáticos e não sistemáticos. Variando de $0 \leq IC \leq 1$, é usado, por exemplo, para comparar diferentes simulações de um mesmo fenômeno. .

Validada a reanálise, buscou-se avaliar os avisos de ressaca emitidos pelo SMM, quanto à efetiva ocorrência de ressacas. Isso ocorreu da seguinte maneira:

- 1°. Organização das informações contidas nos avisos. Foram criados arquivos anuais para cada estado, com as informações de data de início e período de vigência dos avisos emitidos pelo SMM, durante o período de 2011 a 2021.
- 2°. A partir da reanálise *Waverys*, calculou-se a média diária de H_S para cada um dos 33 pontos e, em seguida, foram separados os dias que H_S médio foi superior a 2.5m (doravante referido como critério 1), para o período de 2011 a 2021. Para cada ponto gerou-se um arquivo contendo a data desses eventos. Vale ressaltar que a NORMAM-701, recomenda a emissão de avisos de ressaca quando ondas com H_S superiores a 2,5m atingem a costa. Porém para esse estudo optou-se por utilizar o valor médio diário.

- 3°. Cruzamento de informações (Avisos SMM X *Waverys*). Para verificar a adequação do aviso emitido em relação ao critério 1, o conjunto de dados que inclui as datas dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM para cada estado foi comparado com as datas contidas no conjunto de dados de cada ponto específico dentro desses estados. Por exemplo, no caso do Rio Grande do Sul (RS), as datas dos avisos de ressaca foram confrontadas com as datas dos eventos que satisfizeram o critério 1, para os pontos numerados de 1 a 10.
- 4°. Por fim, foi aplicado uma estatística básica de forma a mensurar os percentuais de avisos comprovados, bem como da cobertura de avisos.

A análise também contemplou o fluxo de energia das ondas, utilizando como base de comparação o valor de P_W de 31,25 kW/m (definido como critério 2), conforme recomendado por Innocentini et al. (2014). Para a determinação dos valores de P_W , aplicou-se a Equação 2.18. Essa escolha justifica-se pelo fato de que os pontos estão localizados sobre a isóbata de 100m, onde os efeitos do fundo se manifestam de maneira significativa. Os mesmo passos listados acima foram seguidos para o critério 2.

3.2.2 Climatologia e mapas de auxílio à tomada de decisão

De forma que os resultados obtidos neste estudo possam servir como uma ferramenta de auxílio aos previsores do SMM, foram gerados mapas de auxílio à previsão de ressacas diferentes dos usuais (H_s x Direção média, T_P x D_P). Dessa forma, foram criados mapas de P_W x D_P e de incidência do fluxo de energia de ondas paralelo P_{PAR} , perpendicular P_{PER} e oblíquo P_{45} à isóbata de 100m. Na Figura 3.4 é apresentado de maneira esquemática a metodologia empregada para determinação dos percentis.

Utilizando-se a reanálise *Waverys*, gerou-se a climatologia para os 33 pontos localizados sobre a isóbata de 100 metros (Figura 3.5), com um espaçamento de aproximadamente 37 milhas náuticas (MN) cada, ao longo da costa S/SE (16°S a 40°S e de 30°W a 60°W), para os principais parâmetros de onda e também para P_W , H_{SP} , P_{PAR} , P_{PER} , P_{45} .

Nos mesmos moldes do Projeto SIMCos, os pontos de monitoramento foram inseridos sobre a isóbata de 100m. No entanto, divergiu-se na metodologia de cálculo de P_W : enquanto neste estudo utilizou-se a Equação 2.18, o Projeto SIMCos emprega a Equação 2.13. O espaçamento definido em 37MN, se deu de forma a adensar a quantidade de

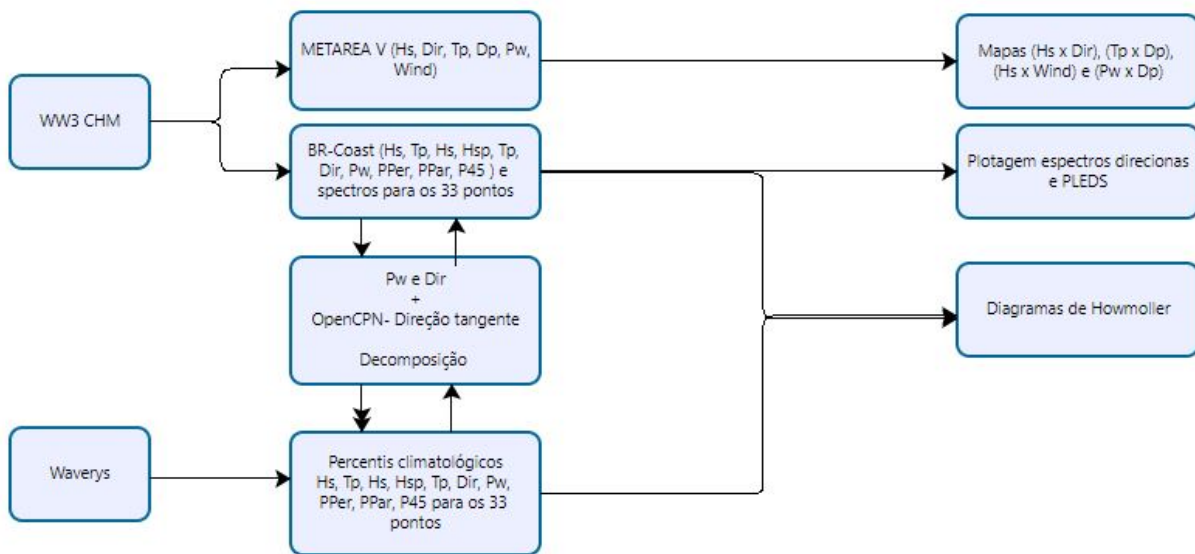


Figura 3.4: Fluxograma da metodologia aplicada para determinação dos percentis climatológicos e plotagem dos mapas de auxílio a tomada de decisão.

informações, permitindo assim, um monitoramento mais preciso.

A partir da climatologia obtida, os percentis climatológicos para essas variáveis foram calculados. Isso permitiu gerar diagramas de Hovmoller que associam valores instantâneos com seu percentil climatológico, possibilitando, não apenas, a identificação de potenciais eventos extremos, mas também uma forma de monitorar a variação desses parâmetros ao longo do tempo e do espaço. Por fim, foram plotados os espectros direcionais para cada ponto por meio do uso da técnica PLEDS (*PLotting the Evolution of the Directional Spectrum*) desenvolvida por Parente (1999).

3.2.3 Decomposição do fluxo de energia de ondas

A vasta costa brasileira (8.698 km de litoral) apresenta uma notável diversidade de ambientes tanto naturais quanto urbanizados, conforme descrito por Nicolodi e Zamboni (2008). Segundo Marengo e Scarano (2016), as mudanças climáticas apresentam desafios significativos para a gestão costeira, especialmente devido aos impactos das ondas, que intensificam a erosão costeira e contribuem para alterações nos processos sedimentares, como apontado Souza (2011). Esses impactos incluem não apenas o incremento na erosão de linhas de costa oceânicas e estuarinas, mas também alterações nos processos sedimentares, levando a perdas de terra e a alterações na distribuição de espécies. Segundo Dias da Silva (2013), os principais tipos de processos costeiros responsáveis por ocasionar

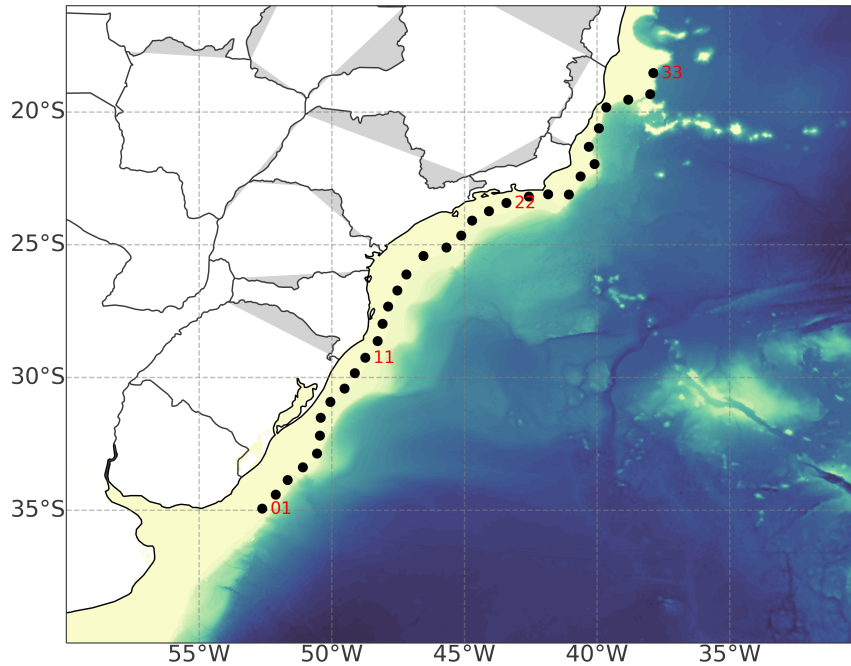


Figura 3.5: Costa S/SE brasileira com os 33 pontos sobre a isóbata de 100m.

erosão/progradação são os transportes paralelos e perpendiculares à costa. Entretanto, Neves e Muehe (2008) cita que o maior transporte ocorre quando as ondas geram correntes de 45° em relação à costa. Dessa forma, P_W foi decomposto nessas três componentes. Para que isso fosse realizado, os seguintes passos foram seguidos.

- Determinação de P_W para cada um dos 33 pontos, utilizando-se a Equação 2.18;
- Determinação da direção tangente a cada um dos 33 pontos posicionados sobre a isobatimétrica de 100m. Para determinar essa direção, utilizou-se um *software* de navegação gratuito, chamado *OpenCPN*, onde todos os pontos foram plotados. O programa possui ferramentas que permitem traçar uma linha tangente a cada um desses pontos e obter a sua direção verdadeira; e
- Com a determinação de P_W , direção da tangente de cada ponto, juntamente com a direção das ondas, por meio de simples projeção vetorial, decomposição de P_W em P_{PAR} , P_{PER} e P_{45} .

3.2.4 Escala de classificação de ressacas para os estados da costa S/SE e validação com eventos confirmados

Para desenvolver uma escala capaz de categorizar a intensidade das ressacas em cada estado, seguiu-se a metodologia apresentada na Figura 3.6. Para tal, utilizou-se os dados do *Waverys* com resolução temporal de 3h, para o período de 1993 a 2021. Desse banco de dados, separou-se para os 33 pontos, todos casos em que $H_S > 2,5\text{m}$, com duração mínima de 24h. Posteriormente, foi efetuada a determinação dos seguintes parâmetros:

- Energia total associada ao evento de ressaca (E_{total} em kWh/m), obtido por meio da integração de P_W no tempo (Duração total do evento);
- Direção média dessa energia para cada evento (correspondente à direção média das ondas); e
- Valor máximo atingido por P_W durante o evento.

Essas informações foram inseridas em uma matriz, sendo gerada uma para cada ponto e também uma matriz para cada estado, ou seja, todos os pontos condizentes ao estado, na mesma matriz. O próximo passo objetivou aplicar o método do cotovelo, a fim de determinar a quantidade ideal de *clusters* no *K-means*, de forma a efetuar a clusterização. Posteriormente, com os valores de cada centroide (valores máximos, mínimos e médios), estabeleceu-se os limiares entre as faixas de intensidade.

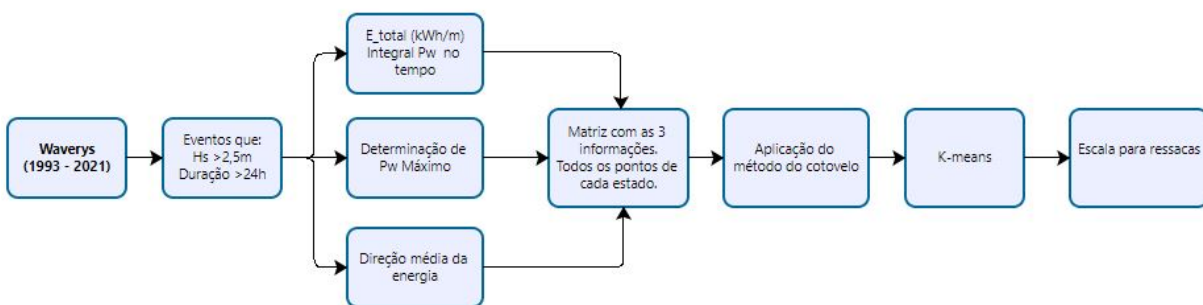


Figura 3.6: Fluxograma da metodologia aplicada para a criação da escala de classificação de ressacas.

Resultados e Discussão

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados alcançados, os quais foram organizados da seguinte forma: inicialmente, a validação da reanálise *Waverys* é realizada; em seguida, a eficácia dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM é avaliada. Adicionalmente, serão apresentadas ferramentas de suporte à previsão de ressacas, que incluem: percentis climatológicos e diagramas de Hovmöller, a decomposição do Fluxo de Energia de Ondas em componentes ortogonais, espectros direcionais de ondas, e PLEDS - Plotagem da Evolução do Espectro Direcional. Por último, será apresentada a escala de classificação para eventos de ressaca e sua implementação para eventos documentados no estado de Santa Catarina.

4.1 Validação da reanálise *Waverys*

A validação da reanálise *Waverys* procedeu-se a partir de uma comparação dos dados coletados pelas boias do PNBOIA. Seu objetivo principal foi verificar a fidelidade com que a reanálise efetivamente representa os parâmetros característicos das ondas na região de estudo, já que é essencial dispor de dados precisos e confiáveis, tanto para a identificação de eventos de ressaca, quanto para a elaboração de uma climatologia detalhada para as áreas analisadas.

Os resultados dos indicadores estatísticos derivados das comparações estão dispostos na Tabela 4.1. Ao se comparar as médias de H_S , observam-se pequenas diferenças, ou seja, um viés muito baixo, sendo o maior para a boia de Itajaí, correspondente a 5 cm. Ainda em relação ao viés de H_S , com exceção da boia de Santos, as demais apresentaram valor positivo, o que indica que a reanálise subestima os valores médios. Para T_P também foram observadas diferenças na casa dos décimos de segundo, quando comparadas às médias,

sendo a maior diferença identificada na boia de Vitória (0,85 segundos). Todas as boias apresentaram viés muito pequeno e positivo para T_P .

Tabela 4.1 - Índices estatísticos obtidos entre a comparação dos dados coletados pelas boias e *Waverys*.

	H_S (m)				T_P (s)			
	R. Grande	Itajaí	Santos	Vitória	R. Grande	Itajaí	Santos	Vitória
MEAN-Obs	2,156	1,95	1,92	1,50	9,07	9,44	9,54	9,13
MEAN-Wav	2,159	2,01	1,89	1,51	9,24	9,75	9,90	9,99
BIAS	0,00	0,05	-0,03	0,01	0,17	0,31	0,36	0,85
MAE	0,21	0,23	0,18	0,12	0,97	1,05	1,03	1,43
MSE	0,11	0,12	0,07	0,03	2,73	3,06	3,13	6,18
MSE_{DISP}	0,10	0,12	0,05	0,02	2,67	2,95	2,99	5,43
MSE_{DISS}	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	0,11	0,14	0,74
RMSE	0,33	0,35	0,36	0,17	1,65	1,75	1,77	2,48
IC	0,95	0,93	0,96	0,95	0,85	0,85	0,85	0,80
CCE	0,92	0,88	0,94	0,92	0,72	0,72	0,72	0,65

O MAE, juntamente com o RMSE, configuram-se como indicadores mais representativos para comparações gerais Willmott (1982). Para H_S , o menor MAE foi observado na boia de Vitória (0,12m) e o maior na boia de Itajaí (0,23m). Em relação a T_P , a Boia de Rio Grande obteve o menor valor (0,97s) e Vitória o maior (1,43s). Esse valor obtido na boia de Vitória ocorreu devido ao fato da reanálise superestimar os períodos médios, conforme pode ser observado na Figura 4.1.

Para o RMSE, da mesma forma que o MAE, a boia de Vitória apresentou o menor valor para H_S e o maior para T_P , o que era esperado por ser esse parâmetro o mais sensível a *outliers*. Para H_S , as três outras boias apresentaram valores na casa do 0,3. Para T_P , as mesmas apresentaram valores próximos de 1.7.

Analisando as componentes dissipativas e dispersivas do MSE, observa-se que os erros estão relacionados, principalmente, à fase para ambas as variáveis, visto os valores obtidos de MSE_{DISP} e não à subestimação/superestimação dos valores de amplitude das ondas, o que é corroborado pelos baixos valores de BIAS. Para H_S , o MSE_{DISS} foi nulo, exceto para a boia de Vitória, (0.01m).

Além disso, o *Waverys* apresentou valores altos de IC em relação às boias analisadas, para ambos H_S e T_P . Para H_S , esses valores variaram de 0,93 (Itajaí) a 0,96 (Santos), com o valor 1 representando uma previsão perfeita. Em relação a T_P , os valores do IC

ficaram um pouco mais baixos, sendo 0,8 para Vitória e de 0,85 para as demais boias. Tais achados vão ao encontro de pesquisas prévias que examinaram a reanálise *Waverys*, como Law-Chune et al. (2021) e Fanti et al. (2021), reforçando a sua eficácia e precisão.

As Figuras 4.1 e 4.2 exibem as curvas de densidade e probabilidade para H_S e T_P , respectivamente. No caso de H_S , nota-se que a reanálise *Waverys* tende a superestimar os valores médios, enquanto subestima os valores máximos. Tal fato encontra-se em consonância com os achados de Fanti et al. (2021). Em relação à T_P , Fanti et al. (2021) aponta que, especialmente nos percentis mais altos, a reanálise tende a subestimar os valores. Analisando a Figura 4.2, para a boia de Vitória é observado o contrário, o *Waverys* superestimando não só os períodos maiores, mas todos os demais valores, o que denota uma diferença de fase. Já para as demais boias, realmente constatam-se picos em que os valores observados são superiores ao da reanálise.

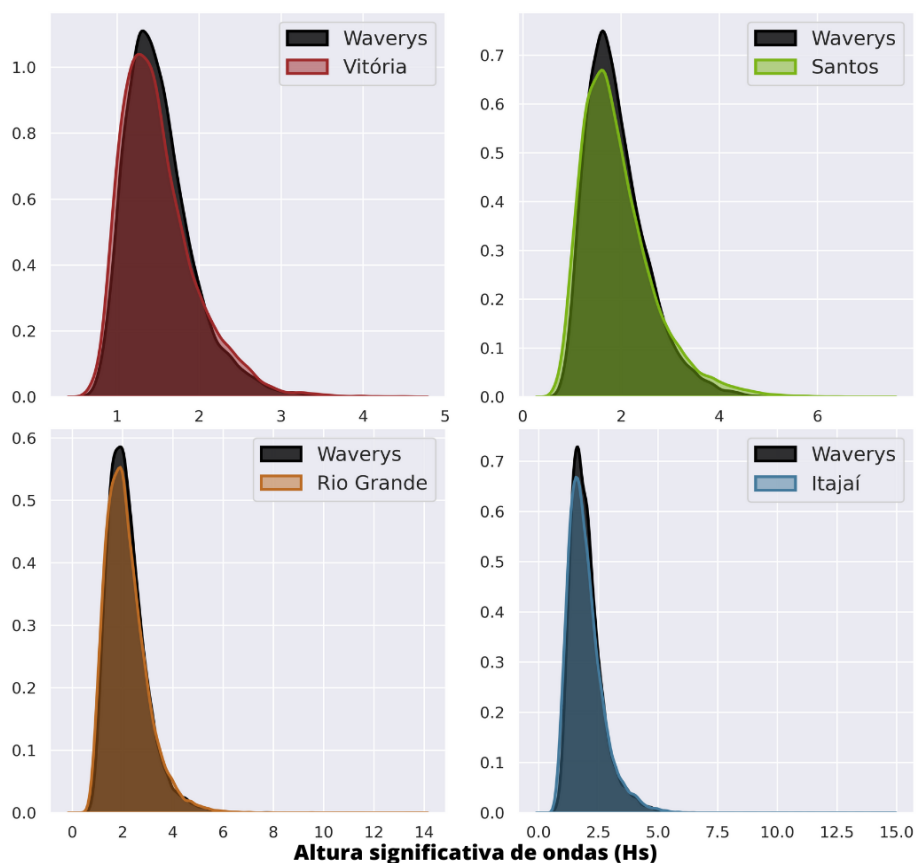


Figura 4.1: Distribuição de densidade de probabilidade para H_S na comparação entre boias e *Waverys*.

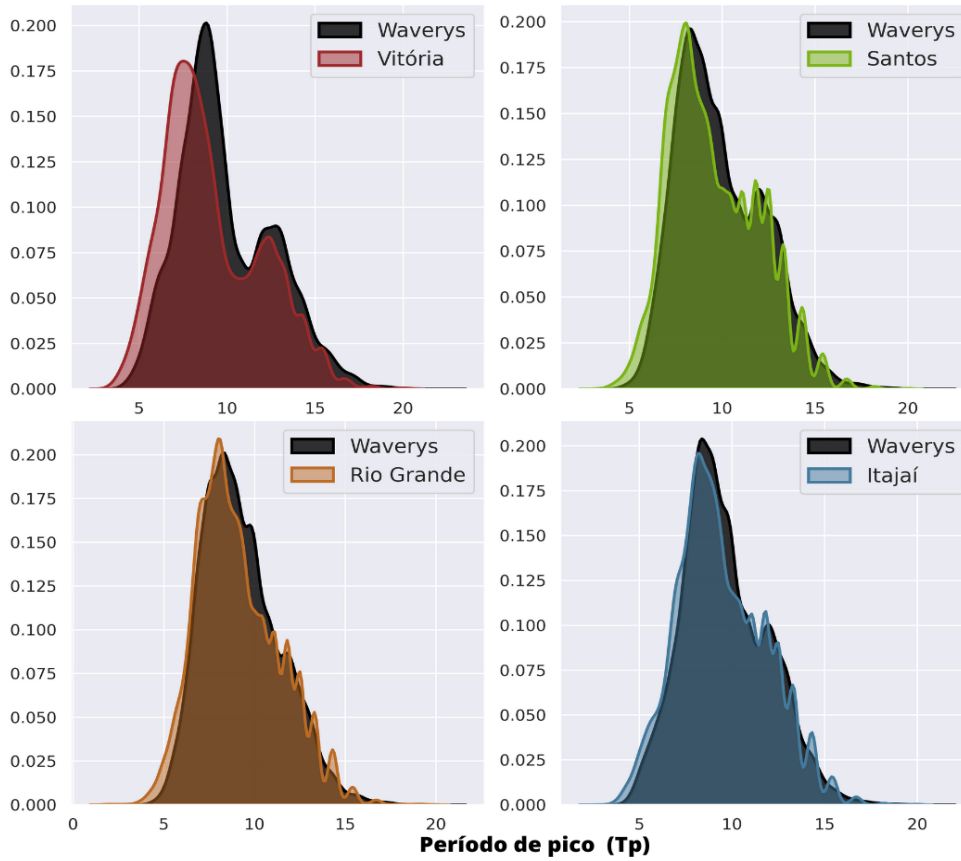


Figura 4.2: Distribuição de densidade de probabilidade para T_P na comparação entre boias e *Waverys*.

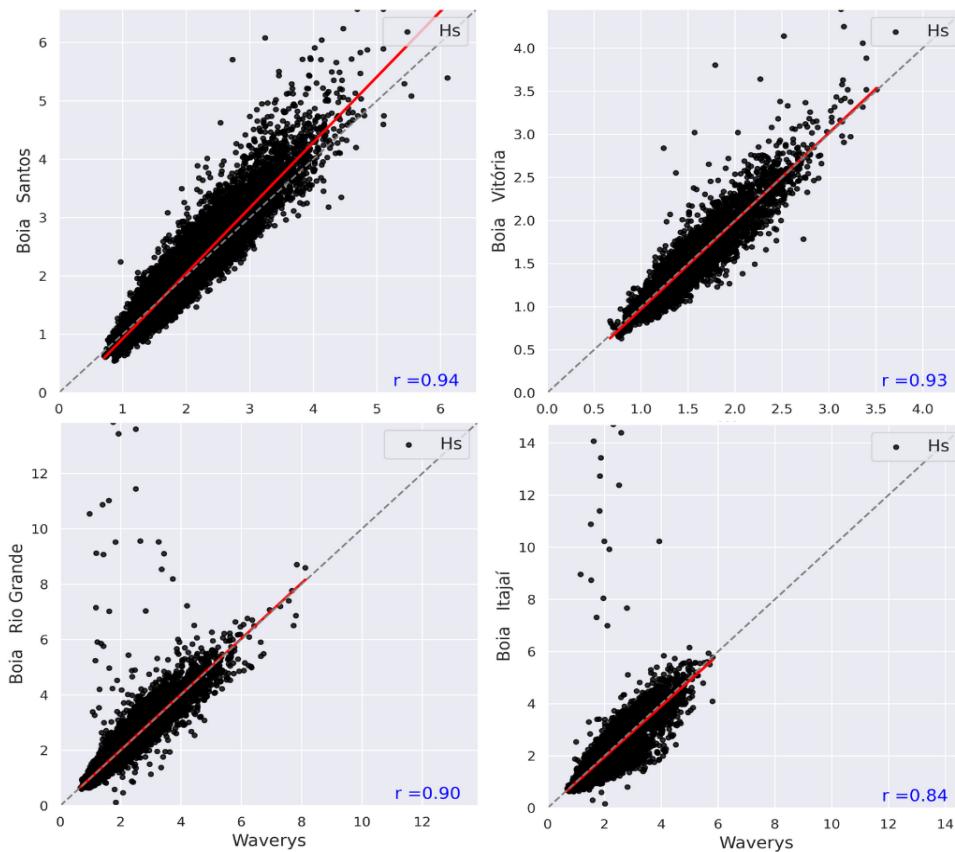


Figura 4.3: Diagramas de dispersão de H_S . Superior esquerdo Santos, superior direito Vitória, inferior esquerdo Rio Grande, inferior direito Itajaí.

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam os diagramas de dispersão para H_S e T_P , respectivamente. Na análise comparativa da reanálise com as boias situadas em Rio Grande e Itajaí, foram observados Coeficientes de Correlação de Pearson (CCP) inferiores aos demais, registrando 0.90 e 0.84, respectivamente, valores que, apesar de menores, ainda representam uma excelente concordância. Por outro lado, a reanálise *Waverys* demonstrou uma performance superior em termos de correlação para os dados coletados pelas boias de Santos e Vitória, alcançando índices de 0,94 e 0,93, respectivamente.

Já para T_P , verificou-se que todas as boias apresentaram correlações em torno de 0,7, com a menor sendo observada na boia de Vitória, com 0,73, e a maior registrada na boia de Santos, com 0,79. Esses resultados sugerem uma consistência geral nas medições do período de pico das ondas, em comparação com os dados da reanálise, embora as correlações sejam moderadas quando comparadas com as boas correlações de H_S .

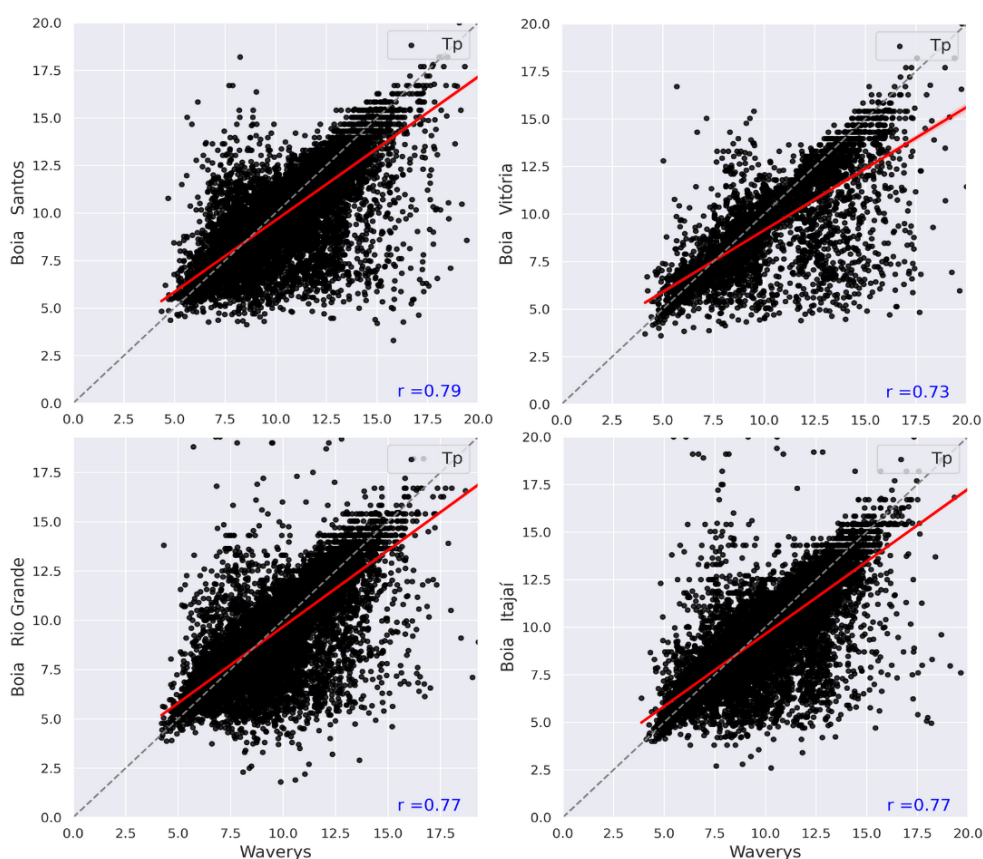


Figura 4.4: Diagramas de dispersão de T_P . Superior esquerdo Santos, superior direito Vitória, inferior esquerdo Rio Grande, inferior direito Itajaí.

4.2 Avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM

De acordo com a metodologia adotada, a primeira etapa consistiu na organização das informações presentes nos avisos de ressaca emitidos pelo SMM (Aviso - CHM). Isso incluiu a compilação da data de início e do período de vigência dos avisos de ressaca, distribuídos por cada estado e respectivo ano.

Paralelamente, a partir da base de dados *Waverys*, foram selecionados todos os dias que satisfaziam os critérios 1 ($H_S > 2,5$) e 2 ($P_W > 31,25$ kW/m), definidos como dias de ressaca (Res - H_S e Res - P_W). A comparação dessas duas séries temporais, de ambos os critérios, através da intersecção das datas, possibilitou determinar o número total de dias coincidentes (Conc - H_S e Conc - P_W). Esse procedimento ofereceu uma base para a comparação entre os eventos de ressaca documentados pelo SMM e aqueles identificados por meio da reanálise *Waverys*.

Considerando que a análise envolve diversos anos e abarca toda a costa das regiões Sul e Sudeste, os resultados foram compilados no **Anexo A**. Como forma de ilustrar os resultados dessas comparações, escolheu-se destacar o ano de 2014, aplicando-se ambos os critérios, especificamente para o estado do Rio Grande do Sul, os quais estão detalhados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

As informações contidas nessas tabelas são: o Ponto que foi feita a comparação, a quantidade de dias que estiveram dentro do critério adotado (Ressaca *Waverys*), a quantidade de dias que estiveram sob a vigência de um aviso de ressaca, o número de dias coincidentes (Dias em comum), o percentual de avisos comprovados (Dias em comum/Dias de aviso vigente), e o percentual de cobertura dos avisos (Dias em comum/Ressaca *Waverys*).

Tabela 4.2 - Valores obtidos da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo SMM e *Waverys* (critério 1) para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul no ano de 2014.

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
1	130	56	45	80,35	43,07	2014
2	128	56	47	83,92	43,75	2014
3	134	56	48	85,71	41,79	2014
4	151	56	53	94,64	37,08	2014

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 4.2

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
5	146	56	53	94,64	38,35	2014
6	144	56	52	92,85	38,88	2014
7	124	56	50	89,28	45,16	2014
8	114	56	49	87,5	49,12	2014
9	96	56	45	80,35	58,33	2014
10	93	56	46	82,14	60,21	2014

Tabela 4.3 - Valores obtidos da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo SMM e reanálise Waverys (critério 2) para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul no ano de 2014.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
1	109	56	41	73,21	51,38	2014
2	107	56	43	76,79	52,34	2014
3	119	56	48	85,71	47,06	2014
4	127	56	48	85,71	44,09	2014
5	130	56	50	89,29	43,08	2014
6	128	56	53	94,64	43,75	2014
7	100	56	50	89,29	56,00	2014
8	97	56	49	87,50	57,73	2014
9	91	56	49	87,50	61,54	2014
10	87	56	49	87,50	64,37	2014

Para todos os 33 pontos, calculou-se os valores médios tanto dos avisos de ressaca comprovados, quanto da cobertura de avisos para ambos os critérios, conforme apresentado nas Tabelas 4.4 e 4.5.

Com base nesses valores e levando em conta o critério 1, observa-se que para a maioria dos pontos analisados, os avisos foram comprovados com um percentual médio de 72,48%, sendo considerado um bom percentual de comprovações. Entretanto, destaca-se o baixo percentual de cobertura desses avisos, indicando que o critério sugerido pela NORMAM-701 deve ser reavaliado.

Tabela 4.4 - Percentuais médios de avisos comprovados e cobertura de avisos, considerando o critério 1, para os 33 pontos.

Ponto	% médio aviso comprovado	% médio cobertura avisos	Ponto	% médio aviso comprovado	% médio cobertura avisos
1	74,02	44,39	18	81,26	51,23
2	77,19	45,75	19	77,20	55,48
3	80,22	45,71	20	69,64	65,49
4	84,83	44,30	21	73,53	71,48
5	87,23	45,11	22	66,47	79,09
6	86,77	46,63	23	67,26	78,48
7	84,11	51,98	24	77,38	64,66
8	81,22	53,73	25	84,79	54,56
9	77,04	56,29	26	68,74	63,57
10	75,02	58,10	27	74,14	55,59
11	75,87	60,53	28	35,46	48,09
12	75,98	61,71	29	56,03	50,32
13	67,35	68,37	30	54,31	45,09
14	62,74	67,05	31	75,03	34,32
15	58,28	66,47	32	69,84	35,64
16	80,69	31,78	33	60,08	36,55
17	72,19	58,87			

Para esse mesmo critério, quando considerada a média de comprovações por estados, o Rio Grande do Sul obteve o maior percentual (80,76%), seguido do Paraná (80,69%), São Paulo (75,07%), Rio de Janeiro (73,19%), Santa Catarina (68,04%) e, por último, o Espírito Santo (58,46%). Quanto à cobertura, o estado do Rio de Janeiro (66,77%) e Santa Catarina (64,83%) tiveram os maiores percentuais, seguidos de São Paulo (57,77%), Rio Grande do Sul (49,20%), Espírito Santo (41,67%) e, por último, o Paraná, (31,78%).

Considerando o critério 2 ($P_W > 31,25$ kW/m), novamente observa-se um percentual geral de avisos comprovados superior a 75%. Além disso, para alguns avisos que obtiveram um percentual baixo de comprovação com o critério 1, quando adotado o critério 2, apresentaram uma melhora significativa (EX: ponto 15, 28, 29, 30). Avaliando a média por estado para esse critério, São paulo e Rio de Janeiro obtiveram um percentual de comprovação de avisos de 81% e os menores valores foram observados em Santa Catarina e no Espírito Santo 69%. Para a cobertura de avisos, houve uma piora no percentual, visto que a quantidade de casos aumenta se considerado o critério 1.

Tabela 4.5 - Percentuais médios de avisos comprovados e cobertura de avisos, considerando o critério 2 para os 33 pontos.

Ponto	% médio aviso comprovado	% médio cobertura avisos	Ponto	% médio aviso comprovado	% médio cobertura avisos
1	71,38	45,06	18	85,73	44,58
2	73,54	46,57	19	83,01	46,90
3	76,89	47,18	20	78,64	51,95
4	81,21	44,76	21	80,69	57,56
5	83,00	44,99	22	78,81	63,23
6	84,25	47,00	23	80,29	61,47
7	80,52	51,67	24	83,19	52,55
8	78,43	52,74	25	86,81	45,54
9	75,83	54,72	26	80,31	52,08
10	74,73	56,32	27	82,59	46,89
11	74,76	56,55	28	53,68	32,51
12	75,09	54,12	29	68,25	30,81
13	68,06	59,77	30	70,72	30,15
14	66,94	60,86	31	79,11	21,28
15	63,54	61,46	32	75,70	27,72
16	77,90	25,97	33	68,05	31,30
17	78,53	52,49			

Ao longo dos últimos anos, o CHM tem melhorado o espaçamento de grade do modelo WW3. Até o ano de 2022, utilizava-se um espaçamento de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ para a METAREA V. No ano de 2023, para essa mesma região, o espaçamento passou para $0,08^\circ \times 0,08^\circ$ (9Km). Além disso, para a região costeira, a resolução foi aumentada ainda mais, com uma malha de $0,03^\circ \times 0,03^\circ$ (3,6 km), de modo a melhorar a representação dos processos de geração e propagação de ondas e, conseqüentemente, contribuir para uma melhor precisão e cobertura dos avisos emitidos.

Buscando ter uma visão mais abrangente da comparação realizada, séries temporais contendo a quantidade de dias de ressaca, obtidas de acordo com os dois critérios, e o total de avisos emitidos e comprovados foram gerados. Nas Figuras 4.5 e 4.6, são apresentadas as séries do Rio Grande do Sul e do Rio de Janeiro, respectivamente. As Figuras para os demais estados se encontram no **Anexo A**.

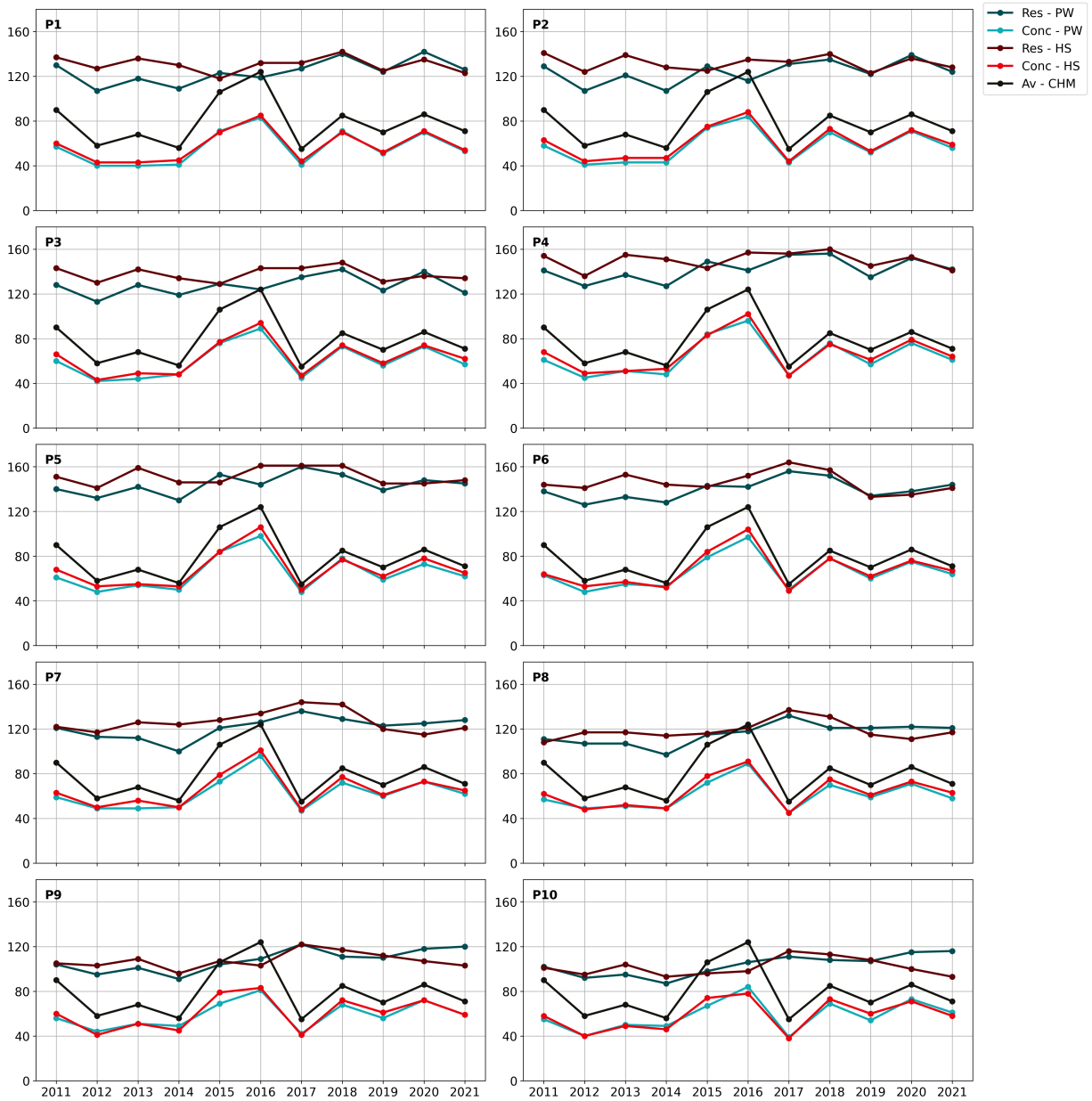


Figura 4.5: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo SMM e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio Grande do Sul.

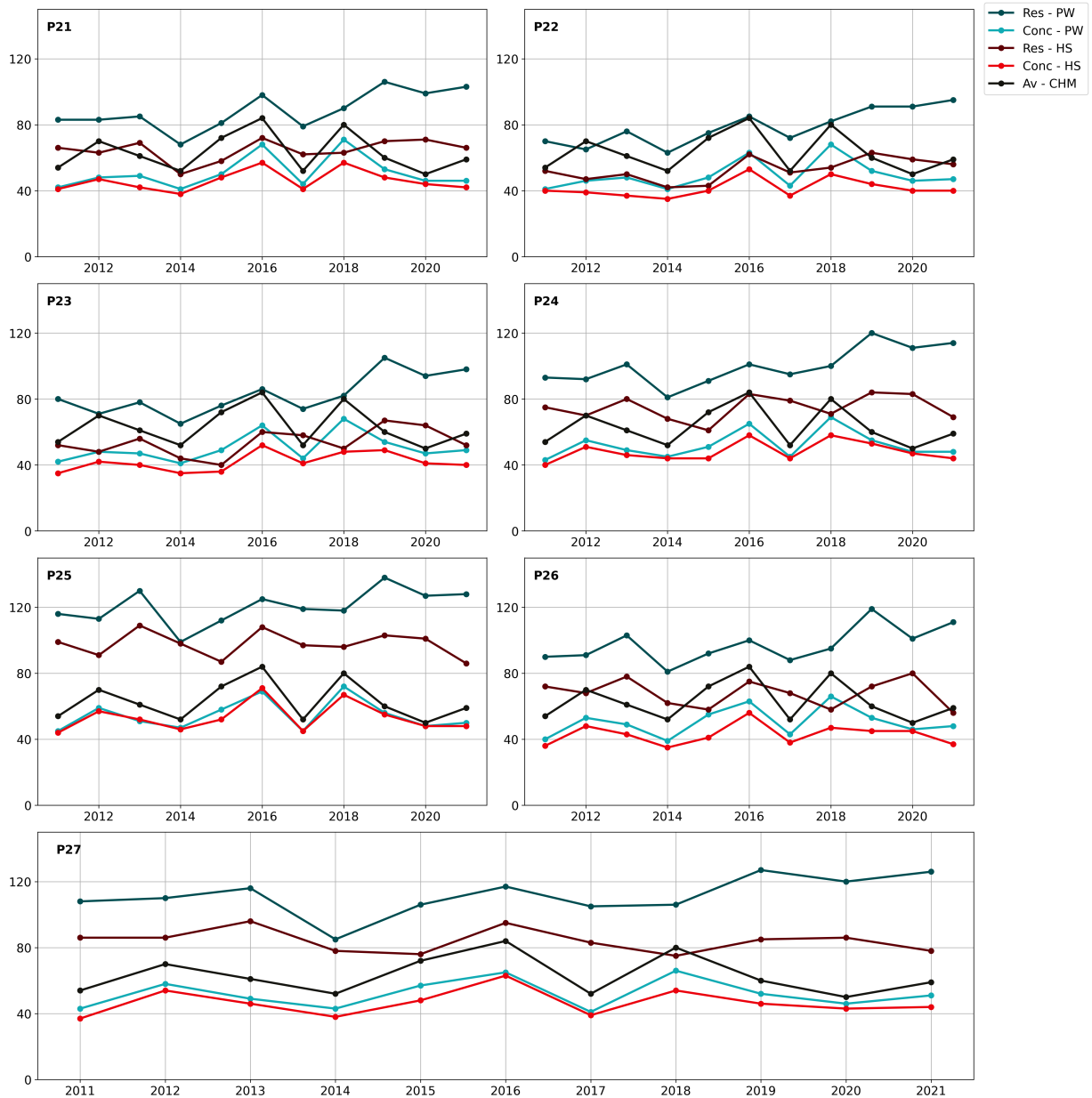


Figura 4.6: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo SMM e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio de Janeiro.

Levando em consideração as séries temporais geradas para todos os 33 pontos, o critério 2 ($P_W > 31,25 \text{ kW/m}$) indica um maior número de eventos de ressaca para quase todos os pontos analisados, com exceção daqueles localizados na costa do Rio Grande do Sul e no primeiro ponto na costa Catarinense. Essa característica é particularmente relevante para a costa sul do Brasil, especialmente para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina, regiões que estão mais próximas às áreas de ciclogênese, indicadas por Reboita et al. (2010) e Gramcianinov et al. (2019). Por serem regiões de geração de ondas, tem-se T_P menores,

impactando diretamente no valor de P_W Romeu et al. (2015).

Para os demais estados, poucos foram os anos que o critério 1 ($H_S > 2,5$) apresentou mais casos de ressaca que o critério 2 ($P_W > 31,25\text{kW/m}$). Além disso, para a costa do ES, alguns pontos tiveram o critério 2 apresentando duas vezes mais casos que o 1, mais uma vez impactado pelo T_P e comprimento de onda. Na Figura 4.11, observa-se a climatologia dos parâmetros de onda, sendo possível notar que o período de pico é maior para esse estado.

Outro ponto que chama atenção ao se analisar as séries temporais é o número de dias sob a vigência de avisos de ressaca nos anos de 2015 e 2016. Para a costa do Rio Grande do Sul, foram mais de 120 dias, ou seja, mais de um terço do ano. Ressalta-se que esses dois anos foram marcados pelo El Niño mais significativo já registrado, tanto em termos de duração, quanto de magnitude das anomalias (NOAA, 2023). Esse fenômeno climático impacta diretamente a região sul do Brasil, devido ao aumento da ocorrência de ciclones (Grimm e Tedeschi, 2009).

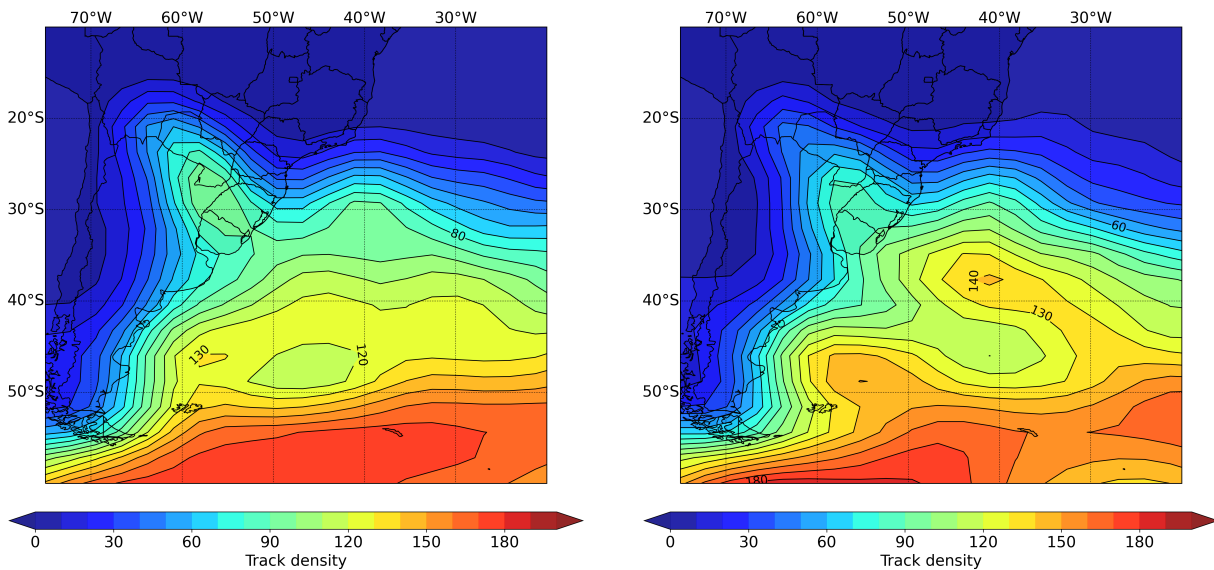


Figura 4.7: Densidade de *trackings* de ciclones, para os anos de 2013 (esquerda) e 2016 (direita).

Buscando elucidar ainda mais a influência do El Niño, sobre o número de dias sob vigência de avisos de ressaca, utilizou-se os *trackings* de ciclones, classificados por Gramscianinov et al. (2020), para a gerar mapas de densidade. Para isso, foi escolhido o ano de 2013, ano considerado neutro e o ano de 2016, com El Niño. Conforme demonstrado na Figura 4.7, observa-se uma maior densidade de *trackings* em 2016, especialmente na

zona de ciclogênese que abrange a costa Sul/Sudeste do Brasil. Esta região é definida por Gramcianinov et al. (2019) como região três e se estende de 25°S a 30°S no verão e de 30°S a 35°S no inverno.

Avaliando os 33 pontos individualmente, para o critério 1, o ponto 5, com 87,23% teve o maior percentual médio de avisos comprovados e o ponto 28, o menor percentual com 35,46%. Para a cobertura de avisos, o ponto 22, com 79,09%, teve a maior cobertura, enquanto o ponto 16, com 31,78%, teve a menor. Para o critério 2, o ponto 25, com 86,81%, obteve o maior percentual de avisos comprovados e o ponto 28, com 53,68% o menor. Considerando a cobertura de avisos o ponto com maior percentual foi o 22, com 63,23% e o menor foi o ponto 31, com 21,28%.

Na análise dos dados coletados, observou-se que o ponto 28 consistentemente registra o menor percentual médio de avisos comprovados, para ambos os critérios avaliados. Especula-se que isso possa ocorrer devido aos efeitos gerados pela cadeia Vitória-Trindade e sua complexa batimetria, que segundo Paiva et al. (2016), gera ramificações de importantes correntes oceânicas, além de ondas internas com frequências equivalentes às da maré astronômica, sugerindo um impacto negativo na precisão das previsões.

Por outro lado, o ponto 22, localizado na costa do Rio de Janeiro, apresentou a maior eficiência na cobertura de avisos em ambos os critérios. Tal evidência sugere uma maior precisão nas previsões de eventos climáticos adversos nesta região específica.

A variação observada nos critérios de previsão, tanto em termos de precisão (percentual médio de aviso comprovado), quanto na cobertura dos avisos, reflete as diferenças nas características das ondas e nos padrões climáticos ao longo das diversas partes da costa. Essas diferenças podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo, mas não limitando, a topografia costeira e as condições meteorológicas locais.

4.3 Ferramentas de auxílio a previsão de ressacas

4.3.1 Mapas com parâmetros característicos de onda

Os mapas gerados a partir dos resultados dos modelos de ondas constituem recursos valiosos para centros de previsão meteorológica e oceanográfica ao redor do mundo. Essenciais para o planejamento e monitoramento das condições marítimas, esses mapas auxiliam na identificação de fenômenos como tempestades, ressacas e outros eventos marinhos. Eles

oferecem dados detalhados sobre características como a altura, o período, a direção e a energia das ondas, fundamentais para garantir a segurança marítima, operações de busca e salvamento, bem como o manejo de atividades na zona costeira. O CHM disponibiliza mapas de H_S x Direção, (Figura 4.8), e T_P x D_P (Figura 4.9), além de ondogramas, para locais específicos da costa, todos derivados das simulações realizadas pelo modelo WW3.

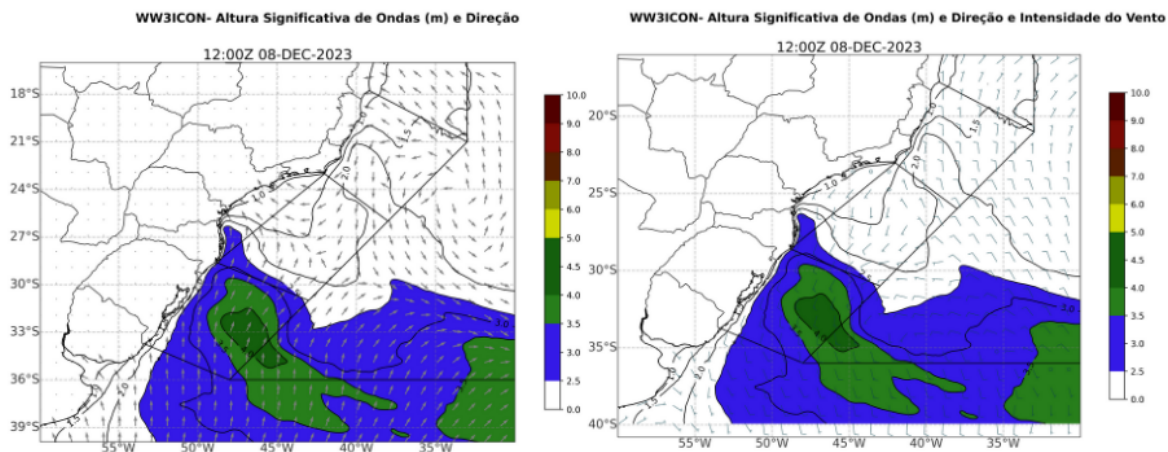


Figura 4.8: Mapa da esquerda, H_S x DIR_{med} das ondas e mapa da direita H_S , e direção e intensidade do vento. Mapas gerados com as simulações do modelo WW3 para o dia 08 de dezembro de 2023.

Com a finalidade de enriquecer as ferramentas disponíveis para a previsão de ressacas, desenvolveu-se um mapa inovador para a área de estudo, incluindo as variáveis P_W e D_P . Conforme mencionado anteriormente, Carvalho (2010), aponta que este parâmetro deve ser usado na identificação de ressacas ao longo da costa. Na análise dos avisos de ressaca emitidos pelo CHM, verificou-se que um limiar de 31,25 kW/m se mostra eficaz como indicativo da ocorrência de ressacas costeiras.

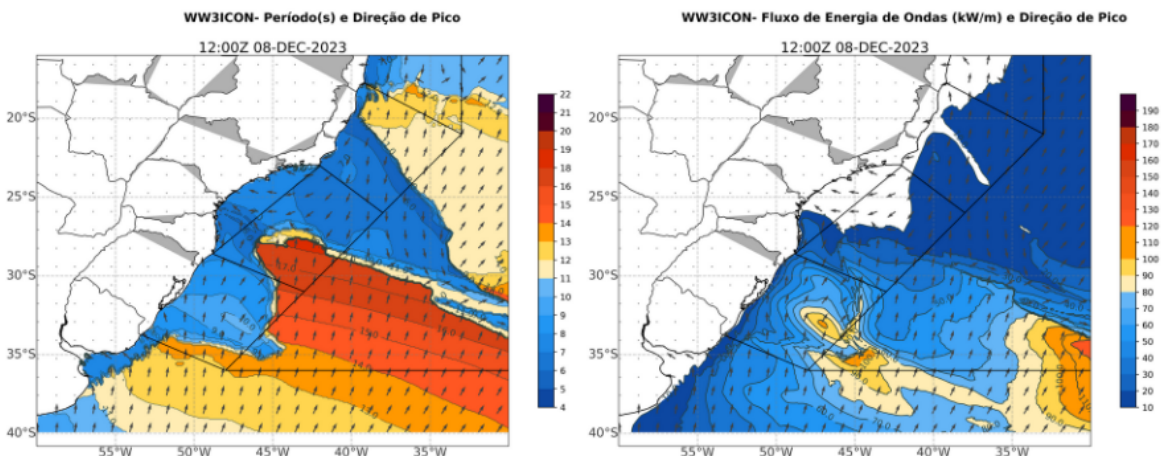


Figura 4.9: Mapa da esquerda, T_P x D_P e mapa da direita P_W x D_P . Mapas gerados com as simulações do modelo WW3 para o dia 08 de dezembro de 2023.

4.3.2 Percentis climatológicos e diagramas de Hovmoller

Conhecer o percentil climatológico de uma determinada variável é essencial para identificar eventos extremos, pois permite estabelecer um limiar baseado na distribuição histórica dos dados climáticos. Buscando retomar uma ferramenta anteriormente desenvolvida pelo CPTEC, conhecida como SIMCos (Brasil, CPTEC, 2023), que foi descontinuada em 2019, procedeu-se à geração da climatologia dos principais parâmetros de onda para cada ponto, utilizando dados de reanálise do *Waverys*. Essa climatologia, expressa através de percentis climatológicos, é visualizada em diagramas de Hovmöller, facilitando o acompanhamento temporal da severidade desses parâmetros e servindo como um recurso adicional para o suporte à tomada de decisão em situações climáticas extremas.

Na Figura 4.10 é possível observar o percentil climatológico para H_S . Os percentis para os demais parâmetros, H_{SP} , P , P_{Per} e P_{Par} , podem ser observados no **Anexo A**.

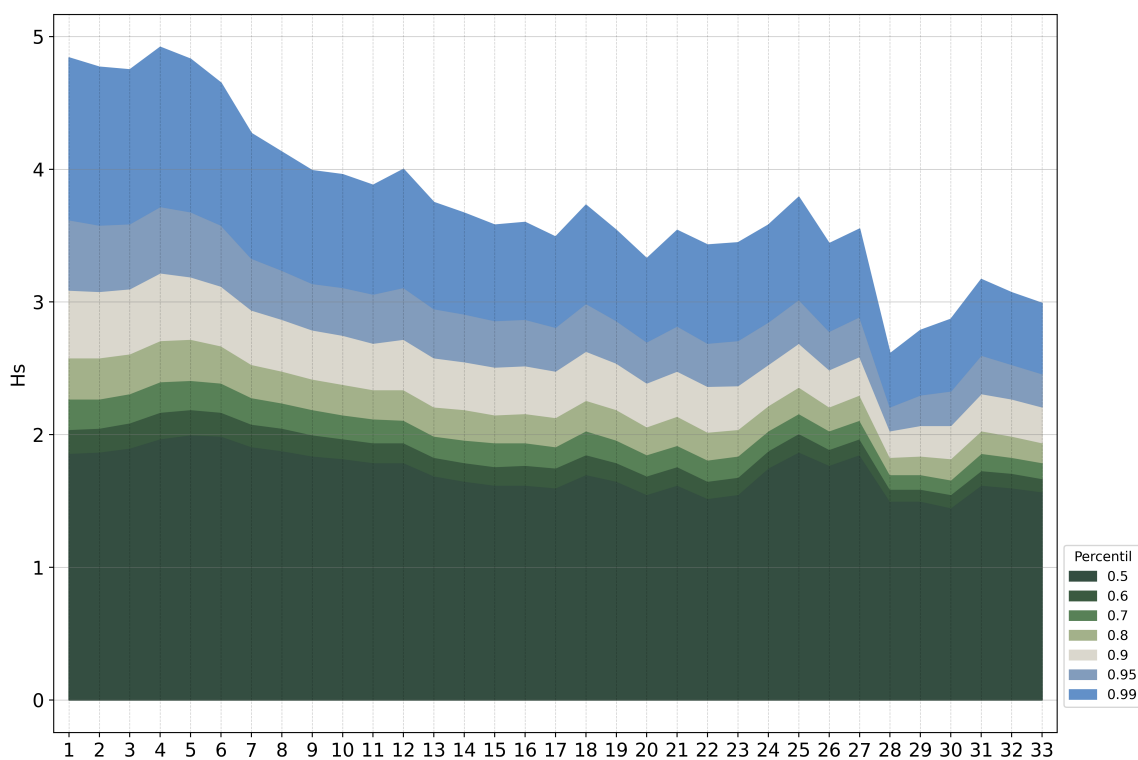


Figura 4.10: Percentis climatológicos de H_S para os 33 pontos ao longo da costa S/SE, calculados a partir dos dados de reanálise *Waverys*.

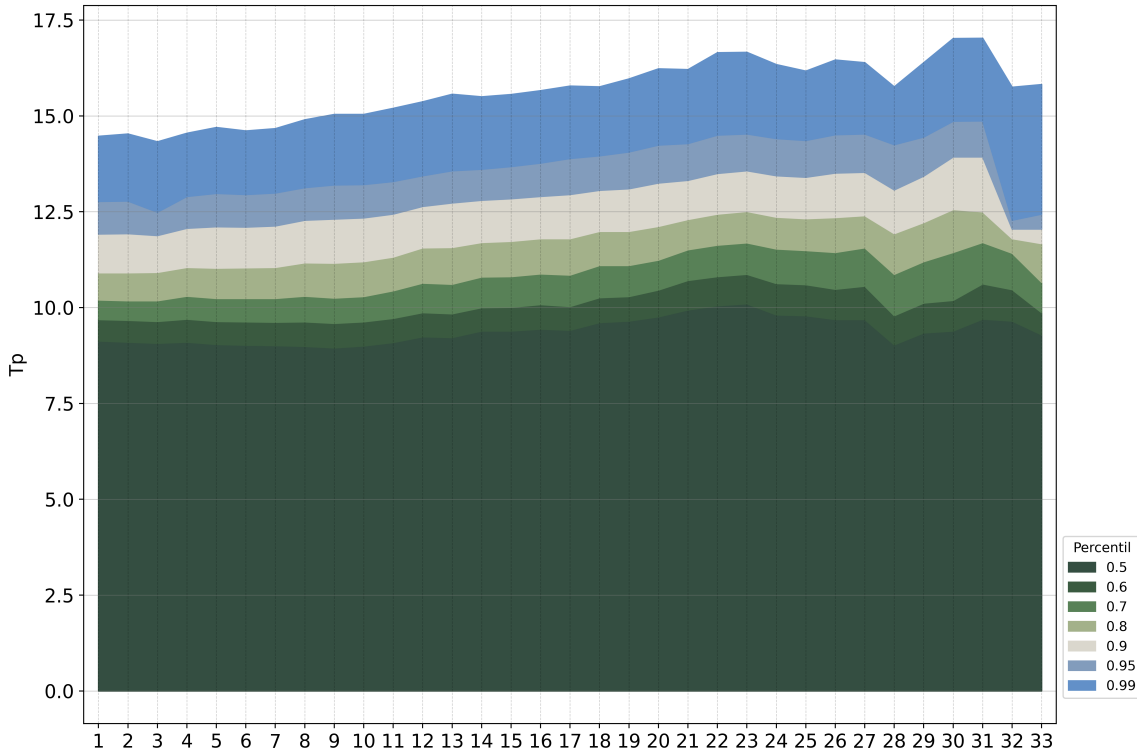


Figura 4.11: Percentis climatológicos de T_P para os 33 pontos ao longo da costa S/SE, calculados a partir dos dados de reanálise *Waverys*.

Analisando a Figura 4.10, é possível observar que as amplitudes de H_S tendem a diminuir para norte, com algumas variações regionais, provavelmente ocasionadas pela plataforma continental. Consequentemente, serão computados maiores valores de H_S nos percentis superiores. Desse modo, uma altura de onda que está acima do percentil 99%, no ponto 33, pode representar apenas o percentil 90%, no ponto 1. O mesmo vale para H_{SP} e para P_W . Já T_P (Figura 4.11) apresenta um perfil oposto: quanto mais para norte, maior os percentis relacionados ao período. Isso deve estar relacionado ao fato de que os pontos mais ao norte estão mais longe das zonas de geração de onda (Gramscianinov et al., 2019, 2020) de modo que, durante o caminho percorrido pelo *swell* até chegar à linha de costa, há uma maior organização das vagas e, conseqüentemente, separação entre as ondas de comprimento curto e longo.

Em relação aos dois critérios adotados para a avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo SMM, foi elaborada a Tabela 4.6. Essa tabela exhibe o percentil climatológico correspondente a ambos os critérios, para os 33 pontos analisados. Nela é possível identificar que para a costa do Paraná, alguns pontos de São Paulo (2 de 4), Rio de Janeiro (4 de 7) e para todos os pontos do Espírito Santo, ondas de 2,5m metros caracterizam um evento extremo,

Tabela 4.6 - Valores dos percentis para cada um dos 33 pontos, considerando os dois critérios.

Ponto	Critério 1 Percentil	Critério 2 Percentil	Ponto	Critério 1 Percentil	Critério 2 Percentil
1	78	79	18	87	85
2	78	79	19	89	86
3	77	79	20	92	89
4	74	76	21	90	86
5	73	75	22	92	88
6	74	76	23	92	88
7	79	80	24	89	85
8	81	81	25	85	81
9	83	83	26	90	85
10	84	84	27	88	82
11	85	85	28	98	96
12	85	84	29	97	94
13	89	87	30	97	94
14	89	87	31	94	89
15	90	88	32	95	92
16	90	88	33	96	94
17	91	90			

que segundo Gramcianinov et al. (2020), costuma ser considerado a partir dos percentis 90% ou 95%. Em compensação, para a costa do Rio Grande do Sul, essa amplitude equivale a apenas o percentil 78% para o ponto 1 e 84% para o ponto 10. Ainda considerando esse critério, é possível observar que na costa do RJ, para os os pontos do centro ao sul do estado (20 a 23), seria observado um evento extremo, pois apresentam percentil acima de 90%. Em compensação, observa-se que no ponto 25, ondas de 2,5m equivalem ao percentil 85%, ou seja, para esse ponto é comum ocorrerem ondas maiores. Especula-se que essa ocorrência se deve às características da plataforma continental. O ponto se encontra em uma região de elevado gradiente de profundidade, diferente dos demais, onde esse gradiente é mais suave.

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os diagramas de Hovmoller para as magnitudes de H_S , H_{SP} , T_P , P_W , P_{PER} , P_{PAR} , P_{PER} , P_{45} , e, ao lado, o diagrama com a correspondência climatologia. As imagens foram geradas com a rodada do WW3, do dia 08 de dezembro de 2023. É possível observar a previsão de ondas superiores a 2,5m, entre os dias 08 e 09 de dezembro, até o ponto 21-SP, se mantendo com alturas superiores a 2m, até o dia 11. Apesar dessas previsões de alturas significativas, não foi emitido nenhum aviso de ressaca. Esse cenário destaca a importância de usar tal ferramenta para auxiliar na previsão e divulgação de eventos extremos, visto que os dados indicavam um evento extremo durante vários dias.

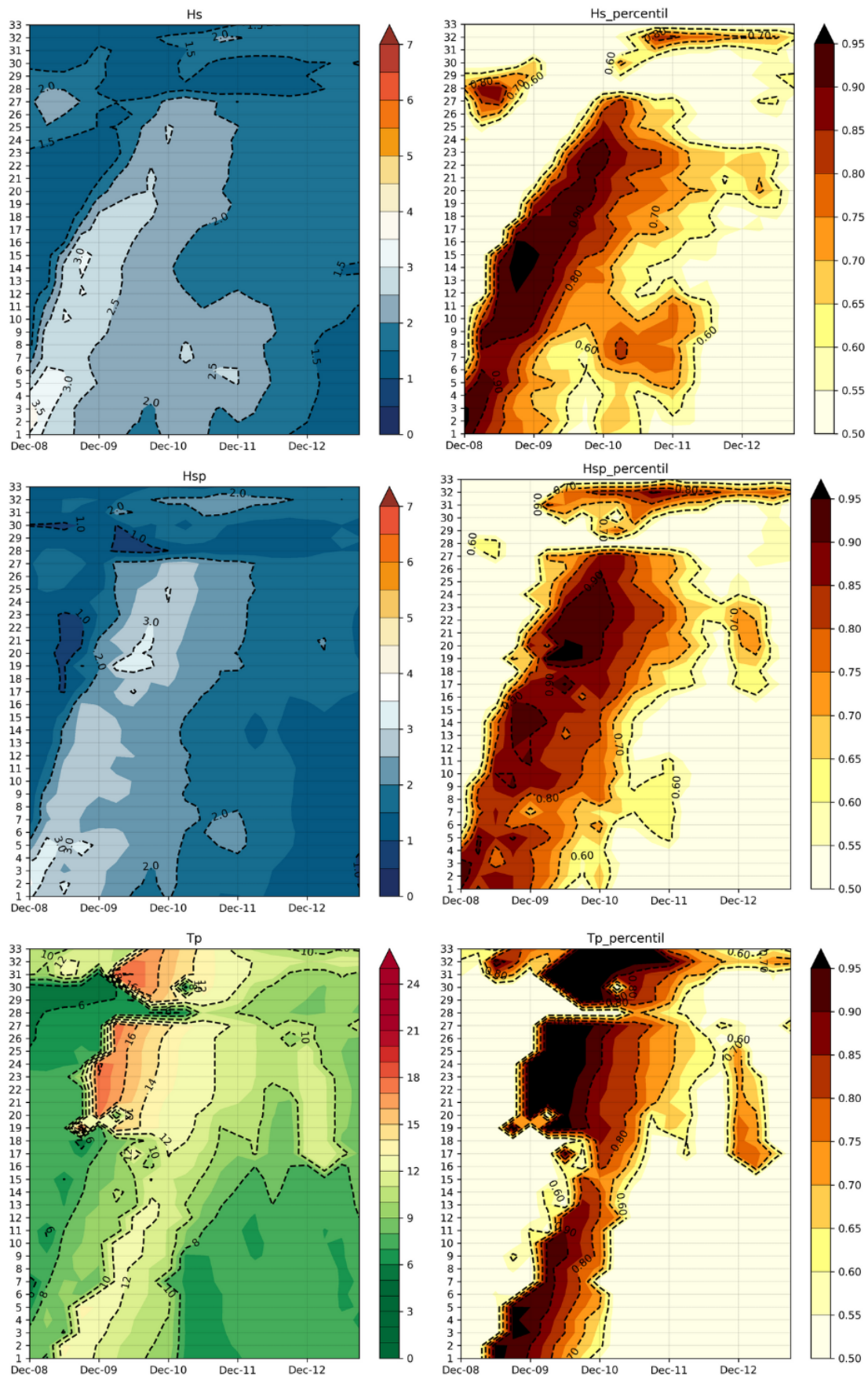


Figura 4.12: Diagramas de Hovmoller para H_S , H_{SP} e T_P e seus respectivos percentis climatológicos, para o período de 08 a 12 de dezembro de 2023

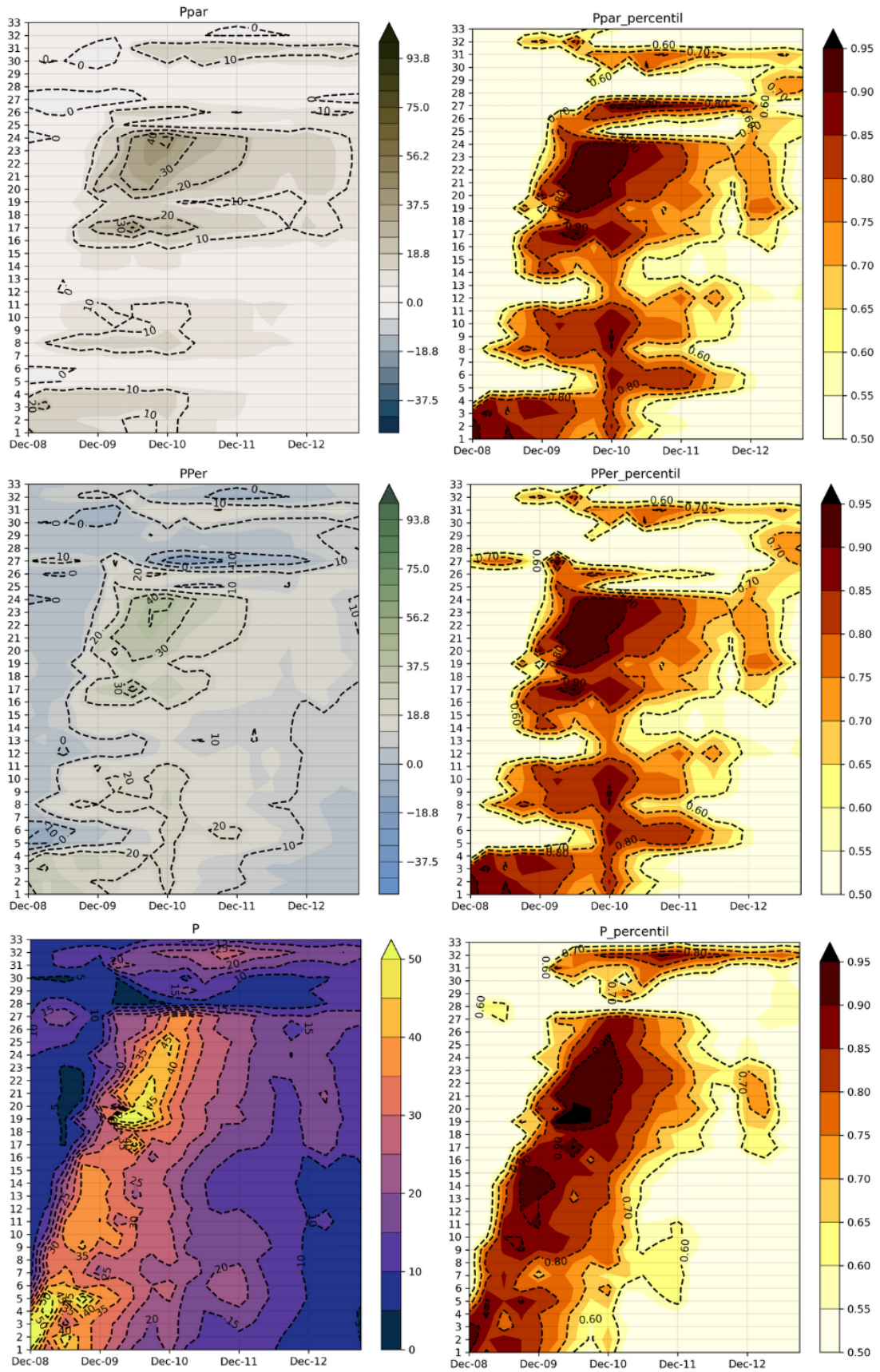


Figura 4.13: Diagramas de Hovmoller para P_{PAR} , P_{PER} e P e seus respectivos percentis climatológicos, para o período de 08 a 12 de dezembro de 2023.

4.3.3 Decomposição do Fluxo de Energia de Ondas em componentes ortogonais

Para aprimorar a compreensão sobre a incidência de ondas ao longo dos variados pontos da costa brasileira, P_W foi dividido em três componentes: paralela, perpendicular e oblíqua (45°), em relação à isobatimétrica de 100 metros. Contudo, é importante destacar que a morfologia local influencia significativamente as direções de incidência das ondas, resultando em diferentes dinâmicas de transporte de sedimentos. Embora esta análise detalhada esteja fora do escopo do presente trabalho, a decomposição de suas componentes fundamentais não oferece um entendimento específico da incidência de ondas em nível local. No entanto, proporciona uma visão geral aproximada da magnitude de cada componente, contribuindo assim, para uma melhor compreensão dos processos envolvidos.

Nas figuras 4.14, 4.15 e 4.16 são apresentados os mapas de energia perpendicular, paralela e oblíqua para cada um dos 33 pontos, para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023. Tais mapas permitem acompanhar a intensidade de cada uma dessas componentes de P_W ao longo do tempo. Esses dias foram selecionados puramente para exemplificar os mapas criados. Neles é possível observar que para ambas as componentes apresentaram maior energia no dia 09 de dezembro, sendo a região afetada o litoral norte de SP e na maior parte do litoral do RJ.

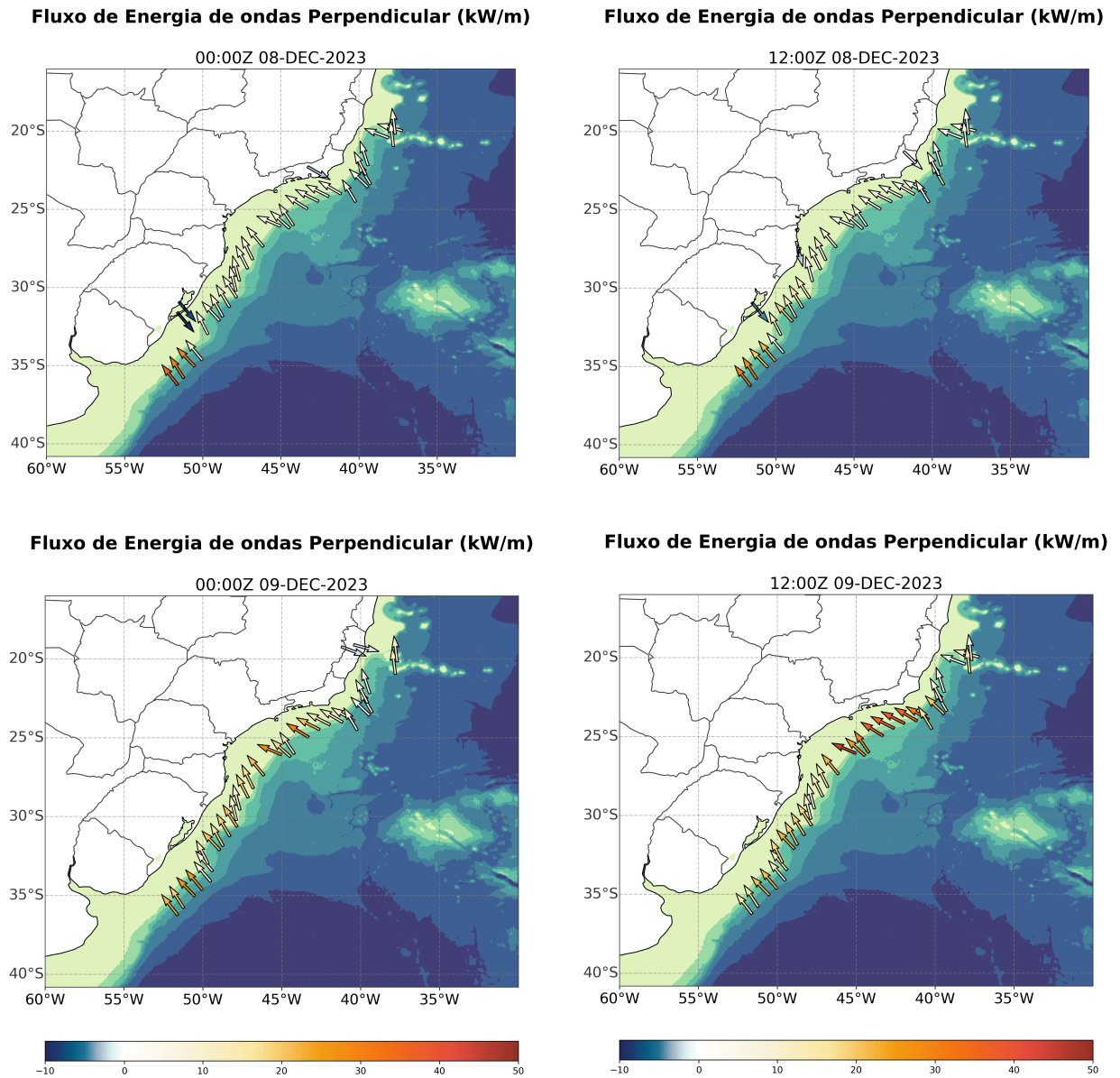


Figura 4.14: Fluxo de energia perpendicular a isobatimétrica de 100 metros (P_{PER}) para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023.

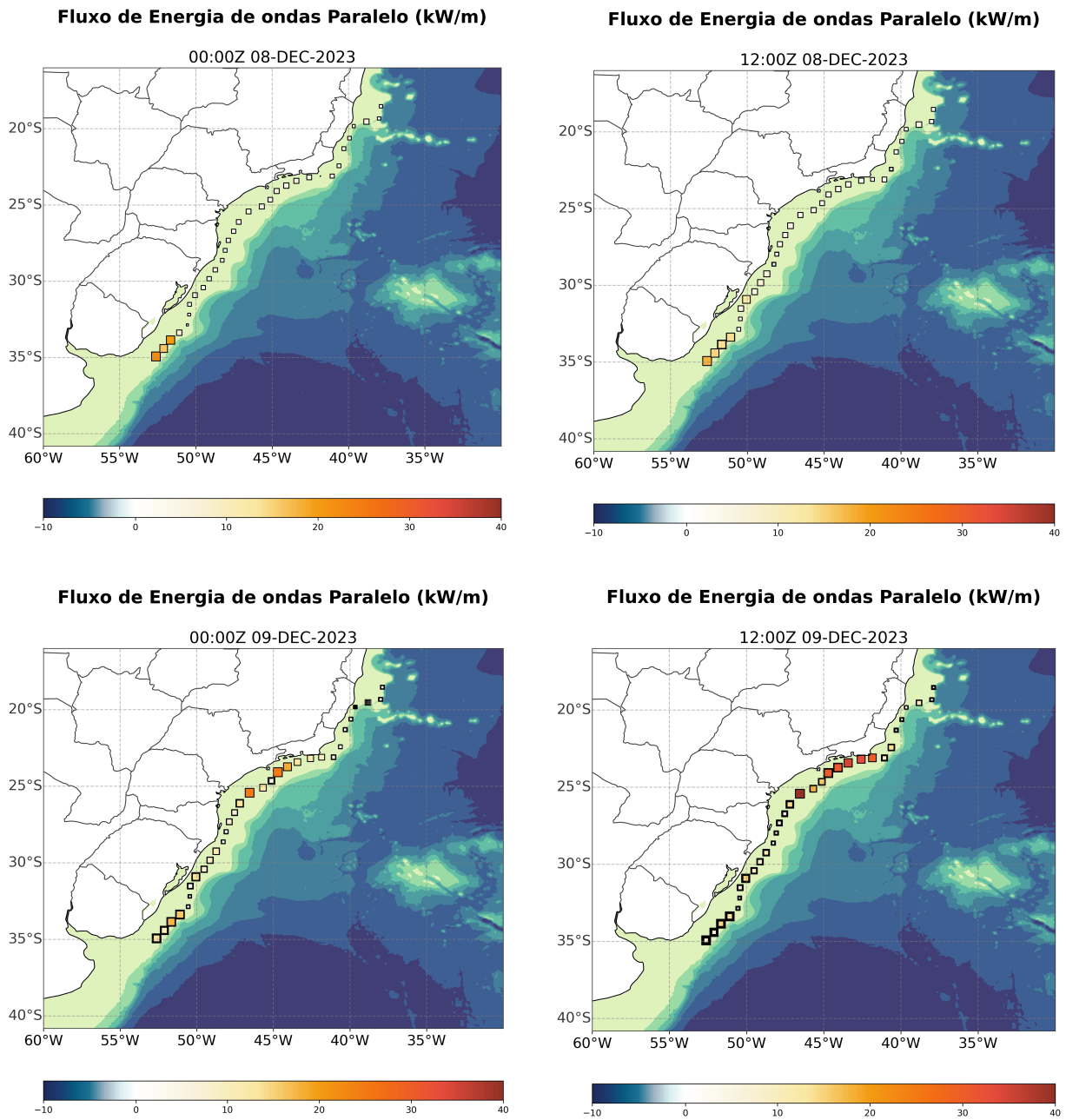


Figura 4.15: Fluxo de energia paralelo a isobatimétrica de 100 metros (P_{PAR}) para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023.

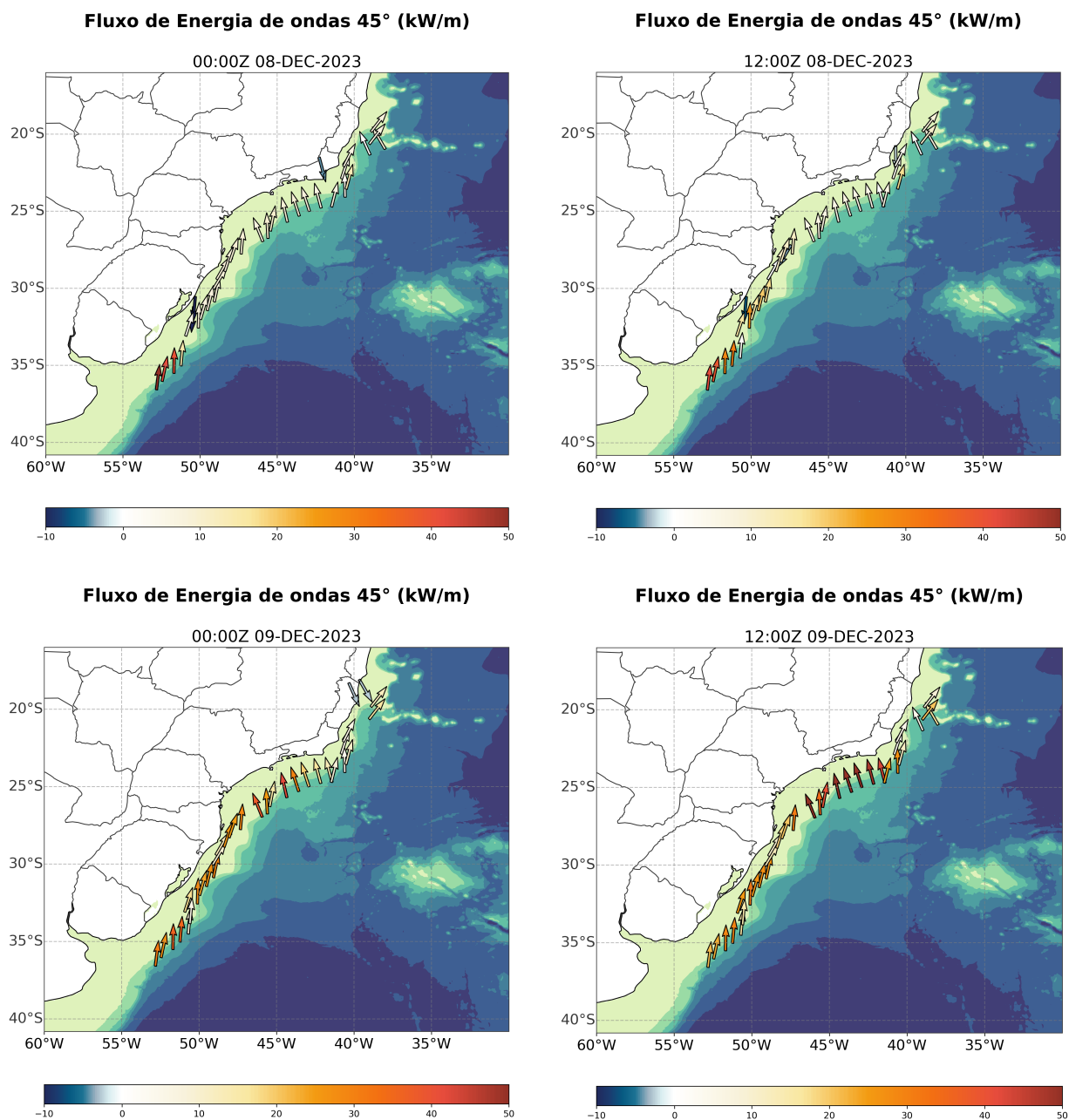


Figura 4.16: Fluxo de energia oblíquo a isobatimétrica de 100 m (P_{45}) para os dias 08 e 09 de dezembro de 2023.

4.3.4 Espectros direcionais de ondas

Nas figuras 4.17 e 4.18 são apresentados os espectros direcionais para o ponto 10 (RS) e 21 (RJ), para o dia 25 de agosto de 2023, às 15Z. Esse dia foi escolhido apenas para exemplificação. A plotagem foi gerada aproveitando as rodadas do WW3 feitas pelo CHM.

Para a Figura 4.17, pelo espectro de energia é possível observar que a maior concentração de energia está concentrada na frequência de 0,1 Hz, que equivale a período de 10s.

Já para a 4.18 é observado uma concentração de energia menor com picos em diferentes faixas de frequência, como por exemplo, em 0,12 e 0,17Hz, ou seja, é uma região de formação de ondas, pois apresenta períodos menores (8 e 6s respectivamente).

Ainda nas mesmas figuras é apresentado um diagrama polar dos espectros direcionais. Para o Rio Grande do Sul (4.17 é possível observar as ondas mais energéticas vindo de S/SW, conforme o vento (201°) e um outro centro de formação de ondas menos energéticas de NE. Para o Rio de Janeiro, observam-se ondas vindo de diversas regiões, sendo as mais energéticas do quadrante NE.

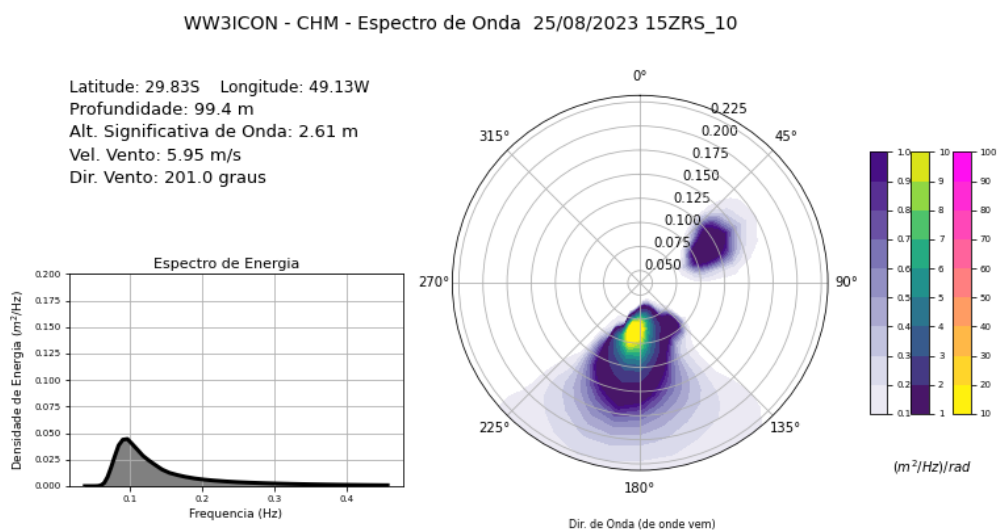


Figura 4.17: Espectro de onda para o ponto 10 localizado na costa do Rio Grande do Sul.

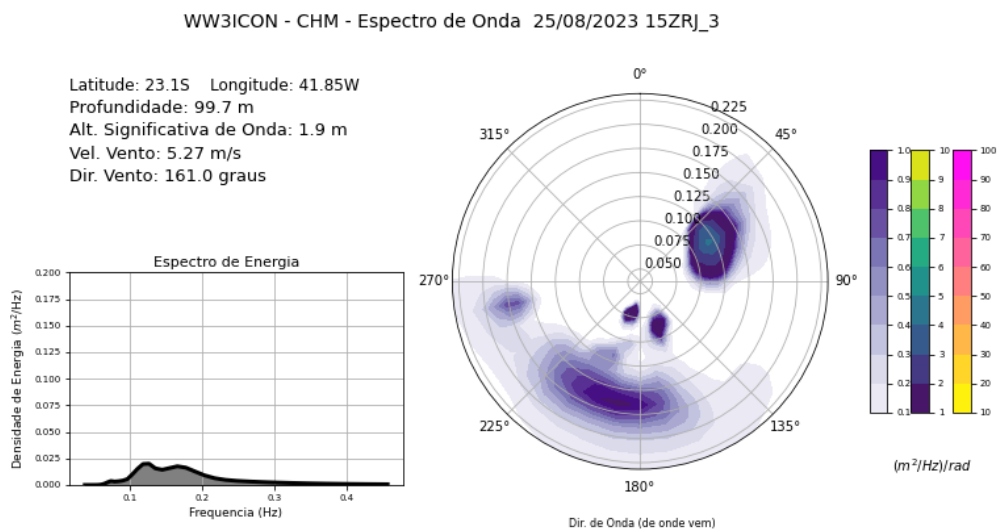


Figura 4.18: Espectro de onda para o ponto 21 localizado na costa do Rio de Janeiro.

4.3.4.1 PLEDS - Plotagem da Evolução do Espectro Direcional

A PLEDS (*PLotting the Evolution of the Directional Spectrum*) foi desenvolvida por Parente (1999), sendo um complemento da técnica DAAT (*Directional Analysis with Adaptive Techniques*). Como resultado, é gerado um gráfico tipo 'waterfall', permitindo acompanhar a evolução do espectro direcional das ondas ao longo do tempo (Parente, 1999). Dentre as informações disponíveis nos gráficos, tem-se a direção de onde as ondas estão vindo, período (s), direção e intensidade do vento, altura significativa de ondas e a distribuição espectral entre diferentes frequências.

Para melhorar a previsão e análise de ondas além dos 5 dias fornecidos pelo CHM, optou-se pelo uso dos arquivos .spec do WW3, operados pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, que gera previsões para 16 dias. A rodada de 00Z é disponibilizada diariamente por meio de FTP (NOAA, 2024). Tal escolha amplia significativamente o horizonte de planejamento e análise, sendo crucial para identificar padrões e eventos específicos no oceano, apoiando assim, decisões em várias frentes, como previsão meteorológica, operações marítimas e estudos ambientais.

Na Figura 4.19 é possível observar a evolução do espectro direcional para o Ponto 19, que fica na altura de Ilha Bela -SP, gerada a partir da rodada do dia 18 de fevereiro de 2024. Como resultado, tem-se um gráfico de 4 dimensões (direção, tempo, energia e período), em que o tempo está no eixo vertical, a banda de frequência é representada pelas cores e a energia é proporcional à altura da janela representada. Os ventos também são representados pelos retângulos brancos. Pela imagem é possível observar o vento rondando (mudando de quadrantes com a chegada/passagem da frente) entre os dias 26 e 29, bem como o aumento da amplitude das ondas de S de frequência elevada (*sea*), provavelmente ocasionado pela passagem de uma frente fria.

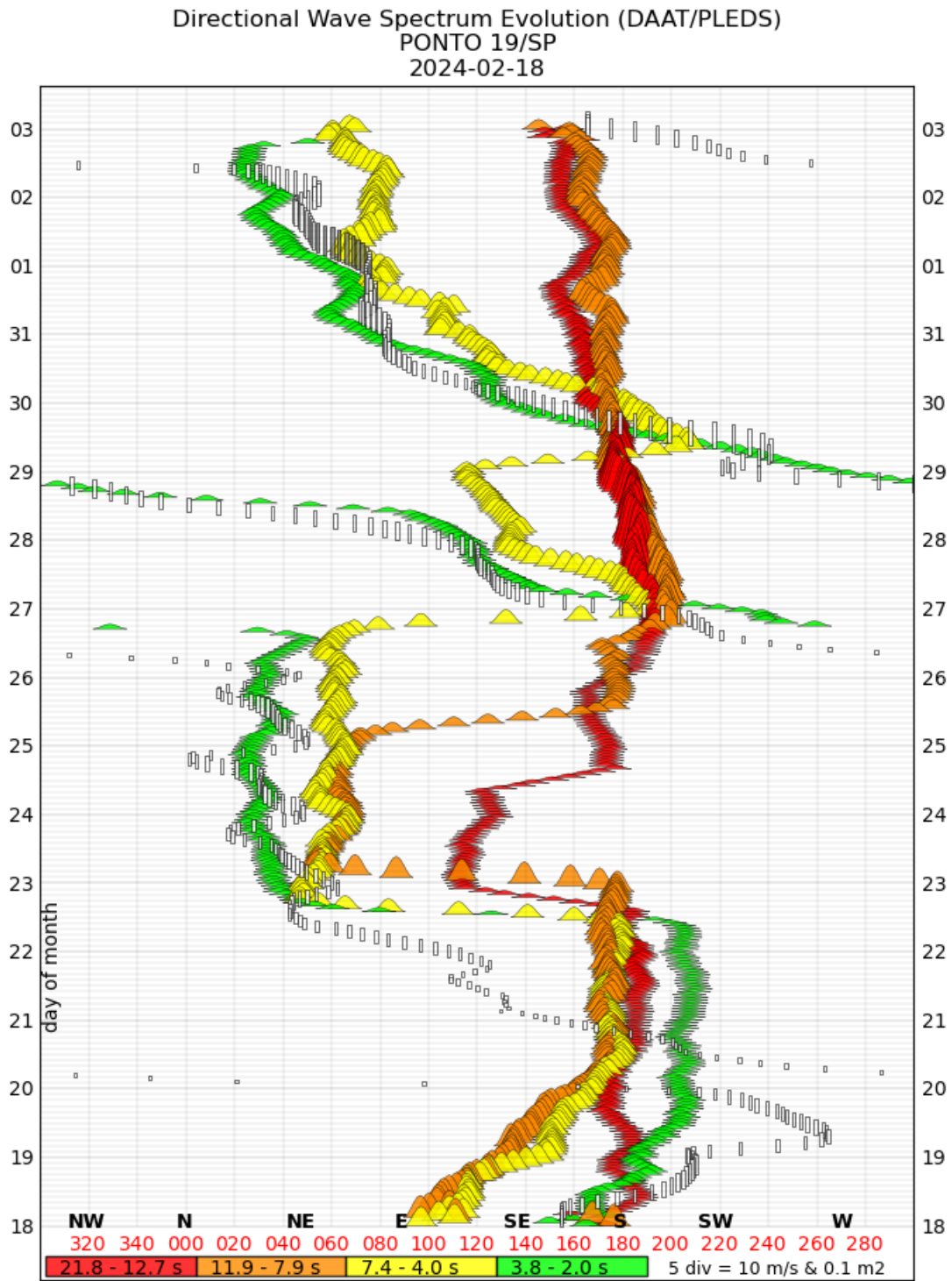


Figura 4.19: Evolução do espectro direcional para o ponto 19 localizado na costa de São Paulo. Na imagem é possível identificar a amplitude das ondas para cada faixa de períodos (gaussianas coloridas) e a intensidade do vento (retângulos).

4.4 Escala de classificação para eventos de ressaca

Existem diversas escalas para classificar a intensidade de tempestades, sendo a escala de Dolan e Davis (1992) amplamente adotada para ciclones extratropicais, que são comuns na costa brasileira. Essa escala é elaborada com base, exclusivamente, na altura significativa das ondas (H_S). Este estudo adotou uma abordagem inovadora ao classificar os eventos de ressaca com base na energia total do evento (E_{tot}) (Molina et al., 2019), incluindo a direção média da energia e o fluxo de energia máximo do evento P_W . Além do acréscimo desses dois parâmetros, o agrupamento dos dados em *clusters* ocorreu utilizando-se o *K-means*, o que tornou essa forma de classificação inédita.

Conforme os procedimentos metodológicos já descritos, primeiramente, foi feita a organização dos dados, para posteriormente, ser efetuado o teste do cotovelo, visando à determinação do número ideal de *clusters*. Esse teste foi executado para o conjunto de dados de cada estado e o resultando foi igual para todos, 5 *clusters*. Na Figura ?? são apresentadas as curvas (cotovelos) do teste aplicado para os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro.

Após determinar o número ideal de *clusters*, o método *K-means* foi aplicado em dois diferentes arranjos de dados. No primeiro arranjo, a clusterização ocorreu individualmente, para cada um dos 33 pontos de observação. Para que o estado fosse representado em 5 grupos, efetuou-se a média dos *clusters*, considerando todos os pontos referentes a cada estado. No segundo arranjo, os dados de todos os pontos de cada estado foram consolidados, formando uma matriz única que, subsequentemente, foi submetida à clusterização. A comparação entre os resultados dos dois métodos indicou similaridades, levando à escolha do segundo.

A Figura 4.20 exibe os resultados da clusterização. Observa-se que, para o RS, SC e SP, os centroides estão apropriadamente localizados no centro dos seus respectivos *clusters*, indicando um bom desempenho do método *K-means*. Há também uma distância considerável entre a maioria dos *clusters*, especialmente entre os *clusters* 1, 2 e 3, sugerindo que estes são distintos e bem definidos. Embora os *clusters* 4 e 5 estejam mais próximos um do outro, a direção emergiu como um fator distintivo para eles, o que se aplica também aos *clusters* 1 e 3, do RJ. Já os estados do PR e ES se destacam por ter todos os *clusters* claramente separados. Detalhes adicionais sobre essa análise podem ser encontrados no

Anexo A.

Na Figura 4.21 tem-se a plotagem em três dimensões.

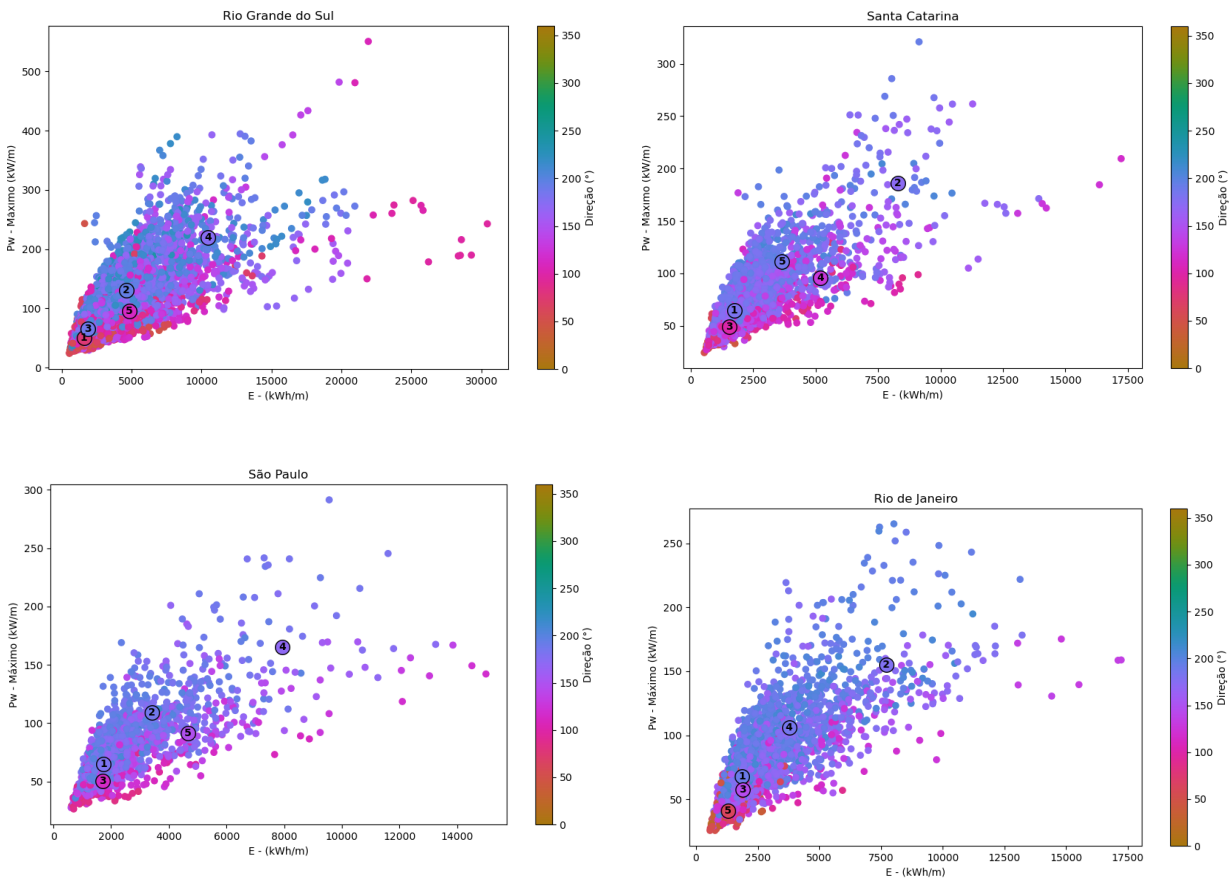


Figura 4.20: Clusterização pelo método *K-means* para a costa do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Rio de Janeiro.

Após a clusterização, realizou-se uma avaliação dos valores máximos e mínimos associados a cada centroide. Com base nessa avaliação, estabeleceu-se uma escala de intensidade com três classes: Classe I, para eventos leves, Classe II, para eventos moderados e Classe III, para eventos severos. Notavelmente, tanto a Classe I, quanto a Classe II, foram subdivididas em duas faixas de valores, onde a principal distinção entre elas reside na direção média. Os valores específicos para cada Classe e estado podem ser observados na Tabela 4.7

Posteriormente, foi contabilizado o número de ocorrências de ressaca, conforme o critério adotado na escala de classificação que é: $H_S > 2,5\text{m}$ e duração mínima de 24h, para cada estado e em seguida calculado o percentual que cada Classe representa. O estado do Rio Grande do Sul registrou o maior número de casos de ressaca, com 8.235 ocorrências,

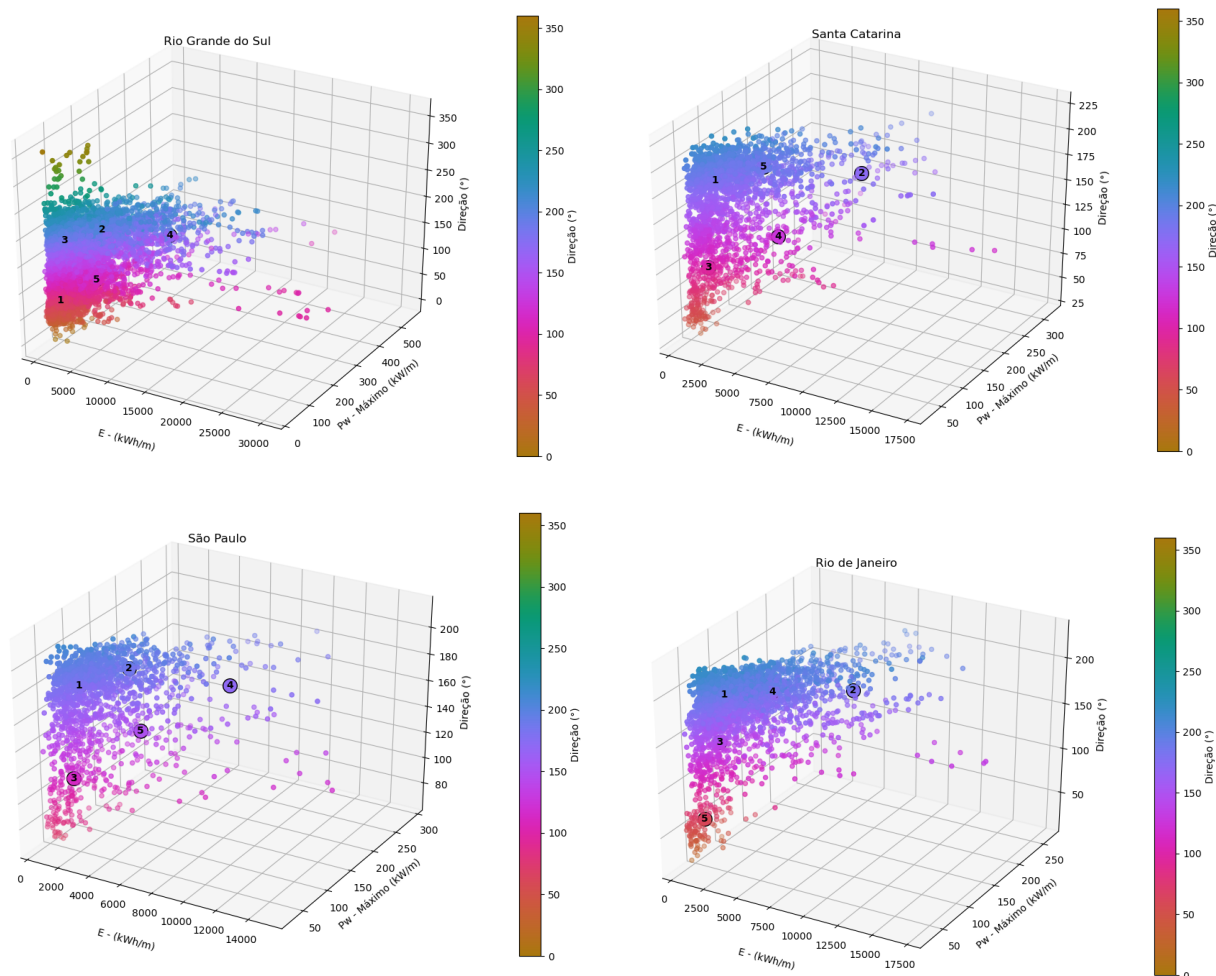


Figura 4.21: Visualização 3D da clusterização.

o que representa 50% do total de casos no Brasil. O Rio de Janeiro segue com 17,6% e Santa Catarina, com 14,6%, ocupando a segunda e terceira posição, respectivamente. Quanto à intensidade, as ressacas de Classe I foram as mais frequentes. No Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo, esses eventos leves constituíram mais de 60% dos casos. Especificamente, no Rio Grande do Sul, 40,4% das ressacas leves tiveram direção média de S. Em São Paulo e no Espírito Santo, a proporção de ressacas leves com direção média de S foi de 46,4% e 48,6%, respectivamente. Em Santa Catarina, 46,9% das ressacas leves tiveram direção média SE, enquanto no Rio de Janeiro, 38,9% dos casos foram classificados como leves, com direção E. Curiosamente, no Paraná, as ressacas leves não foram as mais comuns, mas ainda representaram 45,6% dos casos, com a direção média predominante também de S.

Tabela 4.7 - Escala de classificação de eventos de ressaca para os estados da costa S/SE brasileira, contendo os valores para cada uma das variáveis que a compõem.

Estado	Classe	E_{min}	E_{max}	$Dir_{med}(^{\circ})$	P_{Wmax}	Freq.	%
R. Grande do Sul	Classe I	560	4380	77	50	2073	25,2
		620	5300	188	60	3326	40,4
	Classe II	1640	11000	195	130	810	9,8
		1800	10000	114	100	1427	17,3
	Classe III	5200	30000	175	220	599	7,3
	Santa Catarina	Classe I	540	4200	34	90	469
540			4200	136	100	1114	46,9
Classe II		1700	9100	165	130	488	20,5
		2000	6700	200	200	189	8
Classe III		5000	17200	170	320	115	4,8
Paraná		Classe I	620	2500	170	70	113
	650		5200	110	100	71	17,6
	Classe II	1300	4300	180	120	150	37,2
		1800	8200	165	190	58	14,4
	Classe III	5800	13100	160	170	11	2,7
	São Paulo	Classe I	615	5000	110	95	261
670			4000	180	95	730	46,4
Classe II		1600	6300	190	170	346	22
		2200	9250	150	145	149	9,5
Classe III		4000	15000	170	290	88	5,6
R. de Janeiro		Classe I	570	590	95	100	318
	645		3600	85	180	1114	38,9
	Classe II	1400	5600	190	140	911	31,8
		2440	9750	180	220	406	14,2
	Classe III	5480	17200	180	265	114	4
		Classe I	695	1900	30	60	15
660			3600	175	85	406	48,6

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 4.7

Estado	Classe	E_{min}	E_{max}	Dir_{med}	$P_{Wmax}(\circ)$	Freq.	%
Espírito Santo	Classe II	680	6600	125	80	182	21,8
		1460	6260	170	150	204	24,4
	Classe III	5000	14600	160	180	28	3,4

A Classe II de ressacas, que corresponde a eventos de intensidade moderada, é predominante em alguns estados, representando 51,6% dos casos no Paraná e 46% , no Rio de Janeiro e Espírito Santo. Embora o Rio Grande do Sul tenha o maior número total de eventos de ressaca, apenas 27,1% deles são classificados como Classe II, o menor percentual entre todos os estados considerados. Quanto às direções predominantes das ressacas moderadas, o Rio de Janeiro apresentou uma direção média de S em ambas as subclassificações. Para os estados do Rio Grande do Sul e Espírito Santo, as subclassificações apresentaram direções médias de E e SE. Já para Santa Catarina, elas apresentaram direções médias de S e SE respectivamente.

No caso dos eventos de Classe III, que são os mais severos, o Rio Grande do Sul lidera com 7,3% dos casos, seguido por São Paulo, com 5,6%. Embora em Santa Catarina, os eventos de Classe III representem apenas 4,8% dos casos, o estado apresentou o maior valor de P_{Wmax} , indicando que, embora menos frequentes, as ressacas podem ser particularmente muito energéticas quando ocorrem.

4.4.1 Aplicação da escala para eventos de ressaca comprovados

Para verificar a eficácia da escala de classificação proposta, utilizaram-se as informações disponíveis no S2iD. O referido sistema é um conjunto de ferramentas mantidas pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil - SEDEC e tem como finalidade melhorar a gestão de riscos e desastres no Brasil. Ele busca alcançar esse objetivo por meio da informatização dos processos e da disponibilização de dados sistematizados (Brasil Defesa Civil, 2024). A utilização dessas informações permitiu uma avaliação mais qualificada e transparente da aplicabilidade da escala de classificação.

Apesar da importância da S2iD, nota-se que a maioria dos estados não registra, de forma consistente, informações sobre os desastres ocorridos. Contudo, o estado de Santa Catarina se destaca como uma exceção, mantendo um registro atualizado e detalhado

dos desastres que acontecem. Assim, a análise de classificação de eventos de ressaca se concentrou nos dados referentes a esse estado, abrangendo o intervalo de tempo de 2011 a 2021.

4.4.1.1 Estado de Santa Catarina

Para aplicar a escala de classificação de ressacas em Santa Catarina, inicialmente, foram selecionados os casos que atenderam o critério estipulado, isto é, eventos com $H_S > 2,5\text{m}$ e duração superior a 24h. Feita essa seleção, efetuou-se um cruzamento com as datas dos registros de ressaca obtidos no S2iD.

Durante o período analisado, foram registrados 81 casos de ressacas, dos quais 40 foram comprovados e classificados com base nos critérios estabelecidos. Além da classificação, foi direcionada atenção especial aos eventos de ressaca que resultaram em prejuízos financeiros significativos para as cidades afetadas. Foram identificados 33 eventos que causaram danos a diversas infraestruturas, incluindo unidades habitacionais, instalações públicas educacionais, serviços públicos diversos, serviços comunitários e obras de infraestrutura pública. O impacto financeiro desses danos nos cofres públicos alcançou o total de R\$ 35.982.243,28, sublinhando a importância de uma gestão eficaz de riscos e desastres, para mitigar as perdas financeiras associadas a eventos de ressaca (Brasil Defesa Civil, 2024).

Na Tabela 4.8 são observadas as localidades com ocorrência de ressacas em Santa Catarina, juntamente com o total de eventos e número de classificações com a escala proposta. Dentre os municípios catarinenses afetados pelas ressacas, os que apresentaram mais eventos são: Balneário Barra do Sul, com 20 eventos e Itapoá, com 10 ocorrências. Considerando o Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro de SC (Santa Catarina, 2006), que divide a costa catarinense em cinco áreas (conforme ilustrado na Figura 4.22), observa-se que 85% dos casos reportados concentram-se nas regiões Norte e Centro-Norte do estado. Essa distribuição geográfica dos eventos de ressaca reforça a necessidade de medidas específicas de gerenciamento e prevenção de riscos nessas áreas, em linha com as diretrizes estabelecidas pelo plano estadual.

Tabela 4.8 - Eventos de ressaca no estado de Santa Catarina entre os anos de 2011 a 2021 registrados no Si2D e quantidade dos mesmos que foram classificados segundo a escala gerada.

Eventos de ressaca - SC					
Local	N° eventos	Classificados	Local	N° eventos	Classificados
B. B. do Sul	20	6	Garopaba	3	3
Itapoá	10	6	Bombinhas	2	0
B. Camboriú	7	3	Itapema	2	2
Barra Velha	6	3	Araranguá	1	1
Florianópolis	5	3	Botuverá	1	0
Navegantes	5	1	Itajaí	1	1
São F. do Sul	5	3	Penha	1	0
Porto Belo	4	2	Pesc. Brava	1	0
B. Piçarras	3	3	Tijucas	1	1
B. Rincão	3	2			

Embora a relação entre o crescimento populacional e a ocorrência de catástrofes não seja diretamente proporcional (Leal et al., 2023), a região norte e centro-norte de Santa Catarina, que inclui localidades como Balneário Barra do Sul, Itapoá, Barra Velha, Balneário Piçarras, Balneário Camboriú, Navegantes e Itapema, apresentaram um elevado crescimento populacional, quando considerado o período de 1998 a 2020. Para a região norte, Balneário Barra do Sul, Itapoá e Barra Velha registraram crescimentos de 237%, 163,6% e 111,8%, respectivamente. Na porção centro-norte, Balneário Piçarras, Balneário Camboriú, Navegantes e Itapema cresceram 134,7%, 134,2%, 141,5% e 245,5%, respectivamente (Leal et al., 2023; IBGE, 2020). Esse significativo aumento demográfico, juntamente com as características geográficas das praias, pode amplificar os impactos das condições litorâneas adversas. Um estudo de Silveira et al. (2019) destaca, por exemplo, como estruturas sem proteção natural em Itapoá são afetadas diretamente por ondas fortes, ilustrando os potenciais riscos associados ao crescimento populacional costeiro.

Em contraste, as regiões Centro-Sul e Sul de Santa Catarina apresentam uma menor quantidade de eventos de ressaca. Cabe ressaltar que essas regiões apresentam uma menor densidade populacional ao longo de sua linha costeira, além de características geográficas distintas, como a presença de restingas e dunas. De acordo com Bulhões (2020), esses elementos naturais desempenham um papel crucial na mitigação da erosão causada por ressacas. A vegetação de restinga e as formações dunares atuam como barreiras físicas que absorvem a energia das ondas, reduzindo o impacto direto sobre a linha de costa e as infraestruturas construídas próximas a ela.



Figura 4.22: Municípios catarinenses pertencentes a zona costeira.

Fonte: Adaptado de Leal et al. (2023)

A classificação dos eventos de ressaca comprovados é apresentada de forma detalhada na Tabela 4.9. As Classes I e II, caracterizadas por terem duas subdivisões, receberam nomenclaturas específicas para facilitar a diferenciação. Para a Classe I, as faixas foram nomeadas como “Leve 1”, para a primeira faixa e “Leve 2”, para a segunda. Similarmente, foram nomeadas as subdivisões da Classe II.

Tabela 4.9 - Eventos de ressaca e sua classificação a partir da escala criada. Também é possível observar a energia total associada ao evento (E_{total}), o fluxo de energia máximo ocorrido (P_{Wmax}) e a direção média das ondas (Dir_{med}).

Localidade	Classe	Duração (h)	E_{total}	P_{Wmax}	$Dir_{med}(^{\circ})$
Florianópolis	Severa	60	5644,0	200,1	179,9
Porto Belo	Severa	54	4949,0	175,7	177,8
Balneário Rincão	Severa	69	6641,3	197,4	177,1
Balneário Barra do Sul	Severa	90	7216,9	131,8	182,9
Itapoá	Severa	132	13093,9	157,3	128,5

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 4.10

Localidade	Classe	Duração (h)	E_{total}	P_{Wmax}	$Dir_{med}(^{\circ})$
Itapoá	Severa	60	5902,0	165,5	179,9
Itajaí	Severa	63	6639,7	194,0	179,8
Araranguá	Severa	90	10480,4	261,5	170,8
Tijucas	Severa	66	7576,5	211,2	183,0
Navegantes	Severa	60	5902,0	165,5	179,9
Balneário Rincão	Severa	60	5902,0	165,5	179,9
Balneário Barra do Sul	Severa	60	5902,0	165,5	179,9
Florianópolis	Severa	66	7576,5	211,2	183,0
Porto Belo	Severa	63	6639,7	194,0	179,8
Barra Velha	Severa	81	7902,2	215,7	168,0
São Francisco do Sul	Moderada 2	60	3006,1	67,0	140,6
Barra Velha	Moderada 2	36	1400,6	46,2	150,1
Balneário Camboriú	Moderada 2	36	1419,1	46,6	152,7
Itapoá	Moderada 2	27	1637,6	74,0	190,7
Garopaba	Moderada 2	24	1042,6	56,2	186,6
Balneário Barra do Sul	Moderada 2	66	2579,8	62,1	139,6
Balneário Barra do Sul	Moderada 1	60	4019,4	116,8	160,8
Garopaba	Moderada 1	81	5411,3	129,5	174,9
Balneário Camboriú	Moderada 1	54	4469,1	147,6	178,5
São Francisco do Sul	Moderada 1	39	2698,0	129,9	202,4
Itapoá	Moderada 1	111	7538,8	107,4	163,0
Garopaba	Leve 2	57	1904,4	42,5	120,3
Itapema	Leve 2	51	1708,7	37,9	120,5
Itapema	Leve 2	51	1708,7	37,9	120,5
Balneário Barra do Sul	Leve 2	66	1771,4	32,9	43,3
Balneário Piçarras	Leve 1	48	2982,2	78,3	135,0
Balneário Camboriú	Leve 1	48	2982,2	78,3	135,0
São Francisco do Sul	Leve 1	69	3642,4	82,7	135,6
Balneário Piçarras	Leve 1	75	6016,6	107,5	92,3
Balneário Piçarras	Leve 1	75	6016,6	107,5	92,3
Itapoá	Leve 1	81	6502,4	105,9	95,0
Itapoá	Leve 1	111	5484,3	63,8	114,7
Balneário Camboriú	Leve 1	93	5239,2	71,3	111,0
Florianópolis	Leve 1	147	8340,7	89,7	94,4
Balneário Barra do Sul	Leve 1	144	8161,2	81,6	101,7

Segundo Leal et al. (2023), que investigaram desastres ao longo de 22 anos na costa

de Santa Catarina, houve um aumento significativo no número de eventos catastróficos entre 2010 e 2020, em comparação com o período de 1998 a 2009. Eles sugerem que este crescimento pode ser atribuído, principalmente, a dois fatores: o avanço tecnológico e a consequente melhoria nos bancos de dados digitais da Defesa Civil, bem como o aumento da urbanização em áreas costeiras. Além disso, as mudanças climáticas têm intensificado eventos atmosféricos e oceanográficos extremos. A combinação destes fatores contribui não apenas para a maior ocorrência de desastres, mas também para uma melhor capacidade de registro e análise desses eventos, permitindo uma compreensão mais clara da dinâmica e impacto das catástrofes naturais nas zonas costeiras.

Dos 40 eventos, 15 foram classificados como Classe III, 14 como Classe I e 11 como Classe II. Notavelmente, dentro da Classe III, um evento em particular se destacou não apenas pela sua intensa energia, mas também por sua notável duração de 132 horas. Além disso, esse evento apresentou uma direção média proveniente do quadrante E/SE, o que o diferencia dos demais casos, os quais apresentavam direções predominantemente de S. Esse caso específico destaca a variabilidade nas características dos eventos de ressaca, enfatizando a importância de uma classificação detalhada, que leva em conta tanto a energia e duração do evento, quanto a direção de origem das ondas.

Para entender melhor esse evento, foram utilizados os dados da reanálise ERA-5 (Hersbach et al., 2020), para gerar mapas de pressão ao nível do mar e vento em superfície, para o período do evento que ocorreu entre 10 a 15 de agosto de 2017. Os mapas permitiram visualizar a evolução sinótica desse evento, podendo ser observado na Figura 4.23. A partir do dia 11, a costa catarinense começou a ser influenciada por ventos de leste, originados de um anticiclone, centralizado na latitude 50°S e longitude 40°W. No dia 12, observou-se um aumento na intensidade desses ventos, que passaram a soprar de NE, mantendo-se assim até o dia 14, mesmo diante da aproximação de um ciclone na costa do Rio Grande do Sul. Com o avanço desse ciclone para leste, houve uma redução significativa na intensidade dos ventos próximos à costa de Santa Catarina, que passaram a predominar de L/SE, especialmente na parte norte do estado.

Este evento de ressaca atípico ganhou destaque em diversos veículos de notícias, como o G1-Globo (G1-Globo, 2017), devido ao fenômeno de recuo do mar em até 50 metros, nas praias de Balneário Camboriú, Atalaia, Itajaí, Porto Belo, Imbituba, na Lagoa de Santo Antônio, Laguna, Balneário Rincão e Florianópolis. Esse recuo é explicado pelo efeito do

transporte de Ekman (Ekman, 1905), que, no hemisfério sul, resulta no empilhamento de água à esquerda da direção do vento. Contribuiu para a intensidade deste fenômeno, a ocorrência de uma maré de sizígia no dia 07 de agosto. Os registros dos marégrafos da Epagri (Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina) indicaram uma redução significativa do Nível Médio do Mar (NMM), alcançando 65 cm, em Balneário Camboriú e 61 cm, em Imbituba.

As condições sinóticas observadas durante o evento de ressaca atípico foram minuciosamente analisadas e comparadas com a literatura existente. Nesse contexto, o estudo conduzido por de Souza et al. (2022), que resultou na identificação de 36 tipos de tempo distintos (*weather types* - WT), representando 95% das condições atmosféricas mais habituais ao longo da costa sul do Brasil, serviu como um importante ponto de referência. Contudo, ao buscar padrões específicos que pudessem estar relacionados com o referido evento de ressaca, não foi identificada nenhuma correspondência com os 36 WT estabelecidos. Essa procura por conexões foi além, abrangendo estudos adicionais focados em padrões climatológicos vinculados a eventos extremos de ondas, tais como as investigações realizadas por Machado et al. (2019) e Laviola da Silva et al. (2023). Apesar desses esforços complementares, a análise não revelou qualquer correlação direta.

Embora Itapoá tenha sido o único município de Santa Catarina a registrar oficialmente a ocorrência do evento de ressaca no S2iD, o fenômeno impactou diversas outras localidades. Itajaí e Navegantes, por exemplo, enfrentaram condições tão severas que os portos dessas cidades tiveram que ser fechados, temporariamente (NDMais, 2017). Inclusive as praias da porção norte da Ilha de Florianópolis, geralmente protegidas das ondulações de quadrante sul, foram excepcionalmente afetadas, resultando em danos a estruturas construídas próximas à orla (Gaúcha-ZH, 2017).

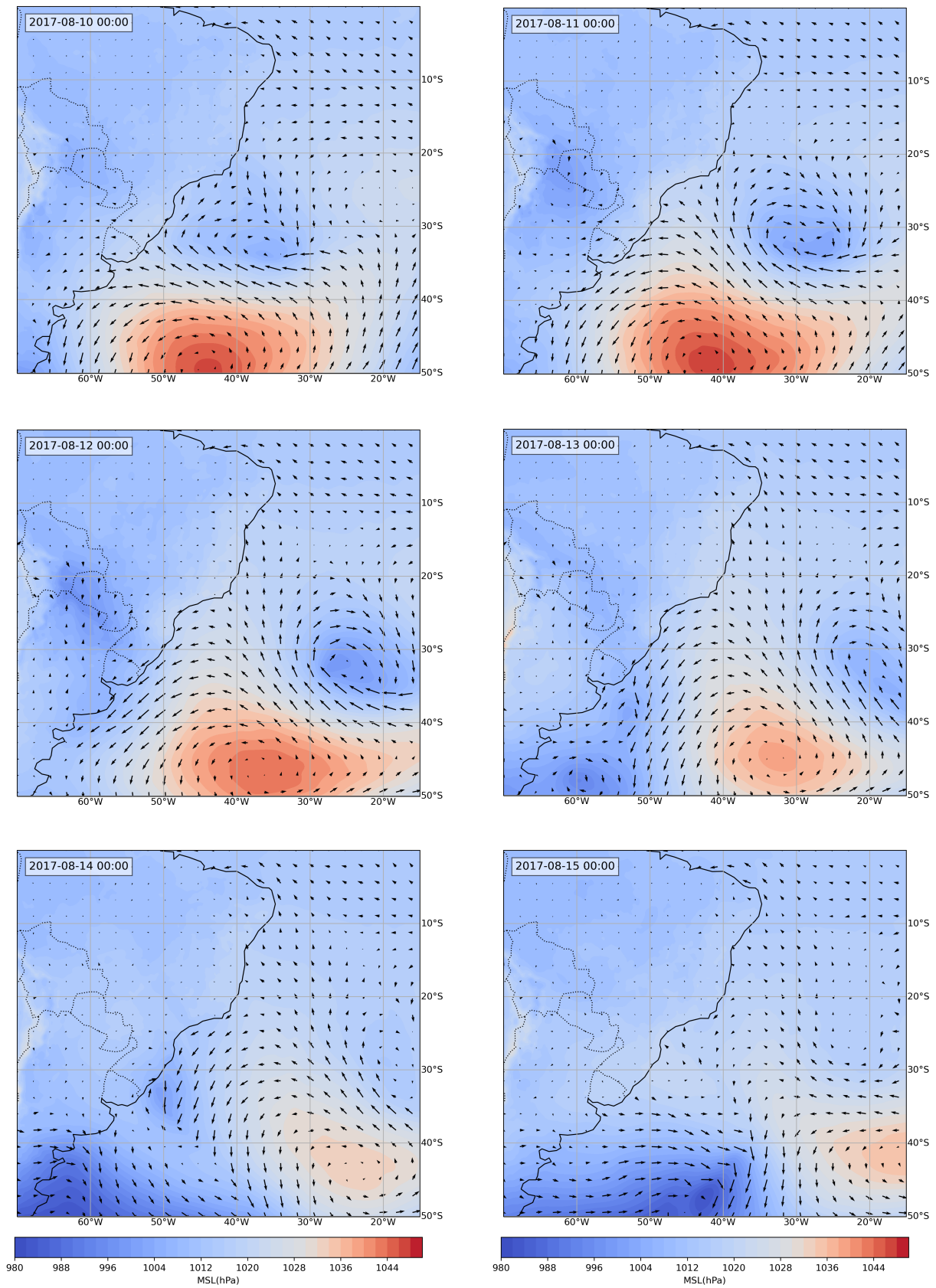


Figura 4.23: Evolução sinótica do evento de ressaca que atingiu Itapoá no período de 10 a 15 de agosto de 2017.

Outro evento de ressaca notável, classificado como Classe III, ocorreu entre 27 e 31 de outubro de 2016. Este evento teve seu impacto registrado no S2iD em várias cidades, incluindo Itapoá, Itajaí, Tijucas, Navegantes, Balneário Rincão e Balneário Barra do Sul, enquanto Florianópolis, Porto Belo e Araranguá não sofreram danos. Araranguá, em particular, experimentou as condições mais extremas, com ondas superiores a 2,5 metros, durante um período prolongado de 90 horas, além de receber o maior fluxo de energia de ondas registrado no evento, atingindo 261,5 kJ/m.



Figura 4.24: Alagamentos em Itajaí (superior esquerdo e direito), danos na orla de Navegantes (inferior esquerdo) e alagamentos em Balneário Rincão (inferior direito).

Fonte: G1-Globo (2016).

Apesar de nove cidades terem efetuado o registro de estragos no S2iD, a Defesa Civil de Santa Catarina informou que os prejuízos se estenderam a um total de 15 municípios ao longo do litoral catarinense. Em decorrência do evento, 84 pessoas necessitaram ser desalojadas, sendo a maior parte advinda de Tijucas (40 pessoas), seguido por Balneário

Barra do Sul (36 pessoas) e Itapoá (8 pessoas). Além disso, quatro casas em Balneário Barra do Sul e uma em Itapoá foram condenadas, devido aos danos sofridos, conforme reportado pelo G1 (G1-Globo, 2016). A Figura 4.24 documenta visualmente os alagamentos e os danos causados pela ressaca em locais como Itajaí, Navegantes e Balneário Rincão, evidenciando a severidade do evento e seu amplo impacto nas comunidades costeiras.

A Figura 4.25 ilustra as condições sinóticas que contribuíram para a severidade da ressaca observada. No início do dia 27, um forte ciclone começou a atuar na costa sul do Brasil, intensificando-se ao longo do dia. Isso resultou em ventos intensos do quadrante S/SW, que causaram empilhamento de água na costa, devido ao transporte de Ekman. Esses ventos persistiram até o dia 29, quando a alta pós-frontal trouxe a mudança na direção dos ventos, passando para E/NE nos dias 30 e 31.

Outro fator que intensificou o impacto da ressaca foi a ocorrência de uma maré de sizígia no dia 30. Embora Santa Catarina não tenha as maiores amplitudes de maré do Brasil, as previsões para o período indicaram variações significativas de mais de um metro entre a preamar e a baixa-mar (Brasil-DHN, 2016). Além disso, é importante ressaltar que os efeitos de uma maré de sizígia começam a se manifestar três dias antes e podem se estender até três dias após a lua nova/cheia. Esse fenômeno, combinado às condições meteorológicas adversas, contribuiu para a gravidade dos danos causados pela ressaca.

A evolução sinótica do evento de ressaca mencionado alinha-se perfeitamente com o padrão climático para extremos de onda (Weather Pattern - WP) gerados Laviola da Silva et al. (2023). Nesse estudo, os autores definem padrões para eventos extremos de onda em diferentes regiões da costa brasileira, utilizando o método *K-Means* para a classificação. De acordo com Laviola da Silva et al. (2023), o evento em questão corresponde ao WP-2, que é responsável por 31,2% dos casos de ondas extremas na região sul do Brasil, tornando-se o padrão mais comum.

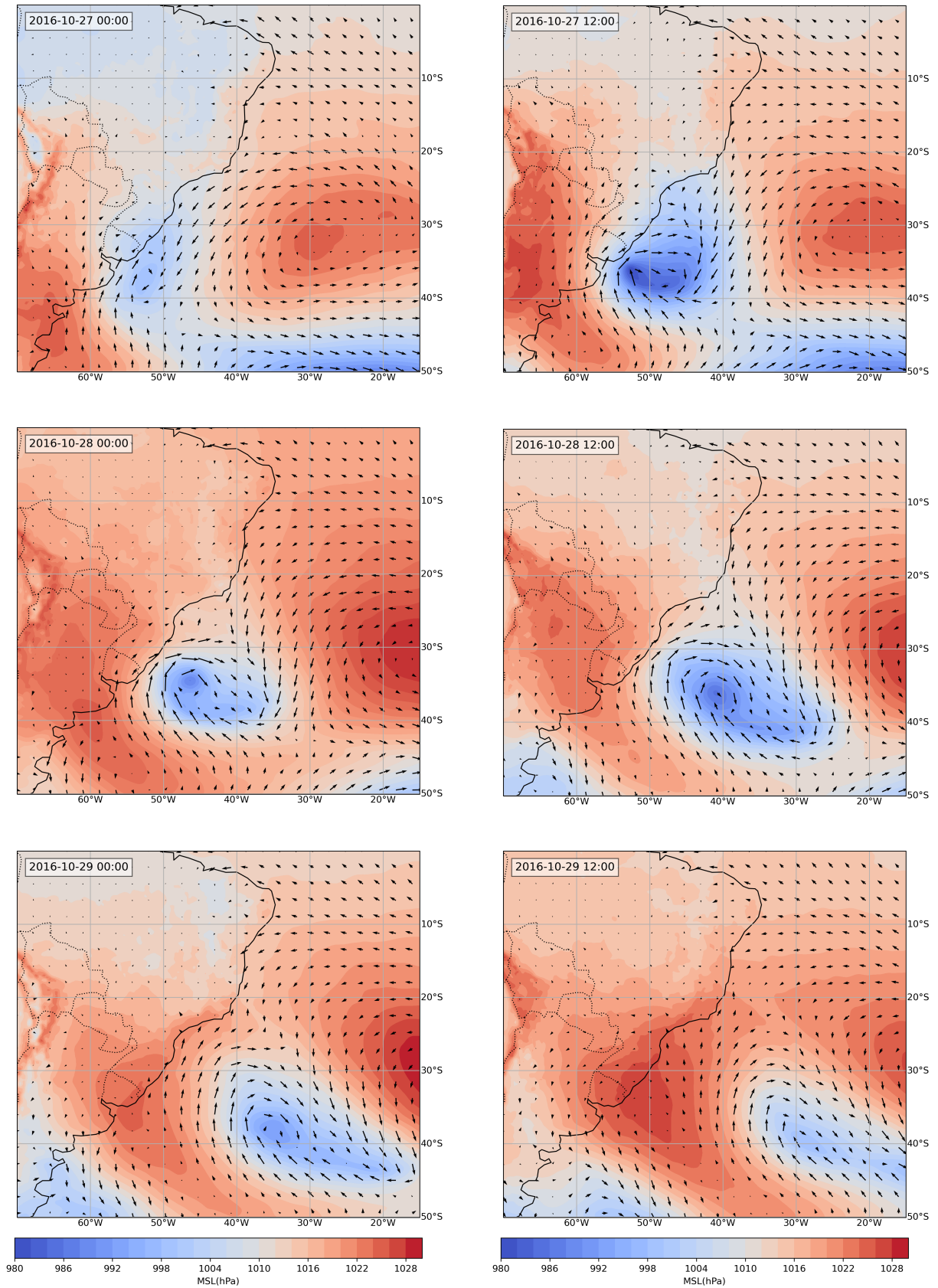


Figura 4.25: Evolução sinótica do evento de ressaca que atingiu a maior parte da costa catarinense nos dias 27 a 29 de outubro de 2016.

Embora se espere que ressacas mais intensas, classificadas como Classe III, estejam diretamente ligadas à ocorrência de danos, isso não se verifica em todos os casos. Da mesma forma, eventos classificados em classes de menor intensidade, que supostamente teriam menos impacto, também levaram a danos significativos, conforme pode ser observado na distribuição dos eventos em torno dos centroides da Figura 4.26. A intenção dessa figura é claramente destacar as diferenças entre eventos severos de ressaca (representados por pontos maiores), àqueles que causaram danos (identificados por pontos com borda preta) e eventos que não ocasionaram danos (pontos sem borda).

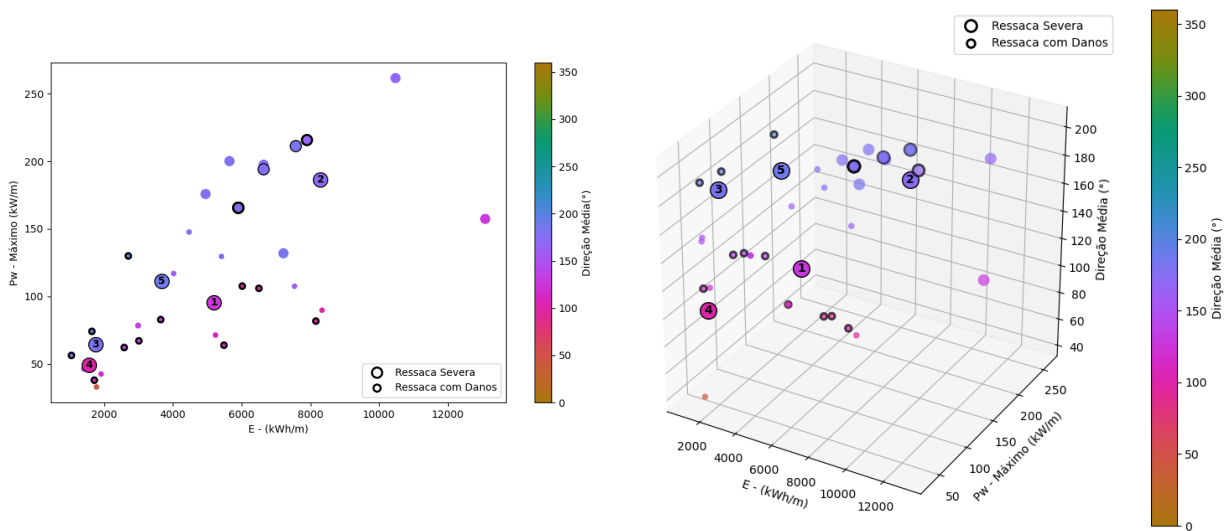


Figura 4.26: Eventos de ressacas comprovados para o estado de Santa Catarina.

Considerando os eventos que causaram prejuízos, dos 33 registrados, apenas 18 atenderam aos critérios estabelecidos na escala de classificação. Para compreender as razões pelas quais os demais eventos não se enquadraram nos critérios, realizou-se uma investigação detalhada. Inicialmente, avaliou-se a influência de marés de sizígia, que, conforme Pugh (1987), são conhecidas por amplificar os efeitos das ressacas. Posteriormente, examinou-se a altura significativa das ondas (H_S), para os três dias anteriores e posteriores a cada evento, com os resultados obtidos sendo apresentados na Tabela 4.10.

Essa análise revelou que a maior parte dos eventos estava sob a influência das marés de sizígia. Ao examinar H_S , constatou-se que, apesar de alguns eventos atingirem ou até excederem 2,5 metros, esse valor não foi sustentado por um período de 24 horas. Em alguns casos, as ondas tinham amplitudes menores, cerca de 1,5 metro, o que demanda uma investigação mais detalhada. Uma hipótese levantada é que pode ter ocorrido um

erro no registro das datas no sistema, indicando a complexidade em catalogar e analisar precisamente esses fenômenos. Denota-se, portanto, a importância de se desenvolverem sistemas de registro acurados para a gestão de desastres naturais.

Embora a avaliação tenha se concentrado nos eventos que resultaram em danos, sugere-se que, para aqueles casos que não geraram danos e que não atenderam aos critérios estabelecidos, a influência da maré de sizígia tenha sido o fator determinante para a ocorrência das ressacas. Essa hipótese reforça a importância das condições de maré na amplificação dos efeitos das ressacas, mesmo em situações onde a H_S não se mantém elevada por períodos prolongados.

Tabela 4.10 - Eventos de ressaca que causaram danos financeiros que não se enquadraram no critério 1 e fases da lua correspondentes.

Cidade	Dia Evento	Fase lua	Data	Hs	Observação
B. Barra do Sul	27/04/21	Cheia	27/04/21	$\approx 2,5m$	$> 2.5m$, Período $< 24h$
B. Barra do Sul	09/09/17	Cheia	06/09/17	$\approx 2,5m$	$> 2.5m$, Período $< 24h$
B. Barra do Sul	09/09/17	Cheia	06/09/17	$\approx 2,5m$	$> 2.5m$, Período $< 24h$
Barra Velha	13/09/17	Ming.	13/09/17	$\approx 2,5m$	
Bombinhas	12/10/17	Ming.	12/10/17	$\approx 2m$	
Florianópolis	10/05/21	Nova	11/05/21	$< 1,5m$	05/10 ressaca. Possível erro de lançamento no S2iD
Florianópolis	13/09/17	Ming.	13/09/17	$\approx 2,5m$	
Itapoá	03/10/21	Nova	06/10/21	$\approx 1,5m$	
Itapoá	25/04/21	Cheia	27/04/21	$\approx 2,5m$	
Itapoá	04/08/19	Nova	01/08/19	$< 1,5m$	08/04 ressaca. Possível erro de lançamento no S2iD
Navegantes	16/09/17	Ming.	13/09/17	$\approx 2,5m$	
Navegantes	03/05/11	Nova	03/05/11	$< 1,5m$	
Penha	04/06/11	Nova	01/06/11	$\approx 1,5m$	
S. F. do Sul	12/11/17	Ming.	10/11/17	$\approx 1,5m$	
S. F. do Sul	07/10/17	Cheia	12/10/17	$\approx 2m$	Ondas acima de 2,5 m de 04 a 06

A ocorrência de danos costeiros provocados por ressacas de Classe I e II acende um alerta sobre a vulnerabilidade das zonas costeiras, especialmente em contextos de ocupação humana inadequada. Como apontado por Klein et al. (2006), a principal causa de erosão e recuo da linha de costa em Santa Catarina é a ocupação indevida dessas áreas. Diante disso, torna-se crucial aprofundar o entendimento das interações entre os oceanos e as zonas costeiras, visando desenvolver estratégias eficazes de resposta aos desafios impostos pela subida do nível do mar e pela erosão costeira, conforme destacado nos relatórios do IPCC (IPCC, 2021, 2022). Isso é particularmente importante para a região Centro-Norte de Santa Catarina, que tem enfrentado intensas transformações ocasionadas por mega empreendimentos imobiliários, exacerbando os riscos associados a eventos de ressaca e a

gestão sustentável das áreas costeiras.

4.4.1.2 *Demais estados da costa S/SE*

A carência de um banco de dados detalhado e confiável sobre ressacas limitou a capacidade de aplicar a escala de classificação desenvolvida para eventos em estados além de Santa Catarina. Ao tentar coletar essas informações junto às Defesas Cíveis estaduais, observou-se uma variação significativa no nível de importância atribuído a esses eventos. Santa Catarina e Paraná disponibilizam relatórios detalhados em seus sites, enquanto o Espírito Santo fornece apenas dados sobre os prejuízos causados. Outros estados parecem limitar-se a retransmitir avisos de ressaca emitidos pela Marinha do Brasil.

A Defesa Civil do Rio Grande do Sul destacou que, apesar de monitorar e emitir alertas para eventos adversos como vendavais e inundações, não mantém dados específicos sobre ressacas, recomendando a consulta à Marinha do Brasil, para tais informações. Similarmente, a Defesa Civil do Rio de Janeiro não possui um banco de dados específico para eventos de ressaca, sugerindo que se busque informações junto ao Corpo de Bombeiros. Não houve contato com a Defesa Civil de São Paulo.

A análise realizada para Santa Catarina, beneficiada por um banco de dados robusto, revelou que muitas ressacas, mesmo sem atender ao critério 1, causam danos significativos. Essa constatação sugere que, para outros estados, especialmente aqueles com maior variação na amplitude das marés em latitudes mais baixas, muitos eventos podem não estar sendo devidamente registrados ou informados à população. Especula-se que o Rio Grande do Sul, com sua menor influência de maré, poderia proporcionar uma avaliação mais precisa da aplicabilidade da escala de classificação de ressacas criada, destacando-se a necessidade de um registro mais sistemático e abrangente de eventos de ressaca ao longo de toda a costa brasileira.

4.5 *Roteiro para a previsão de ressacas*

Ter um roteiro detalhado e bem estruturado é essencial para auxiliar na tomada de decisões diante da ocorrência de ressacas, contribuindo significativamente para a mitigação de riscos, proteção da vida humana no mar e salvaguarda de propriedades nas áreas costeiras. Este guia visa apoiar meteorologistas e oceanógrafos na análise e interpretação

de dados e saídas de modelos, assegurando previsões precisas e confiáveis. Além disso, a existência de um roteiro detalhado é fundamental para padronizar o processo de previsão, garantindo a consistência e possibilitando a comparação de previsões ao longo do tempo e entre diferentes regiões.

Para otimizar a análise e previsão de ressacas, sugere-se seguir o passo a passo detalhado a baixo:

1. **Modelos numéricos** - Escolha sempre os modelos com alta resolução próxima a costa. Atualmente, o CHM é responsável por gerar produtos de maior resolução, sendo que para a METAREA-V, ela é de 9 km e para a região costeira, 3,6km. Não se apegue apenas ao prognóstico de H_S e Direção, visto que comumente é plotado a direção média das ondas, que não possui representatividade física e não necessariamente representa o deslocamento de um sistema de ondas (Figura 4.27). Olhe com cautela os mapas de $T_P \times D_P$ (direção da componente de maior energia), ondas com períodos elevados são mais energéticas mas comumente possuem alturas menores. Caso tenha disponível um mapa de $H_S \times D_P$, priorize este.

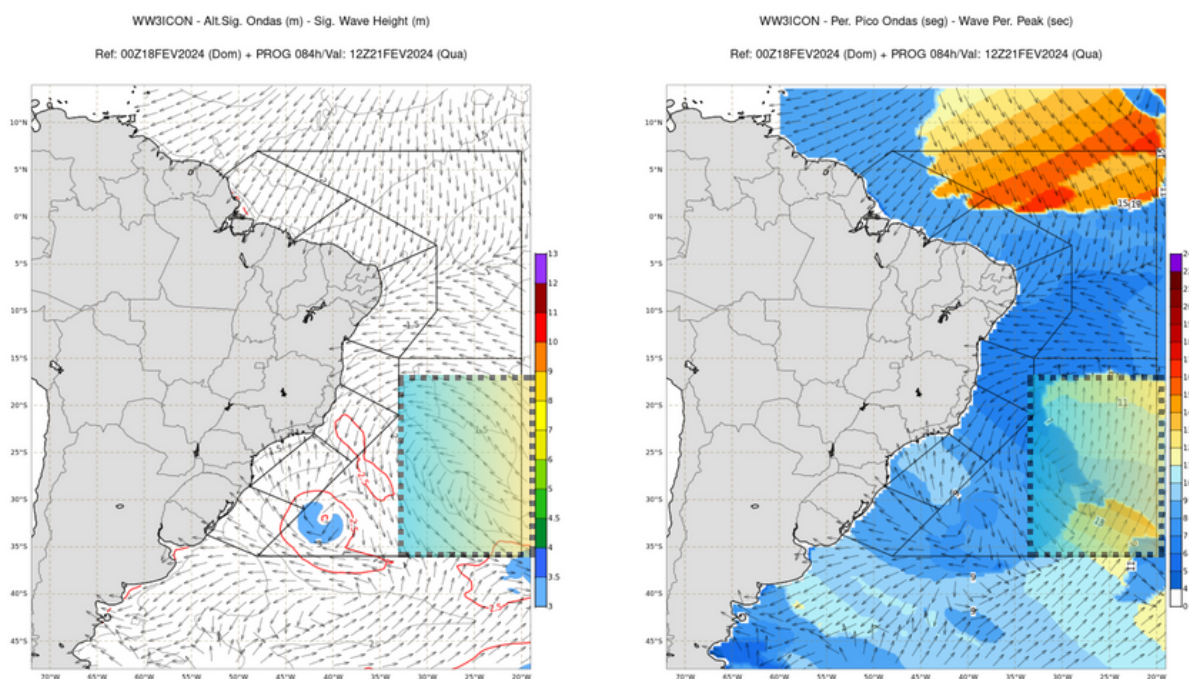


Figura 4.27: Prognóstico de ondas para o dia 21 de fevereiro de 2024. $H_S \times D_{MEDS}$ (esquerda) e $T_P \times D_P$.

Fonte: (Brasil, CHM, 2024)

Faça uma avaliação do fluxo de energia das ondas (4.28). Lembrando P_w de 31,25kW/m é suficiente para gerar um H_{SP} de 2,5m. O Sistema de Monitoramento de Ondas para Previsão de Ressacas (SisMOPrerR), desenvolvido como parte deste trabalho, disponibiliza os mapas de $P_w \times D_P$, sendo mais uma ferramenta a ser explorada.

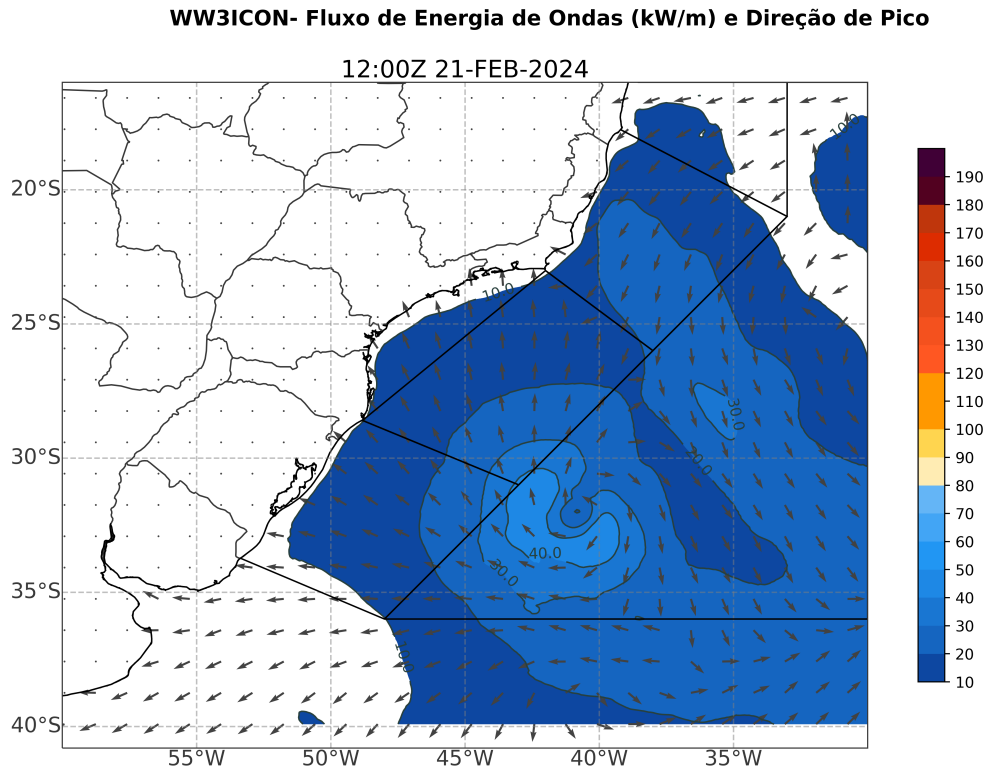


Figura 4.28: Prognóstico do Fluxo de energia de ondas (P_w) e Direção de pico para o dia 21 de fevereiro 1200Z, para a costa S/SE. Rodada de 00Z18FEV2024.

- 2. Diagramas de Hovmoller com percentis climatológicos** - Diagramas de Hovmoller permitem acompanhar a evolução temporal e espacial dos principais parâmetros de onda. Quando se associa um determinado valor ao seu percentil climatológico, fica mais fácil identificar eventos extremos (Figura 4.29). O SisMOPrerR dispõem desses dois diagramas, entretanto vale ressaltar que os percentis mudam de estado para estado. Sendo assim, consulte sempre a Tabela 4.6.

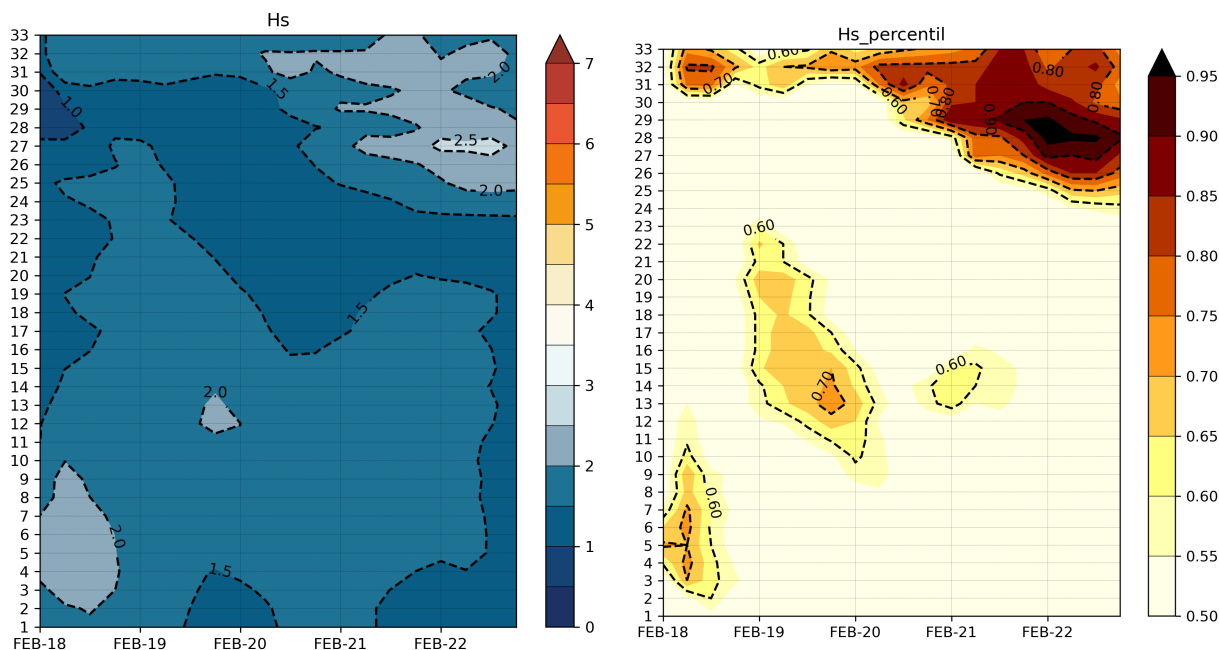


Figura 4.29: Diagramas de Howmoller para valores de H_S (esquerda) e sua correspondência com o percentil climatológico (direita) para a rodada de 00Z18FEV2024.

3. **Espectros Direcionais e PLEDS-** Espectros direcionais (2D) ajudam a identificar diferentes sistemas de ondas, suas direções de propagação e a energia associada ao evento (Figura 4.30). Já o PLEDS permite ter um acompanhamento mais detalhado do *sea* e *sweell* (Figura 4.31).

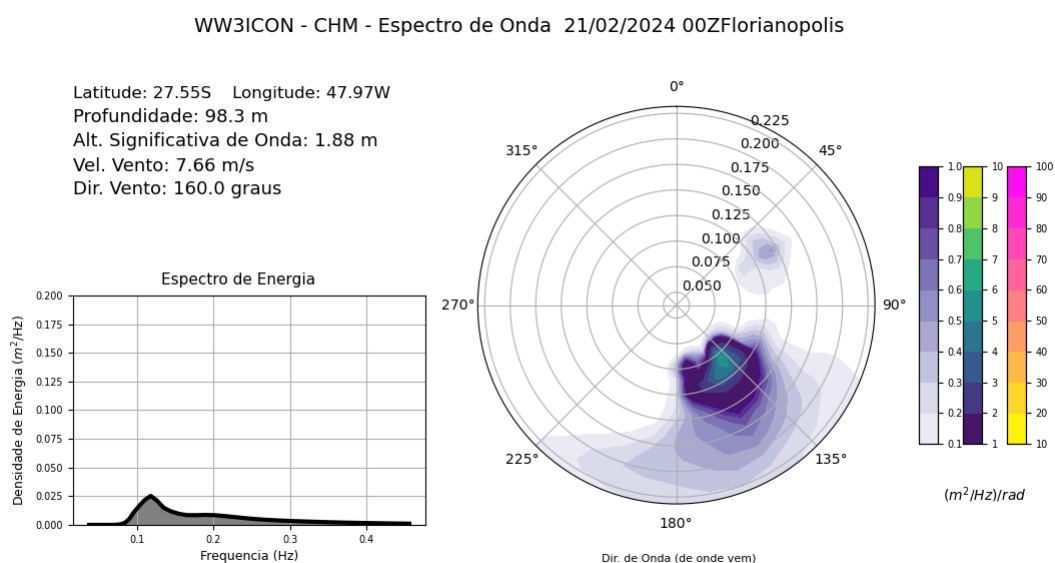


Figura 4.30: Espectro direcional para a Boia Florianópolis do PNBOIA para os dia 21 de fevereiro 1200Z (superior) e PLEDS para a mesma posição pela rodada de 00Z18FEV2024 da NOAA.

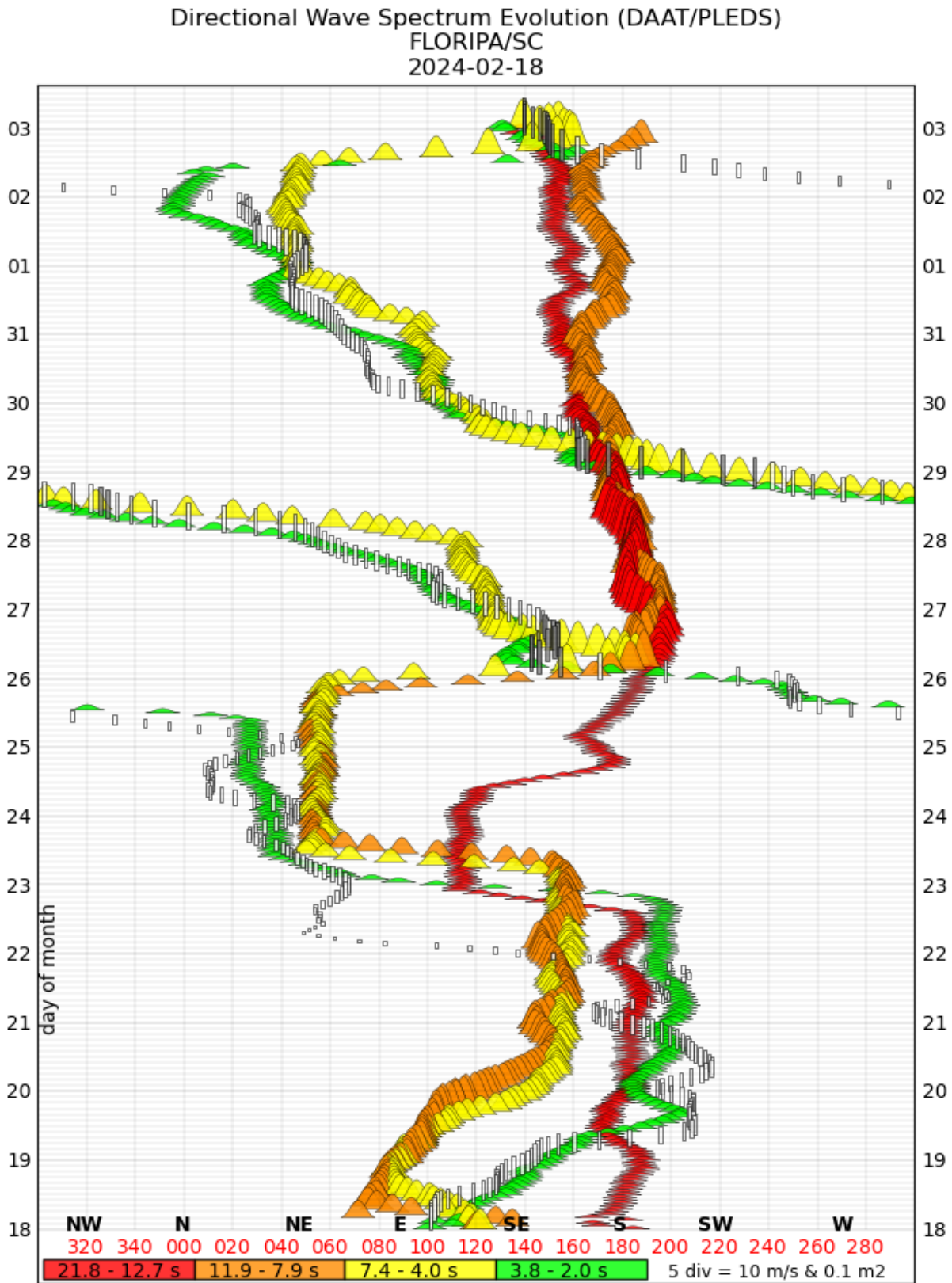


Figura 4.31: Espectro direcional para a Boia Florianópolis do PNBOIA para os dia 21 de fevereiro 1200Z (superior) e PLEDS para a mesma posição pela rodada de 00Z18FEV2024 da NOAA.

4. **Comparação de dados observados e previsão** - Essa informação permite verificar a qualidade e a confiabilidade da previsão. Não é comum esse tipo de informação estar disponível para o previsor, por esse motivo, o SisMOPreR trás essa comparação, para as boias do SiMCosta e do PNBOIA.
5. **Maré** - Verifique a ocorrência de uma maré de sizígia. Comumente seus efeitos são perceptíveis 3 dias antes e 3 dias depois da fase da lua. Além disso, as amplitudes aumentam conforme diminui a latitude. Faça comparação da maré observada e a prevista, pois isso permitirá mensurar a dimensão da maré meteorológica.
6. **Refração das Ondas** A refração ocorre quando as ondas interagem com o fundo do mar, alterando sua direção de propagação. Ondas com T_P mais longos tendem a "sentir" o fundo oceânico antes e, conseqüentemente, começam a refratar mais cedo. Esse processo resulta em uma redistribuição da energia das ondas, levando frequentemente à diminuição de H_S . A refração é um fenômeno importante na dinâmica costeira e na previsão de ressacas, pois influencia diretamente a distribuição da energia das ondas ao longo da costa, afetando tanto a erosão, quanto a deposição de sedimentos em áreas litorâneas. Utilize os mapas com P_W decomposto quando se deseja avaliar a possibilidade de erosão costeira.

O roteiro acima, servirá para um prognóstico preciso quanto à ocorrência de ressacas junto a costa, porém, para mar aberto, outros parâmetros também deverão ser avaliados. São eles:

1. **Altura máxima das ondas (H_{Max})** - Apesar de apresentarem uma probabilidade baixa de ocorrerem, essas ondas apresentam alturas que podem chegar a duas vezes o valor de H_S . Holthuijsen (2007) relata que grandes depressões precedem a ocorrência dessas ondas anômalas, tornando-as ainda mais perigosas. Considerando que o litoral brasileiro é frequentemente navegado por embarcações pesqueiras de pequeno porte, estas se tornam particularmente vulneráveis a acidentes provocados por ondas dessa magnitude.
2. **Período de Pico - (T_P)** das ondas é diretamente relacionado ao movimento e ao conforto das embarcações no mar. Ondas com um T_P pequeno, movem-se rapidamente e podem aumentar significativamente os efeitos de balanço e caturro nas embarcações.

Esse fenômeno pode afetar adversamente a navegação, tornando a viagem desconfortável e potencialmente perigosa, especialmente para embarcações menores.

Os dois fatores listados acima devem sempre ser considerados quando se for analisar as condições de mar aberto.

4.6 *Sistema de Monitoramento de Ondas para a Previsão de Ressacas (SisMOPreR)*

A disponibilidade de uma plataforma que integra resultado de modelos de ondas, dados observados de boias e informações sobre a maré representa uma ferramenta valiosa para a previsão de ressacas e a gestão de riscos costeiros. Primeiramente, a combinação desses dados permite uma compreensão mais precisa e abrangente das condições marítimas em tempo real, facilitando a identificação de padrões e tendências que antecedem eventos de ressacas. Além disso, os dados observados de boias fornecem medições diretas das condições atuais do mar e também permitem avaliar a qualidade das previsões geradas pelos modelos de onda. A disponibilidade de informações maregráficas, juntamente com a maré prevista, permite mensurar a amplitude da maré meteorológica. Essa integração de dados é essencial para alertar, com antecedência, as comunidades costeiras e os gestores de riscos sobre a iminência de ressacas, permitindo a adoção de medidas preventivas, para minimizar danos a propriedades e infraestruturas, além de garantir a segurança da população e da navegação.

Para facilitar o acesso e a análise de informações relevantes à previsão e à identificação de ressacas, desenvolveu-se uma página na internet, dedicada a agrupar esses dados essenciais, sendo denominada SisMOPreR. O site está disponível no endereço <https://sismoprer.live.com>, e a seguir, serão apresentadas as informações disponíveis.

A página conta com uma série de abas, sendo a primeira delas, dedicada aos mapas de H_S x Direção, H_S X Direção e intensidade do vento, T_P x D_P e P_W X D_P gerados em proveito das rodadas do CHM. Na Figura 4.32 é possível visualizar a aba que contém os mapas. Na aba seguinte, observa-se os diagramas de Hovmoller, com as magnitudes dos principais parâmetros de onda e sua correspondência com a climatologia (Figura 4.33).

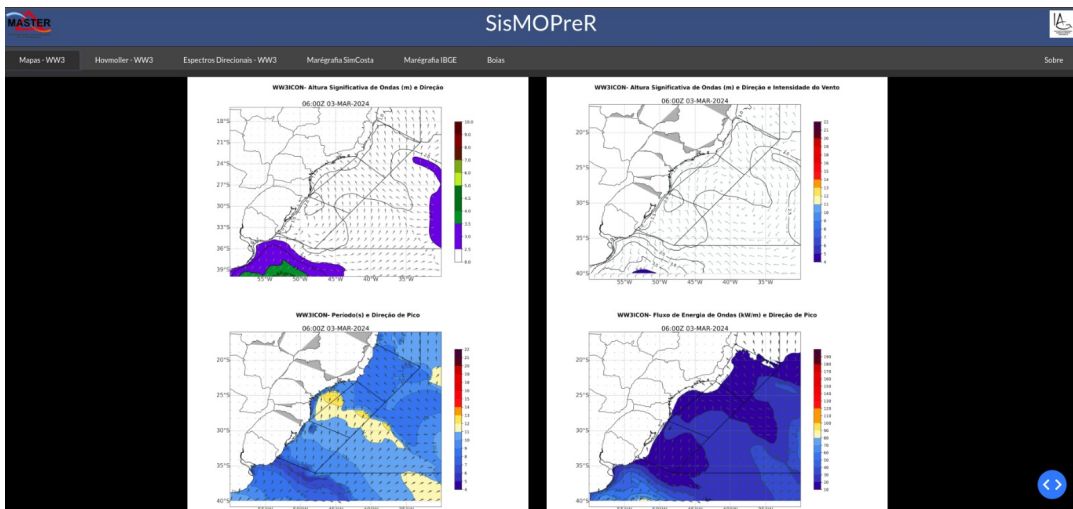


Figura 4.32: Mapas dos principais parâmetros de ondas, gerados a partir das rodadas do WW3 realizadas pelo CHM.

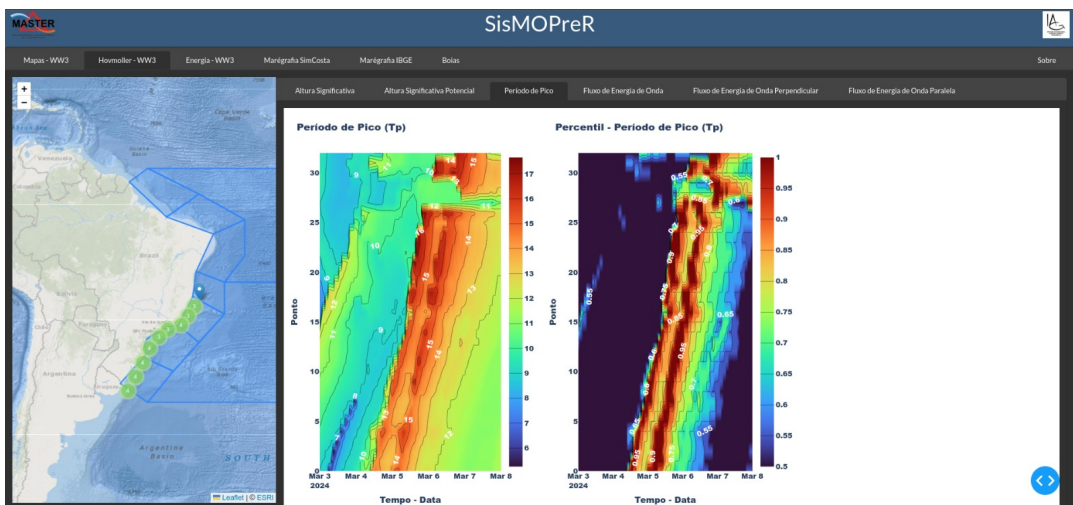
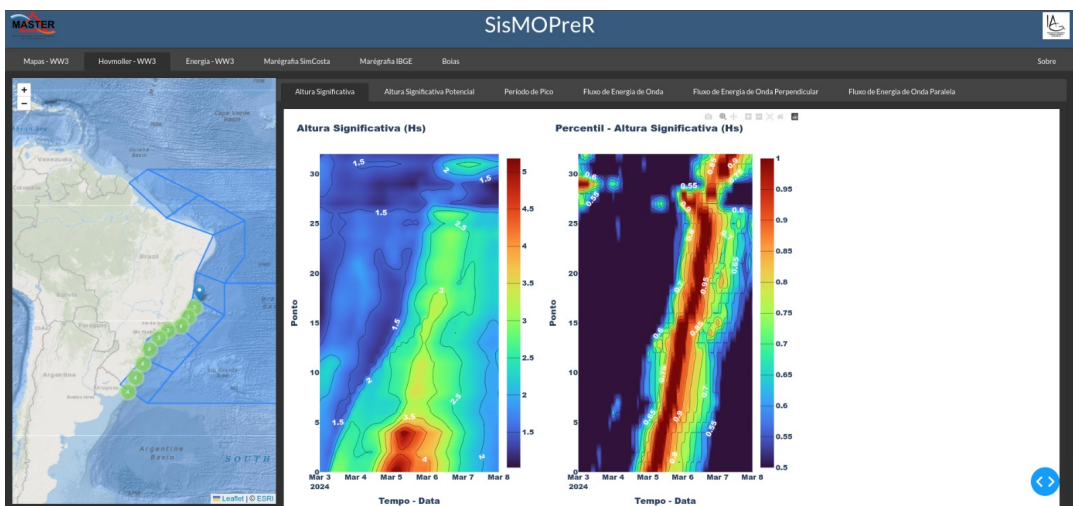


Figura 4.33: Diagramas de Hovmoller para H_S (superior) e T_P (inferior) disponíveis na plataforma SisMOPreR.

Em relação a maregrafia, até o presente momento a página conta com as informações dos marégrafos do SIMCosta (Baía de Guanabara-RJ, Ilha Bela-SP, Pontal do Sul-PR, Tramandaí-RS e Rio Grande-RS) e do IBGE (Cabo Frio-RJ e Imbituba-SC), sendo no total. Tratativas com a EPAGRI já estão sendo feitas de forma que as informações de sua rede maregráfica, que hoje conta com 12 marégrafos espalhados ao longo da costa catarinense, também sejam disponibilizadas. Na Figura 4.34, é possível observar as amplitudes de maré, pressão atmosférica, direção e intensidade do vento para os marégrafos de Imbituba e Pontal do Sul.

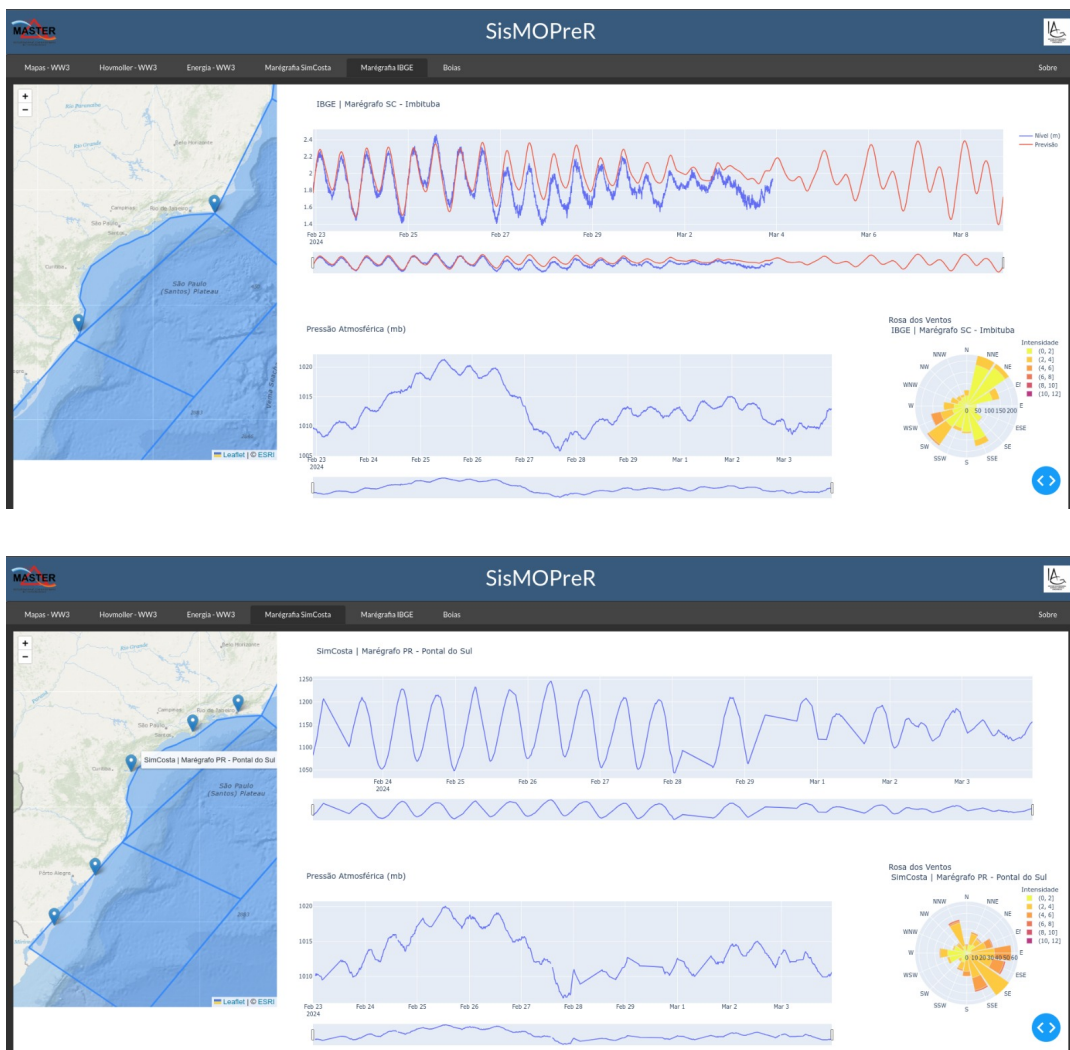


Figura 4.34: Informações maregráfica em tempo real. Superior IBGE, inferior SIMCOsta.

Em relação às informações coletadas em tempo real por meio de boias, até o momento, o SIMCosta mantém três boias operacionais nas áreas de estudo: Linhares-ES, Rio de Janeiro-RJ e Pontal do Paraná-PR. O PNBOIA também possui três boias ativas, sendo duas situadas na baía de Campos e uma próxima à costa (que interessa ao SisMOPreR),

na proximidades da Ilha de Alcatrazes -SP. A Figura 4.35 exibe os dados coletados em tempo real, comparando-os com as previsões geradas pelo modelo WW3 para a boia do Rio de Janeiro do SIMCosta.

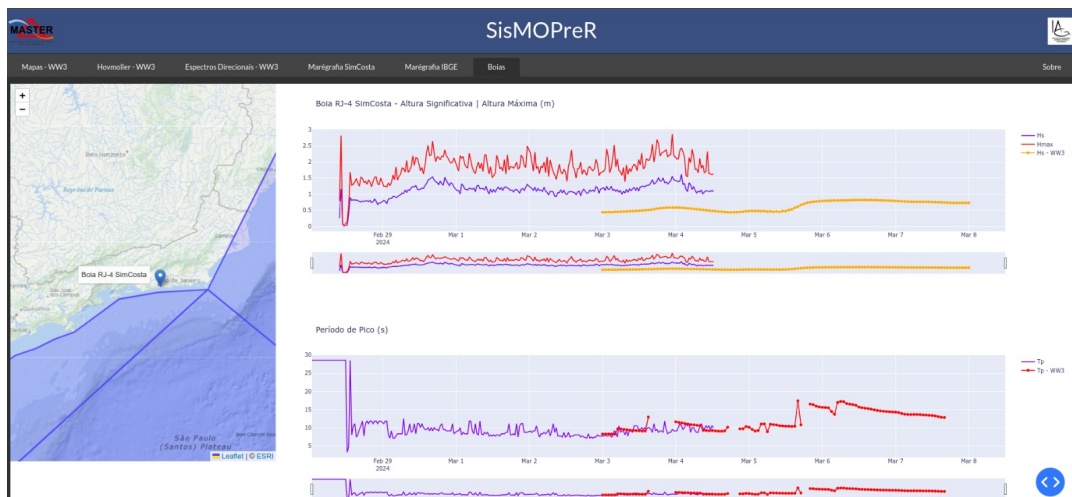


Figura 4.35: Informações coletadas em tempo real e previsão do modelo WW3 disponíveis na plataforma SisMOPreR.

Na Figura 4.36 é possível observar as informações contidas na aba referente aos espectros direcionais, clicando sobre o ponto de interesse, é gerado o espectro de energia e o PLEDS. Ressalta-se que a plataforma será aprimorada ao longo do tempo, com a inserção de novas ferramentas.

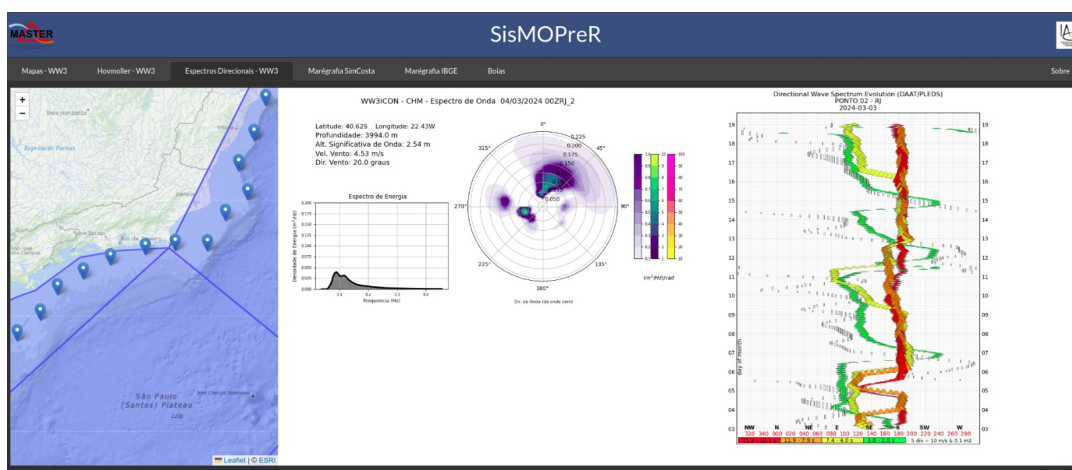


Figura 4.36: Informações espectrais disponíveis na plataforma SisMOPreR.

Conclusões

Este trabalho propôs-se, em termos de objetivo geral, avaliar o fluxo de energia das ondas associado aos eventos de ressaca, ao longo das costas Sul e Sudeste do Brasil, bem como desenvolver uma escala para classificação desses eventos. Além disso, pretendeu gerar um produto operacional destinado ao auxílio à previsão de ressacas, complementando os produtos gerados por modelos de ondas já em uso.

No decorrer das análises, ficou evidente a complexidade e a importância de se desenvolver métodos precisos e confiáveis para a previsão de ressacas ao longo da costa brasileira. Por meio da análise detalhada de dados históricos, modelos numéricos de alta resolução e a avaliação de parâmetros chave, como a altura significativa das ondas (H_S), a direção de pico e o fluxo de energia das ondas (P_w), o presente trabalho buscou contribuir para com o avanço do conhecimento nas áreas da meteorologia e da oceanografia, especificamente, no que tange à previsão e à gestão de ressacas.

Por meio do presente estudo foi possível avaliar a reanálise *Waverys* e confirmar sua alta qualidade. Ademais, a comparação com os dados das boias do PNBOIA revelou excelentes parâmetros estatísticos, principalmente para H_S , alinhados à literatura, assegurando uma base de elevada precisão para a escala de classificação de ressacas proposta e para a avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo CHM.

Na avaliação dos avisos emitidos, observou-se que, em média, cerca de 75% foram efetivamente comprovados. Notadamente, os estados do Sul registraram os maiores índices de comprovação, aspecto crucial, dada a prevalência de ressacas nessa região. Contudo, a cobertura dos avisos mostrou-se limitada, acendendo um alerta para a eficácia do sistema de previsão. Uma possível explicação para a baixa cobertura pode residir na resolução do modelo WW3, durante o período estudado. Com a atualização feita pelo CHM em 2023,

aumentando a resolução para 9 km e, considerando que a reanálise *Waverys* ainda não contempla esses dados, tal hipótese demandará verificação em análises futuras.

Entre os critérios adotados na análise, o Fluxo de Energia de Ondas, proposto por Innocentini et al. (2014), demonstrou maior eficácia, com 76% dos avisos confirmados, superando o desempenho do critério 1. No entanto, esse critério resulta em um número maior de dias classificados como ressaca. Diante disso, recomenda-se a utilização conjunta de ambos os critérios, onde um pode servir como complemento ao outro, otimizando a precisão e a abrangência dos avisos de ressaca.

Ao desenvolver uma escala de classificação de ressacas específica para cada estado da costa Sul e Sudeste do Brasil, uma iniciativa pioneira, optou-se pelo método de agrupamento *K-means*, devido a sua capacidade de incorporar múltiplos parâmetros. Essa abordagem possibilita uma compreensão mais aprofundada dos impactos das ressacas ao longo da costa, como demonstrado pelo estudo realizado em Santa Catarina. Os resultados revelaram que não apenas as ressacas severas podem causar danos, mas também a ocupação desordenada das áreas costeiras, evidenciando que eventos de menor intensidade podem ser igualmente prejudiciais.

Nesta análise específica realizada para Santa Catarina é importante destacar que 50% dos registros de ressaca no sistema Si2D não se adequaram aos critérios da escala desenvolvida, incluindo eventos que resultaram em danos. Um exame minucioso dessas ocorrências desvendou a presença de marés de sizígia e ondas com alturas em torno de 2,5m, porém com períodos inferiores a 24h. Tal constatação sugere que o critério sugerido pelo NORMAM-701 possa estar em desalinho com às transformações costeiras induzidas por atividades humanas.

Por outro lado, a escala desenvolvida não pôde ser estendida aos demais estados devido à ausência de um banco de dados robusto, preciso e confiável. Isso reforça a necessidade de uma colaboração mais efetiva entre as autoridades estaduais e federais, visando aprimorar a coleta e o compartilhamento de informações sobre esses eventos. De qualquer maneira, trata-se de uma ferramenta objetiva de classificação que pode ser utilizada e lapidada, conforme as especificidades de cada local.

A implementação de um roteiro estruturado para a análise desses eventos, juntamente com a utilização de ferramentas, como o Sistema de Monitoramento de Ondas para Previsão de Ressacas (SisMOPreR), justifica-se pela necessidade de uma abordagem sistematizada

e baseada em evidências para a previsão de ressacas. Este roteiro não só servirá para auxiliar meteorologistas e oceanógrafos na interpretação de dados e saídas de modelos, garantindo previsões mais precisas e confiáveis, mas também representa a importância da padronização no processo de previsão para a consistência e comparabilidade das previsões ao longo do tempo e entre diferentes regiões.

Por fim, reforça-se a ideia de que a mitigação dos riscos associados a ressacas e a salvaguarda da vida humana e das propriedades nas áreas costeiras requerem uma compreensão profunda das interações entre os oceanos e as zonas costeiras. À medida que são enfrentados novos cenários, decorrentes da subida do nível do mar e da erosão costeira, impulsionados pelas mudanças climáticas, torna-se cada vez mais crucial que se desenvolvam estratégias eficazes de gestão costeira e de resposta a eventos extremos.

Referências Bibliográficas

- Airy G. B., Tides and Waves, Encyclopedia Metropolitana, 1841, vol. 3, p. 241
- Alonso R., Solari S., Teixeira L., Wave energy resource assessment in Uruguay, Energy, 2015, vol. 93, Part 1, p. 683
- Alves J.-H., Ribeiro E., Matheson G. S., Lima J., Ribeiro C., Reconstituição do clima de ondas no sul-sudeste brasileiro entre 1997 e 2005, Revista Brasileira de Geofísica, 2009, vol. 27
- Araujo T. A. A., Lélis F. S., Correia F. R. S., Moreno D., Silva M. V., Análise de eventos de ressaca na costa brasileira através do fluxo de energia das ondas, Anais Hidrográficos - Diretoria de Hidrografia e Navegação, 2018, pp 161 – 175
- Arthur D., Vassilvitskii S., k-means++: The advantages of careful seeding. In Proceedings of the eighteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms , 2007
- Aulete D., , 2024 Significado da palavra ressaca Dicionário Aulete de Português
- Benavente J., Del Río L., Gracia F., Martínez-del Pozo J., Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain), Continental Shelf Research, 2006, pp 1061–1076
- Beserra E., , 2007 AVALIAÇÃO DE SÍTIOS PARA O APROVEITAMENTO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DAS ONDAS DO MAR
- Bitencourt D. P., Quadro M. F. L., Calbeti N. O., Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. In XII Congresso Brasileiro de Meteorologia , Foz do Iguaçu, 2002, p. 3910

- Brasil- SEPDEC, 2016 Sistema Integrado de Informações sobre Desastres - S2ID <http://s2id.mi.gov.br/>
- Brasil, CHM, 2024 Modelo de Ondas WW3 Disponível em https://www.marinha.mil.br/chm/views-dados-do-smm-modelo-de-ondas?field_area_mod_ondas_value=SUL%2FSUDESTE&field_produtos_mod_ondas_value=Altura+e+Dire%C3%A7%C3%A3o+das+Ondas&field_inicializacao_mod_ondas_value=00H
- Brasil, CPTEC, 2023 SIMCOs - Sistema de Monitoramento Costeiro Disponível em <http://ondas.cptec.inpe.br/~rondas/simcos/index.php,cod=15>
- Brasil Defesa Civil, 2024 Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD) <https://s2id.mi.gov.br/paginas/relatorios/>
- Brasil-DHN Tábuas das Marés. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) Rio de Janeiro, 2016, 196
- Brasil, Marinha, 2023 Norma da Autoridade Marítima para Atividades de Meteorologia Marítima (NORMAM-701) Disponível em <https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dhn/normam/normam-701.html>
- Brasil-MDR, 2021 Manual do Usuário Municipal e Estadual S2iD
- Bulhões E., , 2020 in Muehe D., Lins-de Barros F., Pinheiro L., eds, , Geografia Marinha: oceanos e costas na perspectiva de geógrafos. PGGM Rio de Janeiro pp 655–688
- Camargo R. d., Harari J., Modelagem numérica de ressacas na plataforma sudeste do Brasil a partir de cartas sinóticas de pressão atmosférica na superfície, Boletim do Instituto Oceanográfico, 1994, vol. 42, p. 19–34
- Campos R., Camargo R., Harari 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. 175
- Carvalho B., Araujo T., Guerra J., Comparação entre dois métodos de identificação de eventos de tempestade e impactos associados nas praias oceânicas entre a Ilha Grande e o Cabo Frio (1986 a 2018) , 2019

- Carvalho J. T., Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral do Brasil, Curso de Pós-graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2010, Dissertação (mestrado em meteorologia)
- Cheng Q., Bernstein R., Big data and predictive analytics applications in the operation and management of US transportation systems, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, vol. 90, p. 298
- COMET Program - UCAR, 2023 Wave Life Cycle II: Propagation Dispersion https://www.meted.ucar.edu/education_training/lessons/188
- Costa C., Leite J., Castro B., et al., An operational forecasting system for physical processes in the Santos-Sao Vicente-Bertioga Estuarine System, Southeast Brazil, *Ocean Dynamics*, 2020, vol. 70, p. 257
- 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*, 2023, vol. 60, p. 571
- de Souza D., Ramos-da Silva R., Gomes da Silva P., Fetter-Filho A., Mendez F., Werth D., A hybrid regional climate downscaling for the southern Brazil coastal region, *International Journal of Climatology*, 2022, vol. 42
- Dean R. G., Dalrymple R. A., *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific Singapore, 1991, 335
- Defesa Civil- RS, 2012 S2ID Unidade 2: Manual de Operações
- Deltares D., *Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*, Delft Hydraulics, Delft, 2013
- Dias J. M. A., Período de Pico, *Glossário da Revista de Gestão Costeira Integrada*, 2007
- Dias da Silva P. E., Caracterização do padrão de ondas na costa do Brasil por meio de modelagem numérica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2013, Dissertação de mestrado, 194

Dolan R., Davis R. E., An Intensity Scale for Atlantic Coast Northeast Storms, *Journal of Coastal Research*, 1992, vol. 8, p. 840

Eguchi B., Albino J., Metodologia para determinação do grau de exposição às ondas utilizando energia de ondas e respostas de perfis praias, aplicada ao litoral sul do Espírito Santo: A METHOD TO QUANTIFY DEGREE OF EXPOSURE USING WAVE ENERGY AND BEACH PROFILE RESPONSES APPLIED TO SOUTH COAST OF ESPÍRITO SANTO, *Pesquisas em Geociências*, 2022, vol. 49, p. e115485

Eguchi B. M. M., Klumb-Oliveira L., Clima de ondas de tempestades na costa brasileira utilizando 41 anos de dados da reanálise ECMWF ERA5, *Revista Brasileira De Climatologia*, 2023, vol. 32, p. 544

Ekman V. W., On the Influence of the Earth's Rotation on Ocean-Currents, *Archives of Mathematics, Astronomy, and Physics*, 1905, vol. 2, p. 1

Espindola R. L., Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério, Universidade Federal de Pernambuco, 2017, Tese (doutorado em engenharia mecânica)

Espindola R. L., Araújo A. M., Wave energy resource of Brazil: An analysis from 35 years of ERA-Interim reanalysis data, *PLOS ONE*, 2017, vol. 12, p. 1

Fanti V., Ferreira O., Loureiro C., Kummerer V., Evaluation of Global Wave Reanalyses Performance for Extreme Waves in Coastal Areas, 2021, vol. 2021, p. OS35A

G1-Globo, 2016 Em 3 dias, ressaca causou estragos em 15 cidades de SC, diz Defesa Civil <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2016/10/em-3-dias-ressaca-causou-estragos-em-15-cidades-de-sc-diz-defesa-civil.html>

G1-Globo, 2017 Entenda por que o mar recuou até 50 metros em praias de SC no fim de semana <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/entenda-por-que-o-mar-recuou-ate-50-metros-em-praias-de-sc-no-fim-de-semana.gh.html>

Gan M. A., Gan M. A., Rao V. B., Rao V. B., Surface Cyclogenesis over South America, Monthly Weather Review, 1991

Gaúcha-ZH, 2017 Praias do Norte da Ilha, em Florianópolis, são atingidas por ressaca do mar nesta terça-feira <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2017/08/praias-do-norte-da-ilha-em-florianopolis-sao-atingidas-por-ressaca-do-mar-nesta-t.html>

Godoi S. S. d., Harari J., , 2021 Ondas no mar. Instituto Oceanográfico São Paulo, Brasil pp 255–273

Gramcianinov C., Campos R., de Camargo R., Hodges K., Guedes Soares C., da Silva Dias P., Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases, Ocean Engineering, 2020, vol. 216, p. 108111

Gramcianinov C., Campos R., Soares C., Camargo R., Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean, Ocean Engineering, 2020, vol. 213, p. 107745

Gramcianinov C., Hodges K., De Camargo R., The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones, Climate Dynamics, 2019

Gramática.net, 2023 Etimologia da palavra Ressaca Disponível em <https://www.gramatica.net.br>

Grimm A. M., Tedeschi R. G., ENSO and Extreme Rainfall Events in South America, Journal of Climate, 2009, vol. 22, p. 1589

Gunn K., Stock-Williams C., Quantifying the global wave power resource, Renewable Energy, 2012, vol. 44, p. 296

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

- Harari J., Modelo numérico hidrodinâmico tri-dimensional linear da plataforma continental sudeste do Brasil, Universidade de São Paulo, Instituto Astronômico e Geofísico, 1984, Tese de Doutorado, 203
- Hartigan J. A., Wong M. A., A K-means clustering algorithm, *Applied Statistics*, 1979, pp 100–108
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, vol. 146, p. 1999
- Holthuijsen L. H., *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom, 2007, 405
- IBGE, 2020 Santa Catarina-Cidades
- Innocentini V., Caetano E., Carvalho J. T., A Procedure for Operational Use of Wave Hindcasts to Identify Landfall of Heavy Swell, *Weather and Forecasting*, 2014, vol. 34, p. 489
- IPCC, 2021 in Masson-Delmotte V., et al. eds, , *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press Cambridge
- IPCC, 2022 in Shukla P., et al. eds, , *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press Cambridge and New York
- Islam M. R., Lee C. Y., Mandli K. T., et al., A new tropical cyclone surge index incorporating the effects of coastal geometry, bathymetry and storm information, *Sci Rep*, 2021, vol. 11, p. 16747

- Jain A. K., Data clustering: 50 years beyond K-means, *Pattern Recognition Letters*, 2010, vol. 31, p. 651
- Jelesnianski C. P., Chen J., Shaffer W. A., , 1992 Technical report SLOSH: Sea, Lake, and Overland Surges from Hurricanes <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/7235>. United States, National Weather Service
- JENKS G. F., CASPALL F. C., ERROR ON CHOROPLETHIC MAPS: DEFINITION, MEASUREMENT, REDUCTION, *Annals of the Association of American Geographers*, 1971, vol. 61, p. 217
- Jordan M. R., , 2008 Development of a New Storm Surge Index for Global Prediction of Tropical Cyclone Generated Storm Surge http://purl.flvc.org/fsu/fd/FSU_migr_etd-3473
- Kantha L., Time to replace the Saffir-Simpson hurricane scale?, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2006, vol. 87, p. 3
- Ketchen D. J., Shook C. L., The application of cluster analysis in strategic management research: An analysis and critique, *Strategic Management Journal*, 1996, vol. 17, p. 441
- Kim H., Yamaguchi H., Yoo S., et al., Distribution of Changjiang Diluted Water detected by satellite chlorophyll-a and its interannual variation during 1998–2007, *Journal of Oceanography*, 2009, vol. 65, p. 129
- Klein A., Menezes J., Diehl F., Abreu J., Polette M., Sperb R., Sperb R., , 2006 in Muehe D., ed., , *Erosão e progradação do litoral brasileiro*. Ministério do Meio Ambiente Brasília pp 402–436
- Kümmerer V., Ferreira , Fanti V., Loureiro C., Storm identification for high-energy wave climates as a tool to improve long-term analysis, *Climate Dynamics*, 2023
- Lappo S. S., Rozhdestvenskiy A. Y., An estimate of the energy transferred to the ocean by a moving atmospheric pressure disturbance, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 1977, vol. 13, p. 120

- Laviola da Silva M. B., de Souza D. C., Barreto F. T. C., Tecchio R., Pimentel R. F., Gramscianinov C. B., De Camargo R., Classificação de Padrões Atmosféricos de Circulação Associados a Eventos de Ondas Extremas em Diferentes Regiões da Costa Brasileira. In XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite , Cabo Frio - RJ, 2023
- 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
- Leal K., Robaina L., Körting T., et al., Identification of coastal natural disasters using official databases to provide support for the coastal management: the case of Santa Catarina, Brazil, *Nat Hazards*, 2023
- Lima R. F., Lins-de Barros F. M., Cirano M., Análise das Condições Meteoceanográficas em Eventos de Ressaca do Mar no Litoral do Estado do Rio de Janeiro, Brasil no Período de 1948 a 2008, *Anuário do Instituto de Geociências*, 2021, vol. 44, p. 12
- Liu Y., Weisberg R. H., Patterns of ocean current variability on the West Florida Shelf using the self-organizing map, *Journal of Geophysical Research*, 2005, vol. 110
- Luetlich R. J., Westerink J., Scheffner N., , 1992 Dredging research program technical report drp-92-6 ADCIRC: an Advanced Three-Dimensional Circulation Model for Shelves, Coasts, and Estuaries. Report 1: Theory and methodology of ADCIRC-2DDI and ADCIRC-3DL. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station Vicksburg, MS
- López M., Veigas M., Iglesias G., On the wave energy resource of Peru, *Energy Conversion and Management*, 2015, vol. 90, p. 34
- M. Lins-de Barros F., Klumb-Oliveira L., de França Lima R., Avaliação histórica da ocorrência de ressacas marinhas e danos associados entre os anos de 1979 e 2013 no litoral do estado do Rio de Janeiro (Brasil), *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 2018, vol. 18, p. 85
- Machado J. P., Miranda G. S. B., Gozzo L. F., Custódio M. d. S., Condições Atmosféricas Associadas a Eventos de Ressaca no Litoral Sul e do Sudeste do Brasil durante o El Niño 2015/2016, *Revista Brasileira De Meteorologia*, 2019, vol. 34, p. 529

MacQueen J., Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations. In Proceedings of 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability , vol. 1, 1967, p. 281

Marengo J. A., Scarano F. R., eds, Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. PBMC, COPPE - UFRJ Rio de Janeiro, Brasil, 2016, 184

Melo E., Maré Meteorológica na Costa Brasileira, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 2017, Tese de professor titular, 328

Mendes A. L. T., Investigação sobre a dispersão direcional de ondas de gravidade na Baía de Campos, Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, 2005, M.sc. engenharia oceânica

Mendoza E. T., Jimenez J. A., Mateo J., A coastal storms intensity scale for the Catalan sea (NW Mediterranean), Natural Hazards and Earth System Sciences, 2011, vol. 11, p. 2453

Michaelis, 2024 Ressaca Michaelis Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa

Molina R., Manno G., Lo Re C., Anfuso G., Ciraolo G., Storm Energy Flux Characterization along the Mediterranean Coast of Andalusia (Spain), Water, 2019, vol. 11, p. 509

Muis S., Verlaan M., Winsemius H. C., Aerts J. C. J. H., Ward P. J., A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels, Nature Communications, 2016, vol. 7, p. 11969

Murty T. S., Storm surges-meteorological ocean tides, Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, 1984, vol. 212, p. 876

NDMais, 2017 Canal de acesso ao Porto de Itajaí é fechado por causa da ressaca: veja a previsão para SC <https://ndmais.com.br/noticias/canal-de-acesso-ao-porto-de-itajai-e-fechado-por-causa-da-ressaca-veja-a-previsao>

Neves C. F., Muehe D., Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira, Parcerias estratégicas, 2008, vol. 27, p. 217

- Nicolodi J. L., Zamboni A., , 2008 in Zamboni A., Nicolodi J. L., eds, , Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental Brasília, DF, Brasil pp 213–241
- NOAA, 2023 Historical El Nino / La Nina episodes (1950-present) https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- NOAA, 2024 Spectrum data WW3 <https://www ftp.ncep.noaa.gov/data/nccf/com/gfs/prod/gfs.20240220/00/wave/station/bulls.t00z/>
- Nogueira I. C. M., Caracterização do Clima de Ondas na Bacia do Espírito Santo através de Modelagem Numérica, UFRJ/COPPE, 2014, Dissertação de Mestrado, 128
- Orejarena-Rondón A. F., Restrepo J. C., Correa-Metrio A., Orfila A., Wave energy flux in the Caribbean Sea: Trends and variability, *Renewable Energy*, 2022, vol. 181, p. 616
- Paiva A. M., Mill G. N., Costa V. S., de Amorim F. d. L. L., Silva de Souza M., Mata M. M., Cadeia Vitória - Trindade: monitoramento do oceano e mudanças climáticas, INFOCIRM - Informativo da Comissão Interministerial para Recursos do Mar, 2016, vol. 28, p. 8
- Parente C., Uma Nova Técnica Espectral para Análise Direcional de Ondas, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999, Tese de Doutorado, 190
- 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*. Campus Rio de Janeiro pp 55–98
- Parise C. K., Calliari L. J., Krusche N., Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion, *Brazilian Journal of Oceanography*, 2009, vol. 57, p. 175–188
- Pegorelli C., Dottori M., Fortes J. F., Evaluating the gravity wave energy potential off the Brazilian coast, *Brazilian Journal of Oceanography*, 2018, vol. 66, p. 220
- Phillips O. M., On the generation of waves by turbulent wind, *Journal of Fluid Mechanics*, 1957, vol. 4, p. 417

- 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
- Piumbini P. P., Clima de ondas de gravidade e estado de agitação marítima em ambientes marinhos no Espírito Santo, Universidade Federal do Espírito Santo, 2009, Dissertação de Mestrado
- Pugh D. T., *Tides, Surges and Mean Sea Level: A Handbook for Engineers and Scientists*. Wiley New York, 1987
- Reboita M. S., da Rocha R. P., Ambrizzi T., Sugahara S., South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3), *Climate Dynamics*, 2010
- Resio D. T., Westerink J. J., Modeling the physics of storm surges, *Physics Today*, 2008, vol. 61, p. 33
- Ribeiro R. B., Sampaio A. F. P., Ruiz M. S., Leitão J. C., Leitão P. C., , 2018 First Approach of a Storm Surge Early Warning System for Santos Region. Springer pp 135–157
- Romeu M. A., Fontoura J. A., Melo E., Typical Scenarios of Wave Regimes off Rio Grande do Sul, Southern Brazil, *Journal of Coastal Research*, 2015, vol. 31, p. 61
- Ruiz M. S., Harari J., Ribeiro R. B., Sampaio A. F., Numerical modelling of storm tides in the Estuarine System of Santos, São Vicente and Bertioga (SP, Brazil), *Regional Studies in Marine Science*, 2021, vol. 44, p. 101791
- Saffir H., Design and construction requirements for hurricane resistant construction, 1977, ASCE Preprint No. 2830, American Society of Civil Engineers, New York, 20 pp.
- Saha S., et al., The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2010, vol. 91, p. 1015
- Santa Catarina, 2006 Decreto nº 5.010, de 22 de dezembro de 2006. Regulamenta a Lei n. 13.553, de 16 de novembro de 2005 Lex: coletânea de legislação e jurisprudência
- Saraiva J., Bedran C., Carneiro C., Monitoring of storm surges on Cassino Beach, RS Brazil, *Journal of Coastal Research*, 2003, vol. 1, p. 323

- Sheng Y. P., , 1986 Tech. rep. 587 A three-dimensional numerical model of coastal and estuarine circulation and transport in generalized curvilinear grids. Aeronautical Research Association of Princeton Princeton, N.J.
- Silveira R., Alves M., Bitencourt V., , 2019 in Pinheiro L., Gorayeb A., eds, , *Geografia Física e as Mudanças Globais*. Editora UFC Fortaleza
- Simpson R. A., Proposed scale for ranking hurricanes by intensity. In Minutes of the Eighth NOAA, NWS Hurricane Conference , Miami, 1971
- Soares J. d. L., Discussão Metodológica sobre Sensibilidade de Parâmetros de Ondas Incidentes para Definição de Condições de Projeto, Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, 2016, Dissertação de Mestrado
- Sondermann M., Chou S., Souza C., et al., Atmospheric patterns favourable to storm surge events on the coast of São Paulo State, Brazil, *Natural Hazards*, 2023, vol. 117, p. 93
- Souza C., Os ecossistemas costeiros frente às mudanças climáticas no Brasil: efeitos da elevação do nível do mar. In XIV Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar - COLACMAR , Balneário Camboriú (SC), 2011
- Souza C., Souza A., Harari J., , 2019 in , *Climate change in Santos Brazil: projections, impacts and adaptation options*. Springer pp 97–134
- Steinley D., K-means clustering: A half-century synthesis, *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 2006, vol. 59, p. 1
- Syakur M. A., Khotimah B. K., Rochman E. M. S., Satoto B. D., Integration K-means clustering method and elbow method for identification of the best customer profile cluster. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering , vol. 336, 2018, p. 012017
- 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
- Tecchio R., de Souza D. C., da Silva M. B. L., de Sousa E. G., de Camargo R., Caracterização de eventos extremos ocasionados por marémeteorológica e determinação da

- variação do nível médio do mar relativo e das componentes de maré na Baía de Guanabara para o período 1990 a 2021. In XV Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite- (OMARSAT) , 2023
- Tibshirani R., Walther G., Hastie T., Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic, *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 2001, vol. 63, p. 411
- Trujillo A. P., Thurman H. V., *Essentials of Oceanography* 10th edn. Pearson [S.l.], 2011, 551
- Vanz A., Fernandes L. G., *Ressacas, Afogamentos e Acidentes com Embarcações no Sul do Brasil nos anos de 2009 e 2010*, Gravel, 2012, vol. 10, p. 47
- Verlaan M., Zijderveld A., de Vries J., Kroos J., Operational storm surge forecasting in the Netherlands: developments in the last decade, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2005, vol. 363, p. 1441
- Willmott C. J., Some Comments on the Evaluation of Model Performance, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1982, vol. 63, p. 1309
- WMO, 2021 Technical Report WMO-No. 1076 Guide to Storm Surge Forecasting https://library.wmo.int/viewer/28432?medianame=wmo_1076_en_#page=1&viewer=picture&
World Meteorological Organization Geneva, Switzerland
- World Meteorological Organization, 2018 Manual on Marine Meteorological Services.
World Meteorological Organization Geneva, Switzerland
- Wyatt L., The ocean wave directional spectrum, *Oceanography*, 1997, vol. 10, p. 85
- Young I. R., *Wind Generated Ocean Waves*. vol. 2 of Elsevier Ocean Engineering Book Series, Elsevier, 1999

ANEXO A

Avaliação dos avisos de ressaca emitidos pelo CHM

6.0.1 Comparações entre critérios

6.0.1.1 Costa do Rio Grande do Sul

Tabela 6.1 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
1	137	90	60	66,67	43,80	2011
2	141	90	63	70,00	44,68	2011
3	143	90	66	73,33	46,15	2011
4	154	90	68	75,56	44,16	2011
5	151	90	68	75,56	45,03	2011
6	144	90	64	71,11	44,44	2011
7	122	90	63	70,00	51,64	2011
8	108	90	62	68,89	57,41	2011
9	105	90	60	66,67	57,14	2011
10	101	90	58	64,44	57,43	2011
1	127	58	43	74,14	33,86	2012
2	124	58	44	75,86	35,48	2012
3	130	58	43	74,14	33,08	2012
4	136	58	49	84,48	36,03	2012
5	141	58	53	91,38	37,59	2012
6	141	58	53	91,38	37,59	2012
7	117	58	50	86,21	42,74	2012
8	117	58	48	82,76	41,03	2012
9	103	58	41	70,69	39,81	2012
10	95	58	40	68,97	42,11	2012
1	136	68	43	63,24	31,62	2013
2	139	68	47	69,12	33,81	2013
3	142	68	49	72,06	34,51	2013

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.1

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
4	155	68	51	75,00	32,90	2013
5	159	68	55	80,88	34,59	2013
6	153	68	57	83,82	37,25	2013
7	126	68	56	82,35	44,44	2013
8	117	68	52	76,47	44,44	2013
9	109	68	51	75,00	46,79	2013
10	104	68	49	72,06	47,12	2013
1	130	56	45	80,36	34,62	2014
2	128	56	47	83,93	36,72	2014
3	134	56	48	85,71	35,82	2014
4	151	56	53	94,64	35,10	2014
5	146	56	53	94,64	36,30	2014
6	144	56	52	92,86	36,11	2014
7	124	56	50	89,29	40,32	2014
8	114	56	49	87,50	42,98	2014
9	96	56	45	80,36	46,88	2014
10	93	56	46	82,14	49,46	2014
1	118	106	70	66,04	59,32	2015
2	125	106	75	70,75	60,00	2015
3	129	106	77	72,64	59,69	2015
4	143	106	83	78,30	58,04	2015
5	146	106	84	79,25	57,53	2015
6	142	106	84	79,25	59,15	2015
7	128	106	79	74,53	61,72	2015
8	116	106	78	73,58	67,24	2015
9	107	106	79	74,53	73,83	2015
10	96	106	74	69,81	77,08	2015
1	132	124	85	68,55	64,39	2016
2	135	124	88	70,97	65,19	2016
3	143	124	94	75,81	65,73	2016
4	157	124	102	82,26	64,97	2016
5	161	124	106	85,48	65,84	2016
6	152	124	104	83,87	68,42	2016
7	134	124	101	81,45	75,37	2016
8	121	124	91	73,39	75,21	2016
9	103	124	83	66,94	80,58	2016
10	98	124	78	62,90	79,59	2016
1	132	55	44	80,00	33,33	2017
2	133	55	44	80,00	33,08	2017
3	143	55	47	85,45	32,87	2017
4	156	55	47	85,45	30,13	2017
5	161	55	50	90,91	31,06	2017
6	164	55	49	89,09	29,88	2017
7	144	55	48	87,27	33,33	2017
8	137	55	45	81,82	32,85	2017
9	122	55	41	74,55	33,61	2017
10	116	55	38	69,09	32,76	2017
1	142	85	70	82,35	49,30	2018
2	140	85	73	85,88	52,14	2018
3	148	85	74	87,06	50,00	2018

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.1

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
4	160	85	75	88,24	46,88	2018
5	161	85	77	90,59	47,83	2018
6	157	85	78	91,76	49,68	2018
7	142	85	77	90,59	54,23	2018
8	131	85	75	88,24	57,25	2018
9	117	85	72	84,71	61,54	2018
10	113	85	73	85,88	64,60	2018
1	125	70	52	74,29	41,60	2019
2	123	70	53	75,71	43,09	2019
3	131	70	58	82,86	44,27	2019
4	145	70	61	87,14	42,07	2019
5	145	70	62	88,57	42,76	2019
6	133	70	62	88,57	46,62	2019
7	120	70	61	87,14	50,83	2019
8	115	70	61	87,14	53,04	2019
9	112	70	61	87,14	54,46	2019
10	108	70	60	85,71	55,56	2019
1	135	86	71	82,56	52,59	2020
2	136	86	72	83,72	52,94	2020
3	136	86	74	86,05	54,41	2020
4	153	86	79	91,86	51,63	2020
5	145	86	78	90,70	53,79	2020
6	135	86	76	88,37	56,30	2020
7	115	86	73	84,88	63,48	2020
8	111	86	73	84,88	65,77	2020
9	107	86	72	83,72	67,29	2020
10	100	86	71	82,56	71,00	2020
1	123	71	54	76,06	43,90	2021
2	128	71	59	83,10	46,09	2021
3	134	71	62	87,32	46,27	2021
4	141	71	64	90,14	45,39	2021
5	148	71	65	91,55	43,92	2021
6	141	71	67	94,37	47,52	2021
7	121	71	65	91,55	53,72	2021
8	117	71	63	88,73	53,85	2021
9	103	71	59	83,10	57,28	2021
10	93	71	58	81,69	62,37	2021

Tabela 6.2 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Rio Grande do Sul para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
1	130	90	57	63.33	43.85	2011
2	129	90	58	64.44	44.96	2011
3	128	90	60	66.67	46.88	2011
4	141	90	61	67.78	43.26	2011

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.2

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
5	140	90	61	67.78	43.57	2011
6	138	90	63	70.00	45.65	2011
7	121	90	59	65.56	48.76	2011
8	111	90	57	63.33	51.35	2011
9	104	90	56	62.22	53.85	2011
10	102	90	55	61.11	53.92	2011
1	107	58	40	68.97	37.38	2012
2	107	58	41	70.69	38.32	2012
3	113	58	42	72.41	37.17	2012
4	127	58	45	77.59	35.43	2012
5	132	58	48	82.76	36.36	2012
6	126	58	48	82.76	38.10	2012
7	113	58	49	84.48	43.36	2012
8	107	58	49	84.48	45.79	2012
9	95	58	44	75.86	46.32	2012
10	92	58	40	68.97	43.48	2012
1	118	68	40	58.82	33.90	2013
2	121	68	43	63.24	35.54	2013
3	128	68	44	64.71	34.38	2013
4	137	68	51	75.00	37.23	2013
5	142	68	54	79.41	38.03	2013
6	133	68	55	80.88	41.35	2013
7	112	68	49	72.06	43.75	2013
8	107	68	51	75.00	47.66	2013
9	101	68	51	75.00	50.50	2013
10	95	68	50	73.53	52.63	2013
9	95	68	50	73.53	52.63	2013
1	109	56	41	73.21	37.61	2014
2	107	56	43	76.79	40.19	2014
3	119	56	48	85.71	40.34	2014
4	127	56	48	85.71	37.80	2014
5	130	56	50	89.29	38.46	2014
6	128	56	53	94.64	41.41	2014
7	100	56	50	89.29	50.00	2014
8	97	56	49	87.50	50.52	2014
9	91	56	49	87.50	53.85	2014
10	87	56	49	87.50	56.32	2014
1	123	106	71	66.98	57.72	2015
2	129	106	74	69.81	57.36	2015
3	129	106	76	71.70	58.91	2015
4	149	106	84	79.25	56.38	2015
5	153	106	84	79.25	54.90	2015
6	143	106	79	74.53	55.24	2015
7	121	106	73	68.87	60.33	2015
8	115	106	72	67.92	62.61	2015
9	104	106	69	65.09	66.35	2015
10	98	106	67	63.21	68.37	2015
1	119	124	83	66.94	69.75	2016
2	116	124	84	67.74	72.41	2016
3	124	124	89	71.77	71.77	2016

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.2

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
4	141	124	96	77,42	68,09	2016
5	144	124	98	79,03	68,06	2016
6	142	124	97	78,23	68,31	2016
7	126	124	96	77,42	76,19	2016
8	118	124	89	71,77	75,42	2016
9	109	124	81	65,32	74,31	2016
10	106	124	84	67,74	79,25	2016
1	127	55	41	74,55	32,28	2017
2	131	55	43	78,18	32,82	2017
3	135	55	45	81,82	33,33	2017
4	155	55	47	85,45	30,32	2017
5	160	55	48	87,27	30,00	2017
6	156	55	50	90,91	32,05	2017
7	136	55	47	85,45	34,56	2017
8	132	55	45	81,82	34,09	2017
9	122	55	42	76,36	34,43	2017
10	111	55	39	70,91	35,14	2017
1	140	85	71	83,53	50,71	2018
2	135	85	70	82,35	51,85	2018
3	142	85	73	85,88	51,41	2018
4	156	85	76	89,41	48,72	2018
5	153	85	78	91,76	50,98	2018
6	152	85	78	91,76	51,32	2018
7	129	85	72	84,71	55,81	2018
8	121	85	70	82,35	57,85	2018
9	111	85	68	80,00	61,26	2018
10	108	85	69	81,18	63,89	2018
1	124	70	51	72,86	41,13	2019
2	122	70	52	74,29	42,62	2019
3	123	70	56	80,00	45,53	2019
4	135	70	57	81,43	42,22	2019
5	139	70	59	84,29	42,45	2019
6	134	70	60	85,71	44,78	2019
7	123	70	60	85,71	48,78	2019
8	121	70	59	84,29	48,76	2019
9	110	70	56	80,00	50,91	2019
10	107	70	54	77,14	50,47	2019
1	142	86	70	81,40	49,30	2020
2	139	86	71	82,56	51,08	2020
3	140	86	73	84,88	52,14	2020
4	152	86	76	88,37	50,00	2020
5	148	86	73	84,88	49,32	2020
6	138	86	75	87,21	54,35	2020
7	125	86	73	84,88	58,40	2020
8	122	86	71	82,56	58,20	2020
9	118	86	72	83,72	61,02	2020
10	115	86	73	84,88	63,48	2020
1	126	71	53	74,65	42,06	2021
2	124	71	56	78,87	45,16	2021
3	121	71	57	80,28	47,11	2021

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.2

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
4	142	71	61	85,92	42,96	2021
5	145	71	62	87,32	42,76	2021
6	144	71	64	90,14	44,44	2021
7	128	71	62	87,32	48,44	2021
8	121	71	58	81,69	47,93	2021
9	120	71	59	83,10	49,17	2021
10	116	71	61	85,92	52,59	2021

6.0.1.2 Costa de Santa Catarina

Tabela 6.3 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverlys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa de Santa Catarina para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca Waverlys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
11	98	87	56	64,37	57,14	2011
12	90	87	57	65,52	63,33	2011
13	77	87	55	63,22	71,43	2011
14	73	87	52	59,77	71,23	2011
15	70	87	47	54,02	67,14	2011
11	81	55	41	74,55	50,62	2012
12	79	55	43	78,18	54,43	2012
13	60	55	35	63,64	58,33	2012
14	55	55	30	54,55	54,55	2012
15	50	55	27	49,09	54,00	2012
11	96	63	45	71,43	46,88	2013
12	98	63	47	74,60	47,96	2013
13	76	63	43	68,25	56,58	2013
14	71	63	41	65,08	57,75	2013
15	74	63	42	66,67	56,76	2013
11	85	54	45	83,33	52,94	2014
12	81	54	44	81,48	54,32	2014
13	63	54	39	72,22	61,90	2014
14	65	54	38	70,37	58,46	2014
15	58	54	35	64,81	60,34	2014
11	96	99	70	70,71	72,92	2015
12	89	99	66	66,67	74,16	2015
13	68	99	56	56,57	82,35	2015
14	69	99	56	56,57	81,16	2015
15	61	99	49	49,49	80,33	2015
11	95	107	76	71,03	80,00	2016
12	89	107	75	70,09	84,27	2016
13	75	107	67	62,62	89,33	2016
14	70	107	63	58,88	90,00	2016
15	66	107	56	52,34	84,85	2016
11	110	49	35	71,43	31,82	2017
12	102	49	34	69,39	33,33	2017

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.3

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
13	86	49	32	65,31	37,21	2017
14	82	49	29	59,18	35,37	2017
15	76	49	27	55,10	35,53	2017
11	101	84	70	83,33	69,31	2018
12	100	84	69	82,14	69,00	2018
13	70	84	56	66,67	80,00	2018
14	65	84	48	57,14	73,85	2018
15	59	84	46	54,76	77,97	2018
11	103	75	59	78,67	57,28	2019
12	99	75	59	78,67	59,60	2019
13	79	75	51	68,00	64,56	2019
14	75	75	48	64,00	64,00	2019
15	73	75	45	60,00	61,64	2019
11	94	85	71	83,53	75,53	2020
12	104	85	75	88,24	72,12	2020
13	84	85	66	77,65	78,57	2020
14	74	85	60	70,59	81,08	2020
15	68	85	54	63,53	79,41	2020
11	84	73	60	82,19	71,43	2021
12	89	73	59	80,82	66,29	2021
13	78	73	56	76,71	71,79	2021
14	77	73	54	73,97	70,13	2021
15	71	73	52	71,23	73,24	2021

Tabela 6.4 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa de Santa Catarina para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
11	100	87	54	62,07	54,00	2011
12	105	87	57	65,52	54,29	2011
13	86	87	51	58,62	59,30	2011
14	84	87	52	59,77	61,90	2011
15	75	87	48	55,17	64,00	2011
11	84	55	41	74,55	48,81	2012
12	90	55	44	80,00	48,89	2012
13	70	55	36	65,45	51,43	2012
14	69	55	36	65,45	52,17	2012
15	65	55	30	54,55	46,15	2012
11	94	63	47	74,60	50,00	2013
12	110	63	49	77,78	44,55	2013
13	90	63	47	74,60	52,22	2013
14	86	63	46	73,02	53,49	2013
15	76	63	45	71,43	59,21	2013
11	82	54	45	83,33	54,88	2014
12	84	54	43	79,63	51,19	2014
13	70	54	38	70,37	54,29	2014

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.4

Ponto	Ressaca $P_W > 31.25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
14	71	54	39	72,22	54,93	2014
15	67	54	39	72,22	58,21	2014
11	91	99	58	58,59	63,74	2015
12	92	99	56	56,57	60,87	2015
13	83	99	53	53,54	63,86	2015
14	77	99	49	49,49	63,64	2015
15	72	99	47	47,47	65,28	2015
11	99	107	78	72,90	78,79	2016
12	106	107	81	75,70	76,42	2016
13	86	107	73	68,22	84,88	2016
14	83	107	70	65,42	84,34	2016
15	76	107	64	59,81	84,21	2016
11	104	49	36	73,47	34,62	2017
12	101	49	34	69,39	33,66	2017
13	81	49	29	59,18	35,80	2017
14	80	49	30	61,22	37,50	2017
15	74	49	28	57,14	37,84	2017
11	104	84	67	79,76	64,42	2018
12	105	84	66	78,57	62,86	2018
13	87	84	61	72,62	70,11	2018
14	77	84	57	67,86	74,03	2018
15	75	84	57	67,86	76,00	2018
11	101	75	53	70,67	52,48	2019
12	117	75	53	70,67	45,30	2019
13	85	75	47	62,67	55,29	2019
14	83	75	47	62,67	56,63	2019
15	80	75	47	62,67	58,75	2019
11	114	85	72	84,71	63,16	2020
12	115	85	73	85,88	63,48	2020
13	99	85	69	81,18	69,70	2020
14	92	85	69	81,18	75,00	2020
15	89	85	64	75,29	71,91	2020
11	112	73	64	87,67	57,14	2021
12	117	73	63	86,30	53,85	2021
13	99	73	60	82,19	60,61	2021
14	102	73	57	78,08	55,88	2021
15	101	73	55	75,34	54,46	2021

6.0.1.3 Costa do Paraná

Tabela 6.5 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Paraná para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
16	72	36	27	75	37,50	2011
16	55	13	12	92,31	21,82	2012

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.5

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
16	69	20	16	80	23,19	2013
16	55	14	12	85,71	21,82	2014
16	66	18	12	66,67	18,18	2015
16	60	47	36	76,60	60,00	2016
16	71	19	16	84,21	22,54	2017
16	60	28	24	85,71	40,00	2018
16	72	35	27	77,14	37,50	2019
16	68	33	25	75,76	36,76	2020
16	76	26	23	88,46	30,26	2021

Tabela 6.6 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Paraná para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
16	77	36	29	80,56	37,66	2011
16	75	13	9	69,23	12,00	2012
16	80	20	15	75,00	18,75	2013
16	67	14	12	85,71	17,91	2014
16	73	18	9	50,00	12,33	2015
16	81	47	42	89,36	51,85	2016
16	75	19	15	78,95	20,00	2017
16	74	28	25	89,29	33,78	2018
16	80	35	24	68,57	30,00	2019
16	93	33	27	81,82	29,03	2020
16	103	26	23	88,46	22,33	2021

6.0.1.4 Costa de São Paulo

Tabela 6.7 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa de São Paulo para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
17	61	54	40	74,07	65,57	2011
18	87	54	46	85,19	52,87	2011
19	79	54	45	83,33	56,96	2011
20	59	54	42	77,78	71,19	2011
17	56	28	21	75,00	37,50	2012
18	80	28	24	85,71	30,00	2012
19	68	28	22	78,57	32,35	2012
20	46	28	19	67,86	41,30	2012
17	68	50	33	66,00	48,53	2013

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.7

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
18	84	50	40	80,00	47,62	2013
19	73	50	38	76,00	52,05	2013
20	59	50	35	70,00	59,32	2013
17	50	43	31	72,09	62,00	2014
18	64	43	35	81,40	54,69	2014
19	58	43	35	81,40	60,34	2014
20	41	43	32	74,42	78,05	2014
17	58	48	34	70,83	58,62	2015
18	73	48	36	75,00	49,32	2015
19	60	48	35	72,92	58,33	2015
20	48	48	30	62,50	62,50	2015
17	57	73	46	63,01	80,70	2016
18	79	73	56	76,71	70,89	2016
19	73	73	51	69,86	69,86	2016
20	59	73	48	65,75	81,36	2016
17	61	49	34	69,39	55,74	2017
18	72	49	38	77,55	52,78	2017
19	59	49	37	75,51	62,71	2017
20	49	49	35	71,43	71,43	2017
17	53	57	43	75,44	81,13	2018
18	74	57	50	87,72	67,57	2018
19	65	57	45	78,95	69,23	2018
20	52	57	41	71,93	78,85	2018
17	71	62	47	75,81	66,20	2019
18	92	62	48	77,42	52,17	2019
19	79	62	49	79,03	62,03	2019
20	52	62	37	59,68	71,15	2019
17	70	52	39	75,00	55,71	2020
18	86	52	45	86,54	52,33	2020
19	81	52	43	82,69	53,09	2020
20	59	52	40	76,92	67,80	2020
17	67	31	24	77,42	35,82	2021
18	75	31	25	80,65	33,33	2021
19	66	31	22	70,97	33,33	2021
20	56	31	21	67,74	37,50	2021

Tabela 6.8 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa de São Paulo para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
17	76	54	44	81,48	57,89	2011
18	102	54	48	88,89	47,06	2011
19	95	54	48	88,89	50,53	2011
20	74	54	43	79,63	58,11	2011
17	73	28	22	78,57	30,14	2012
18	97	28	26	92,86	26,80	2012

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.8

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
19	81	28	24	85,71	29,63	2012
20	64	28	22	78,57	34,38	2012
17	72	50	37	74,00	51,39	2013
18	90	50	40	80,00	44,44	2013
19	86	50	40	80,00	46,51	2013
20	74	50	36	72,00	48,65	2013
17	58	43	33	76,74	56,90	2014
18	74	43	38	88,37	51,35	2014
19	71	43	37	86,05	52,11	2014
20	60	43	35	81,40	58,33	2014
17	70	48	33	68,75	47,14	2015
18	88	48	36	75,00	40,91	2015
19	80	48	34	70,83	42,50	2015
20	66	48	33	68,75	50,00	2015
17	83	73	61	83,56	73,49	2016
18	103	73	64	87,67	62,14	2016
19	94	73	61	83,56	64,89	2016
20	89	73	60	82,19	67,42	2016
17	67	49	37	75,51	55,22	2017
18	83	49	42	85,71	50,60	2017
19	77	49	41	83,67	53,25	2017
20	65	49	40	81,63	61,54	2017
17	67	57	45	78,95	67,16	2018
18	89	57	48	84,21	53,93	2018
19	82	57	47	82,46	57,32	2018
20	77	57	47	82,46	61,04	2018
17	85	62	49	79,03	57,65	2019
18	114	62	53	85,48	46,49	2019
19	105	62	51	82,26	48,57	2019
20	86	62	47	75,81	54,65	2019
17	85	52	45	86,54	52,94	2020
18	109	52	49	94,23	44,95	2020
19	101	52	48	92,31	47,52	2020
20	91	52	46	88,46	50,55	2020
17	91	31	25	80,65	27,47	2021
18	115	31	25	80,65	21,74	2021
19	104	31	24	77,42	23,08	2021
20	86	31	23	74,19	26,74	2021

6.0.1.5 Costa do Rio de Janeiro

Tabela 6.9 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Rui de Janeiro para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
21	66	54	41	75,93	62,12	2011
22	52	54	40	74,07	76,92	2011
23	52	54	35	64,81	67,31	2011
24	75	54	40	74,07	53,33	2011
25	99	54	44	81,48	44,44	2011
26	72	54	36	66,67	50,00	2011
27	86	54	37	68,52	43,02	2011
21	63	70	47	67,14	74,60	2012
22	47	70	39	55,71	82,98	2012
23	48	70	42	60,00	87,50	2012
24	70	70	51	72,86	72,86	2012
25	91	70	57	81,43	62,64	2012
26	68	70	48	68,57	70,59	2012
27	86	70	54	77,14	62,79	2012
21	69	61	42	68,85	60,87	2013
22	50	61	37	60,66	74,00	2013
23	56	61	40	65,57	71,43	2013
24	80	61	46	75,41	57,50	2013
25	109	61	52	85,25	47,71	2013
26	78	61	43	70,49	55,13	2013
27	96	61	46	75,41	47,92	2013
21	50	52	38	73,08	76,00	2014
22	42	52	35	67,31	83,33	2014
23	44	52	35	67,31	79,55	2014
24	68	52	44	84,62	64,71	2014
25	98	52	46	88,46	46,94	2014
26	62	52	35	67,31	56,45	2014
27	78	52	38	73,08	48,72	2014
21	58	72	48	66,67	82,76	2015
22	43	72	40	55,56	93,02	2015
23	40	72	36	50,00	90,00	2015
24	61	72	44	61,11	72,13	2015
25	87	72	52	72,22	59,77	2015
26	58	72	41	56,94	70,69	2015
27	76	72	48	66,67	63,16	2015
21	72	84	57	67,86	79,17	2016
22	62	84	53	63,10	85,48	2016
23	60	84	52	61,90	86,67	2016
24	83	84	58	69,05	69,88	2016
25	108	84	71	84,52	65,74	2016
26	75	84	56	66,67	74,67	2016
27	95	84	63	75,00	66,32	2016
21	62	52	41	78,85	66,13	2017
22	51	52	37	71,15	72,55	2017
23	58	52	41	78,85	70,69	2017
24	79	52	44	84,62	55,70	2017

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.9

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
25	97	52	45	86,54	46,39	2017
26	68	52	38	73,08	55,88	2017
27	83	52	39	75,00	46,99	2017
21	63	80	57	71,25	90,48	2018
22	54	80	50	62,50	92,59	2018
23	50	80	48	60,00	96,00	2018
24	71	80	58	72,50	81,69	2018
25	96	80	67	83,75	69,79	2018
26	58	80	47	58,75	81,03	2018
27	75	80	54	67,50	72,00	2018
21	70	60	48	80,00	68,57	2019
22	63	60	44	73,33	69,84	2019
23	67	60	49	81,67	73,13	2019
24	84	60	53	88,33	63,10	2019
25	103	60	55	91,67	53,40	2019
26	72	60	45	75,00	62,50	2019
27	85	60	46	76,67	54,12	2019
21	71	50	44	88,00	61,97	2020
22	59	50	40	80,00	67,80	2020
23	64	50	41	82,00	64,06	2020
24	83	50	47	94,00	56,63	2020
25	101	50	48	96,00	47,52	2020
26	80	50	45	90,00	56,25	2020
27	86	50	43	86,00	50,00	2020
21	66	59	42	71,19	63,64	2021
22	56	59	40	67,80	71,43	2021
23	52	59	40	67,80	76,92	2021
24	69	59	44	74,58	63,77	2021
25	86	59	48	81,36	55,81	2021
26	56	59	37	62,71	66,07	2021
27	78	59	44	74,58	56,41	2021

Tabela 6.10 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Rio de Janeiro para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
21	83	54	42	77,78	50,60	2011
22	70	54	41	75,93	58,57	2011
23	80	54	42	77,78	52,50	2011
24	93	54	43	79,63	46,24	2011
25	116	54	45	83,33	38,79	2011
26	90	54	40	74,07	44,44	2011
27	108	54	43	79,63	39,81	2011
21	83	70	48	68,57	57,83	2012
22	65	70	46	65,71	70,77	2012
23	71	70	48	68,57	67,61	2012

Continua na próxima página

Table 6.10 Continua na próxima página

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
24	92	70	55	78,57	59,78	2012
25	113	70	59	84,29	52,21	2012
26	91	70	53	75,71	58,24	2012
27	110	70	58	82,86	52,73	2012
21	85	61	49	80,33	57,65	2013
22	76	61	48	78,69	63,16	2013
23	78	61	47	77,05	60,26	2013
24	101	61	49	80,33	48,51	2013
25	130	61	51	83,61	39,23	2013
26	103	61	49	80,33	47,57	2013
27	116	61	49	80,33	42,24	2013
21	68	52	41	78,85	60,29	2014
22	63	52	41	78,85	65,08	2014
23	65	52	41	78,85	63,08	2014
24	81	52	45	86,54	55,56	2014
25	99	52	47	90,38	47,47	2014
26	81	52	39	75,00	48,15	2014
27	85	52	43	82,69	50,59	2014
21	81	72	50	69,44	61,73	2015
22	75	72	48	66,67	64,00	2015
23	76	72	49	68,06	64,47	2015
24	91	72	51	70,83	56,04	2015
25	112	72	58	80,56	51,79	2015
26	92	72	55	76,39	59,78	2015
27	106	72	57	79,17	53,77	2015
21	98	84	68	80,95	69,39	2016
22	85	84	63	75,00	74,12	2016
23	86	84	64	76,19	74,42	2016
24	101	84	65	77,38	64,36	2016
25	125	84	69	82,14	55,20	2016
26	100	84	63	75,00	63,00	2016
27	117	84	65	77,38	55,56	2016
21	79	52	44	84,62	55,70	2017
22	72	52	43	82,69	59,72	2017
23	74	52	44	84,62	59,46	2017
24	95	52	45	86,54	47,37	2017
25	119	52	45	86,54	37,82	2017
26	88	52	43	82,69	48,86	2017
27	105	52	41	78,85	39,05	2017
21	90	80	71	88,75	78,89	2018
22	82	80	68	85,00	82,93	2018
23	82	80	68	85,00	82,93	2018
24	100	80	69	86,25	69,00	2018
25	118	80	72	90,00	61,02	2018
26	95	80	66	82,50	69,47	2018
27	106	80	66	82,50	62,26	2018
21	106	60	53	88,33	50,00	2019
22	91	60	52	86,67	57,14	2019
23	105	60	54	90,00	51,43	2019
24	120	60	55	91,67	45,83	2019

Continua na próxima página

Table 6.10 Continua na próxima página

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
25	138	60	56	93,33	40,58	2019
26	119	60	53	88,33	44,54	2019
27	127	60	52	86,67	40,94	2019
21	99	50	46	92,00	46,46	2020
22	91	50	46	92,00	50,55	2020
23	94	50	47	94,00	50,00	2020
24	111	50	48	96,00	43,24	2020
25	127	50	48	96,00	37,80	2020
26	101	50	46	92,00	45,54	2020
27	120	50	46	92,00	38,33	2020
21	103	59	46	77,97	44,66	2021
22	95	59	47	79,66	49,47	2021
23	98	59	49	83,05	50,00	2021
24	114	59	48	81,36	42,11	2021
25	128	59	50	84,75	39,06	2021
26	111	59	48	81,36	43,24	2021
27	126	59	51	86,44	40,48	2021

6.0.1.6 Costa do Espírito Santo

Tabela 6.11 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $H_S > 2,5$ metros para os pontos localizados na costa do Espírito Santo para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
28	13	23	7	30,43	53,85	2011
29	19	23	12	52,17	63,16	2011
30	24	23	15	65,22	62,50	2011
31	46	23	20	86,96	43,48	2011
32	49	23	19	82,61	38,78	2011
33	35	23	14	60,87	40,00	2011
28	12	26	7	26,92	58,33	2012
29	20	26	14	53,85	70,00	2012
30	26	26	13	50,00	50,00	2012
31	41	26	21	80,77	51,22	2012
32	40	26	21	80,77	52,50	2012
33	31	26	19	73,08	61,29	2012
28	8	9	6	66,67	75,00	2013
29	14	9	5	55,56	35,71	2013
30	20	9	2	22,22	10,00	2013
31	40	9	4	44,44	10,00	2013
32	33	9	3	33,33	9,09	2013
33	25	9	2	22,22	8,00	2013
28	12	23	6	26,09	50,00	2014
29	23	23	16	69,57	69,57	2014
30	27	23	19	82,61	70,37	2014

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.11

Ponto	Ressaca Waverys	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
31	40	23	23	100,00	57,50	2014
32	34	23	20	86,96	58,82	2014
33	29	23	16	69,57	55,17	2014
28	7	30	4	13,33	57,14	2015
29	13	30	9	30,00	69,23	2015
30	11	30	9	30,00	81,82	2015
31	35	30	16	53,33	45,71	2015
32	31	30	17	56,67	54,84	2015
33	27	30	16	53,33	59,26	2015
28	17	20	7	35,00	41,18	2016
29	25	20	12	60,00	48,00	2016
30	29	20	10	50,00	34,48	2016
31	49	20	16	80,00	32,65	2016
32	43	20	14	70,00	32,56	2016
33	38	20	14	70,00	36,84	2016
28	21	19	8	42,11	38,10	2017
29	29	19	12	63,16	41,38	2017
30	35	19	14	73,68	40,00	2017
31	46	19	16	84,21	34,78	2017
32	42	19	14	73,68	33,33	2017
33	48	19	13	68,42	27,08	2017
28	8	12	4	33,33	50,00	2018
29	14	12	5	41,67	35,71	2018
30	14	12	4	33,33	28,57	2018
31	31	12	8	66,67	25,81	2018
32	25	12	7	58,33	28,00	2018
33	19	12	6	50,00	31,58	2018
28	27	12	5	41,67	18,52	2019
29	33	12	8	66,67	24,24	2019
30	39	12	8	66,67	20,51	2019
31	54	12	10	83,33	18,52	2019
32	47	12	9	75,00	19,15	2019
33	42	12	9	75,00	21,43	2019
28	12	6	1	16,67	8,33	2020
29	16	6	3	50,00	18,75	2020
30	15	6	3	50,00	20,00	2020
31	51	6	4	66,67	7,84	2020
32	41	6	4	66,67	9,76	2020
33	32	6	3	50,00	9,38	2020
28	14	19	11	57,89	78,57	2021
29	18	19	14	73,68	77,78	2021
30	18	19	14	73,68	77,78	2021
31	30	19	15	78,95	50,00	2021
32	29	19	16	84,21	55,17	2021
33	25	19	13	68,42	52,00	2021

Tabela 6.12 - Valores atualizados da comparação entre avisos de ressaca emitidos pelo CHM e reanálise Waverys considerando $P_W > 31,25$ kW/m para os pontos localizados na costa do Espírito Santo para os anos de 2011 a 2021.

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
28	37	23	18	78,26	48,65	2011
29	42	23	19	82,61	45,24	2011
30	46	23	19	82,61	41,30	2011
31	68	23	19	82,61	27,94	2011
32	54	23	19	82,61	35,19	2011
33	48	23	20	86,96	41,67	2011
28	22	26	12	46,15	54,55	2012
29	40	26	19	73,08	47,50	2012
30	42	26	18	69,23	42,86	2012
31	63	26	22	84,62	34,92	2012
32	46	26	21	80,77	45,65	2012
33	40	26	22	84,62	55,00	2012
28	25	9	6	66,67	24,00	2013
29	37	9	5	55,56	13,51	2013
30	40	9	4	44,44	10,00	2013
31	69	9	5	55,56	7,25	2013
32	58	9	5	55,56	8,62	2013
33	39	9	3	33,33	7,69	2013
28	22	23	11	47,83	50,00	2014
29	36	23	18	78,26	50,00	2014
30	41	23	18	78,26	43,90	2014
31	60	23	22	95,65	36,67	2014
32	46	23	22	95,65	47,83	2014
33	39	23	21	91,30	53,85	2014
28	26	30	9	30,00	34,62	2015
29	33	30	11	36,67	33,33	2015
30	33	30	14	46,67	42,42	2015
31	64	30	19	63,33	29,69	2015
32	48	30	16	53,33	33,33	2015
33	37	30	15	50,00	40,54	2015
28	37	20	13	65,00	35,14	2016
29	52	20	15	75,00	28,85	2016
30	50	20	16	80,00	32,00	2016
31	84	20	19	95,00	22,62	2016
32	60	20	17	85,00	28,33	2016
33	47	20	16	80,00	34,04	2016
28	34	19	12	63,16	35,29	2017
29	39	19	14	73,68	35,90	2017
30	42	19	16	84,21	38,10	2017
31	70	19	16	84,21	22,86	2017
32	49	19	15	78,95	30,61	2017
33	50	19	15	78,95	30,00	2017
28	31	12	5	41,67	16,13	2018
29	39	12	9	75,00	23,08	2018
30	40	12	9	75,00	22,50	2018
31	73	12	9	75,00	12,33	2018

Continua na próxima página

Continuação da Tabela 6.12

Ponto	Ressaca $P_W > 31,25$ kW/m	Dias aviso vigente	Dias em comum	% aviso comprovado	% cobertura dos Avisos	Ano
32	44	12	9	75,00	20,45	2018
33	30	12	8	66,67	26,67	2018
28	43	12	8	66,67	18,60	2019
29	50	12	10	83,33	20,00	2019
30	52	12	10	83,33	19,23	2019
31	79	12	12	100,00	15,19	2019
32	63	12	11	91,67	17,46	2019
33	54	12	9	75,00	16,67	2019
28	41	6	1	16,67	2,44	2020
29	46	6	2	33,33	4,35	2020
30	57	6	3	50,00	5,26	2020
31	85	6	3	50,00	3,53	2020
32	63	6	3	50,00	4,76	2020
33	51	6	2	33,33	3,92	2020
28	34	19	13	68,42	38,24	2021
29	43	19	16	84,21	37,21	2021
30	47	19	16	84,21	34,04	2021
31	76	19	16	84,21	21,05	2021
32	49	19	16	84,21	32,65	2021
33	38	19	13	68,42	34,21	2021

6.0.2 Séries Temporais

6.0.2.1 Rio Grande do Sul

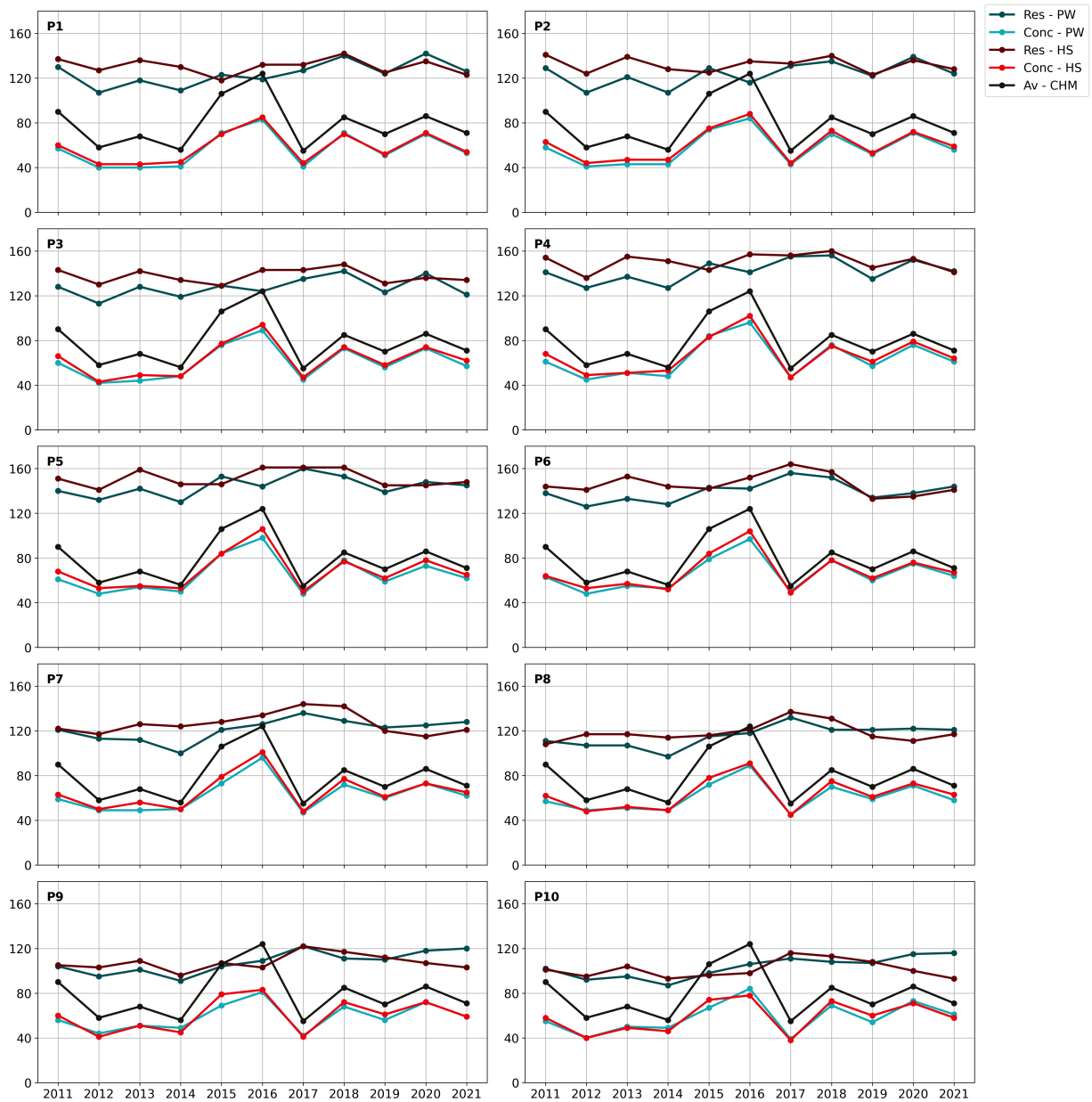


Figura 6.1: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 (Res- H_S), critério 2 (Res- P_W), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM (Av-CHM) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio Grande do Sul.

6.0.2.2 Santa Catarina

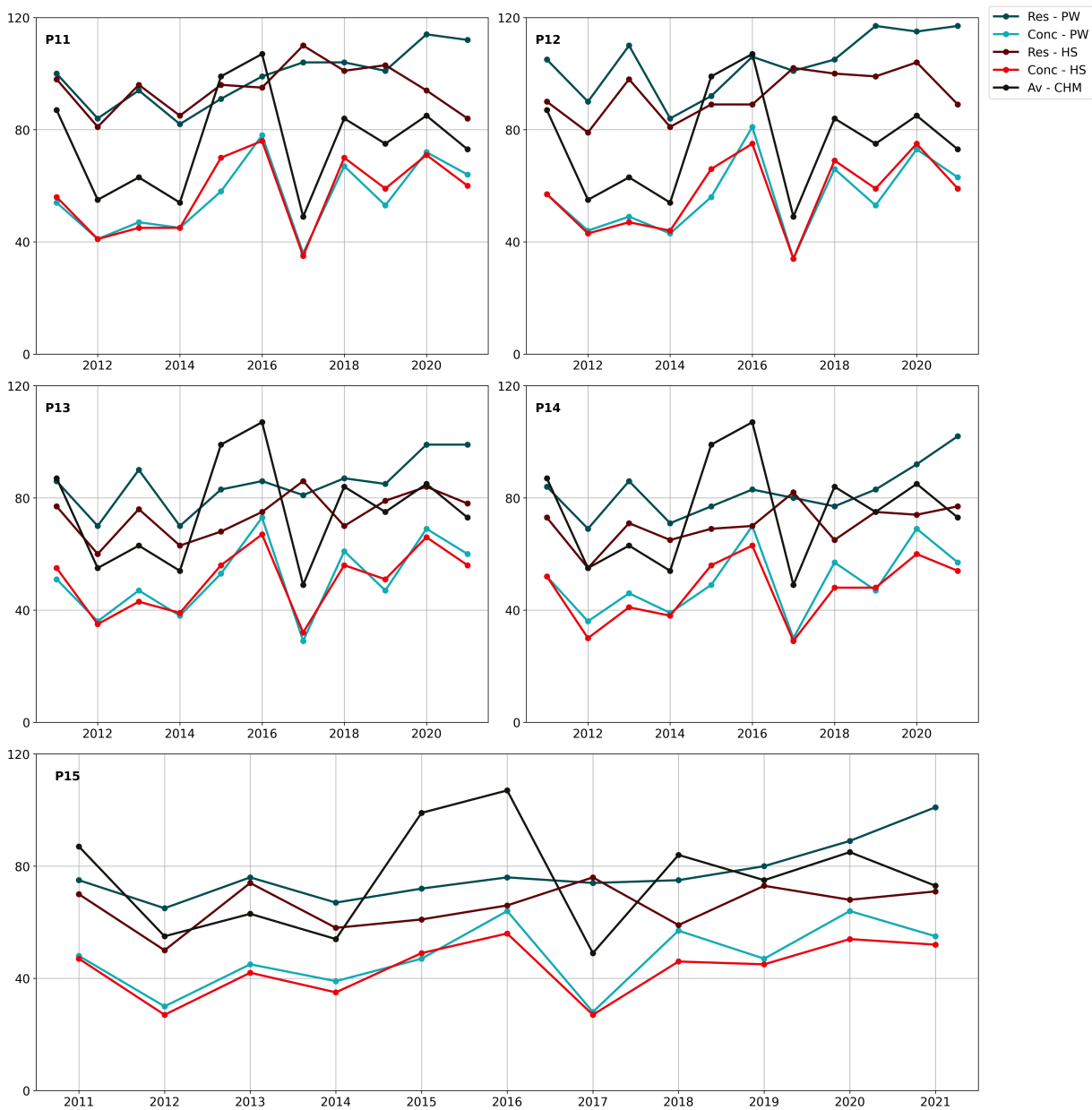


Figura 6.2: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM ($Av-CHM$) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa de Santa Catarina.

6.0.2.3 Paraná

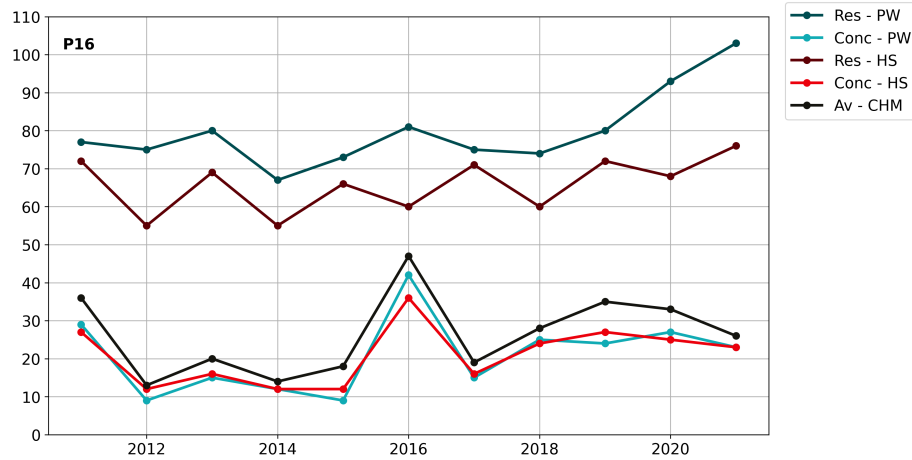


Figura 6.3: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM ($Av-CHM$) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Paraná.

6.0.2.4 São Paulo

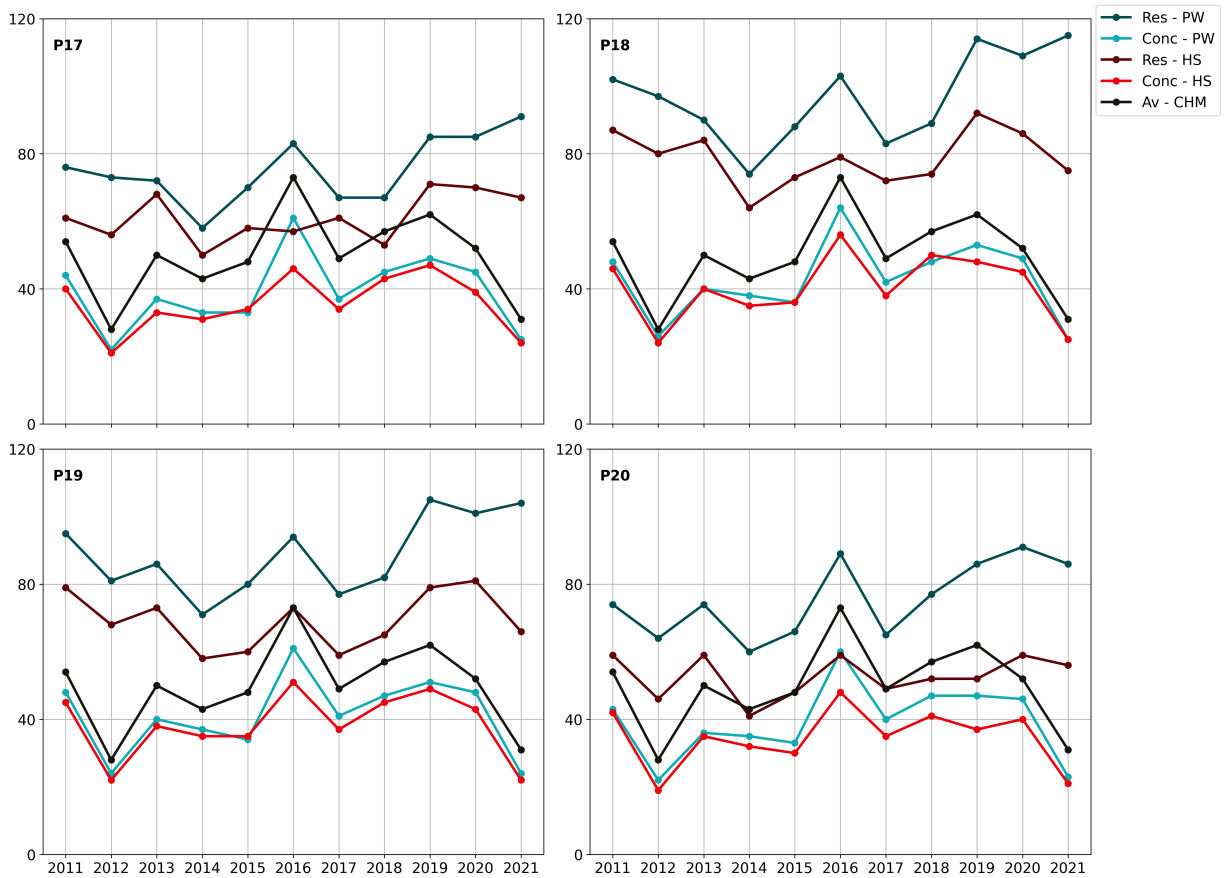


Figura 6.4: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM ($Av-CHM$) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa de São Paulo.

6.0.2.5 Rio de Janeiro

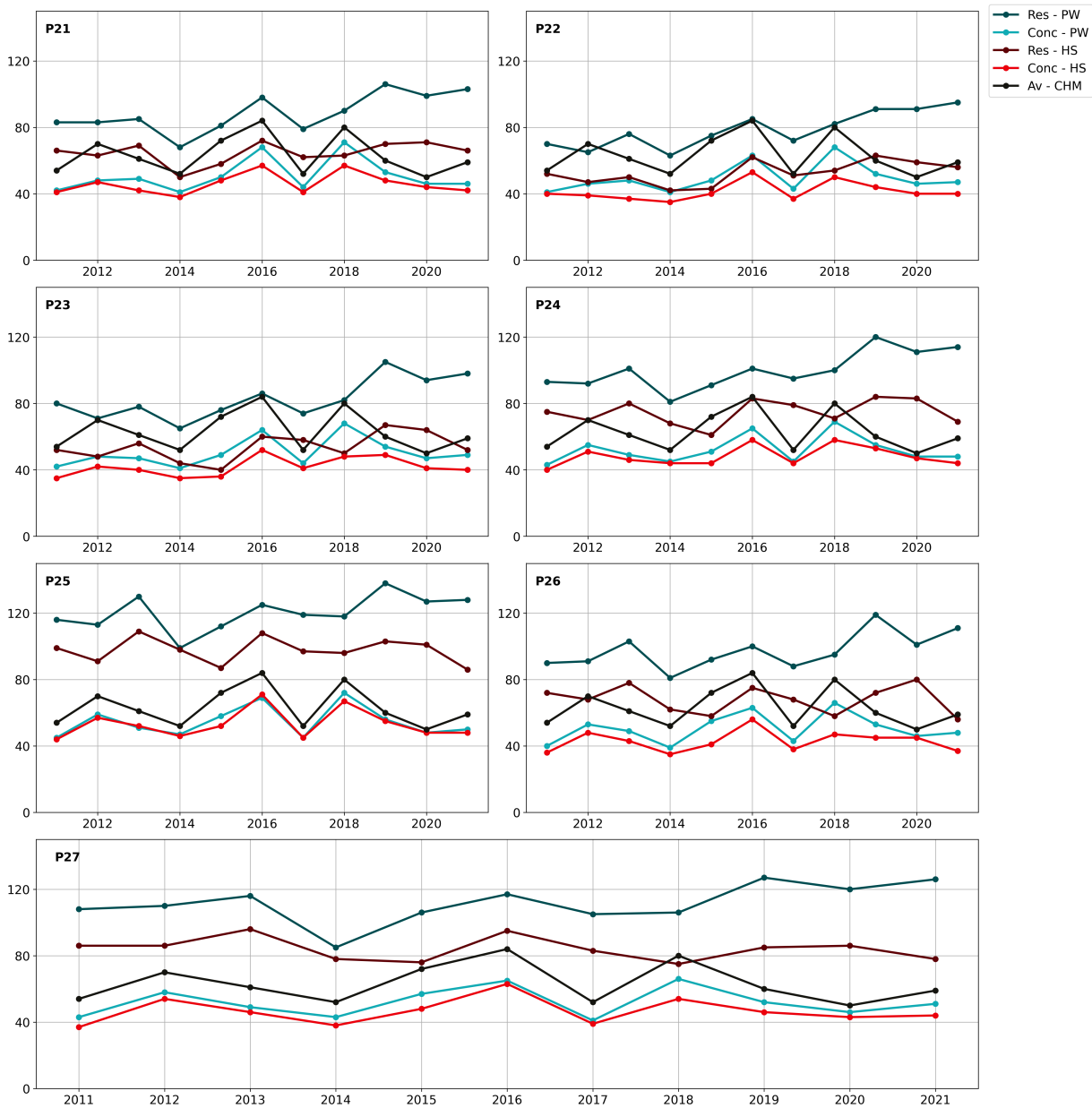


Figura 6.5: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM ($Av-CHM$) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Rio de Janeiro.

6.0.2.6 Espírito Santo

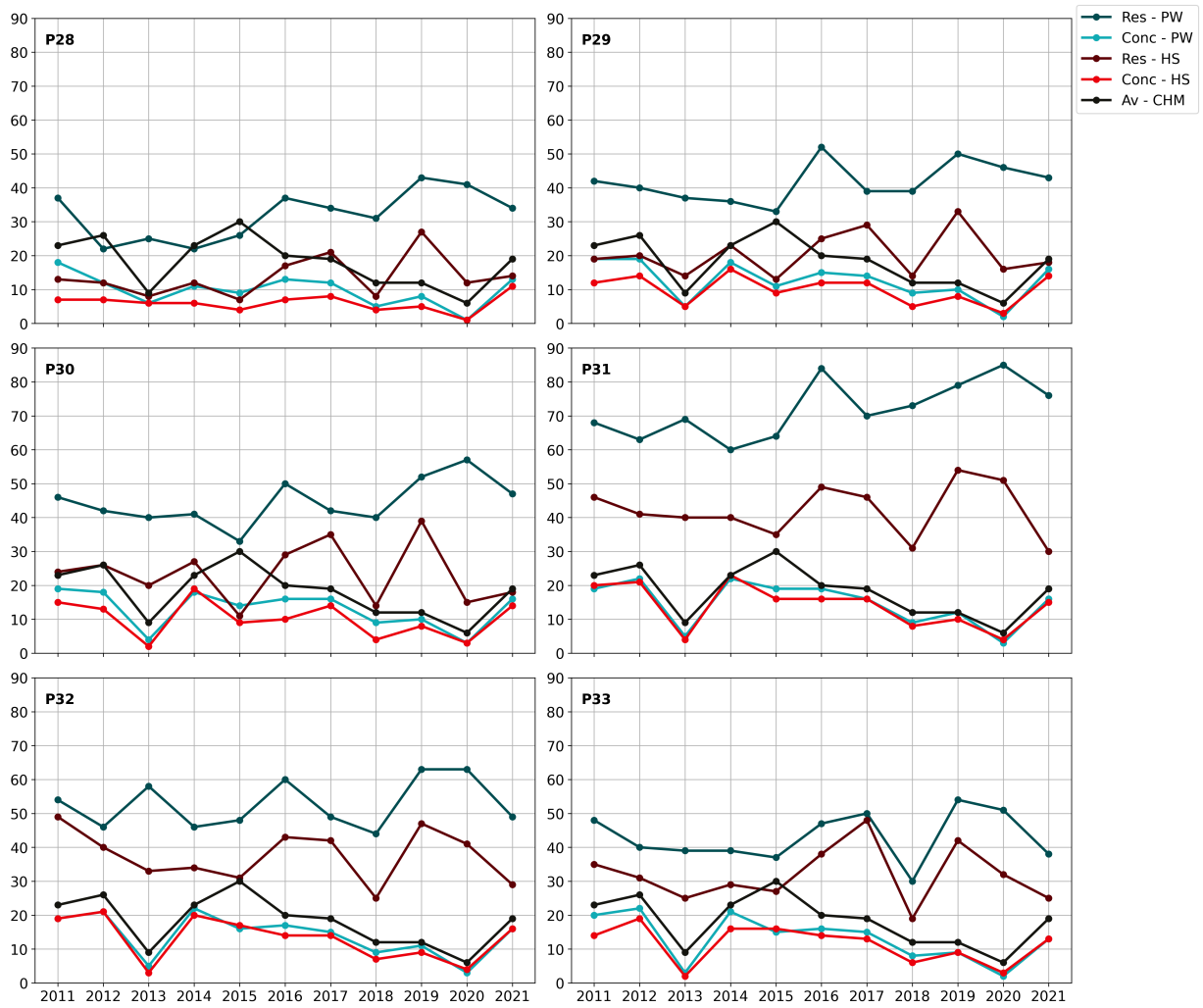


Figura 6.6: Séries temporais para o total de eventos de ressaca considerando o critério 1 ($Res-H_S$), critério 2 ($Res-P_W$), dias de avisos de ressaca emitidos pelo CHM ($Av-CHM$) e dias concomitantes entre os dois critérios, para a costa do Espírito Santo.

6.0.3 Escala de classificação de ressacas

6.0.3.1 Clusterização

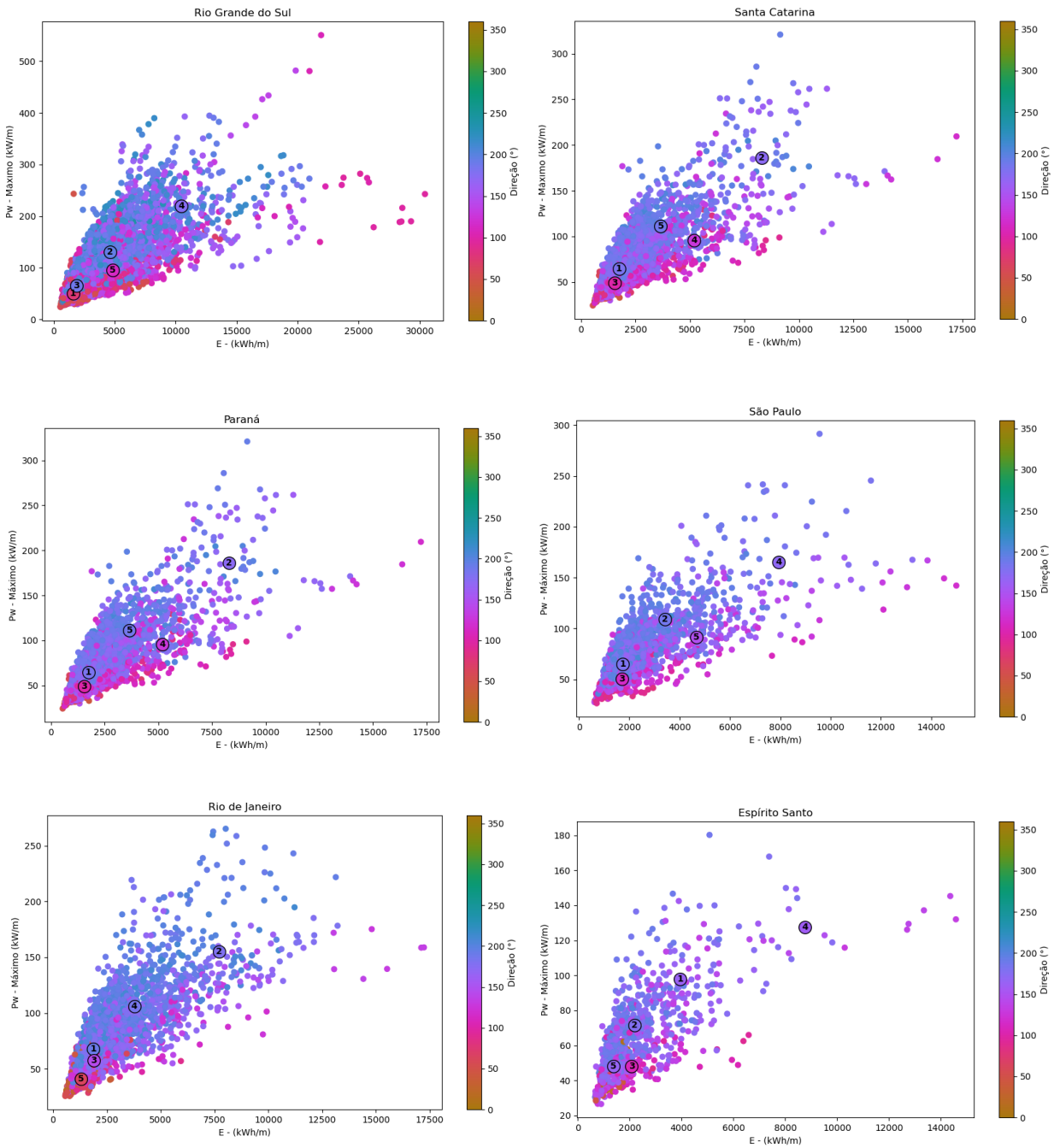


Figura 6.7: Clusterização pelo método *K-means* para a costa do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo.

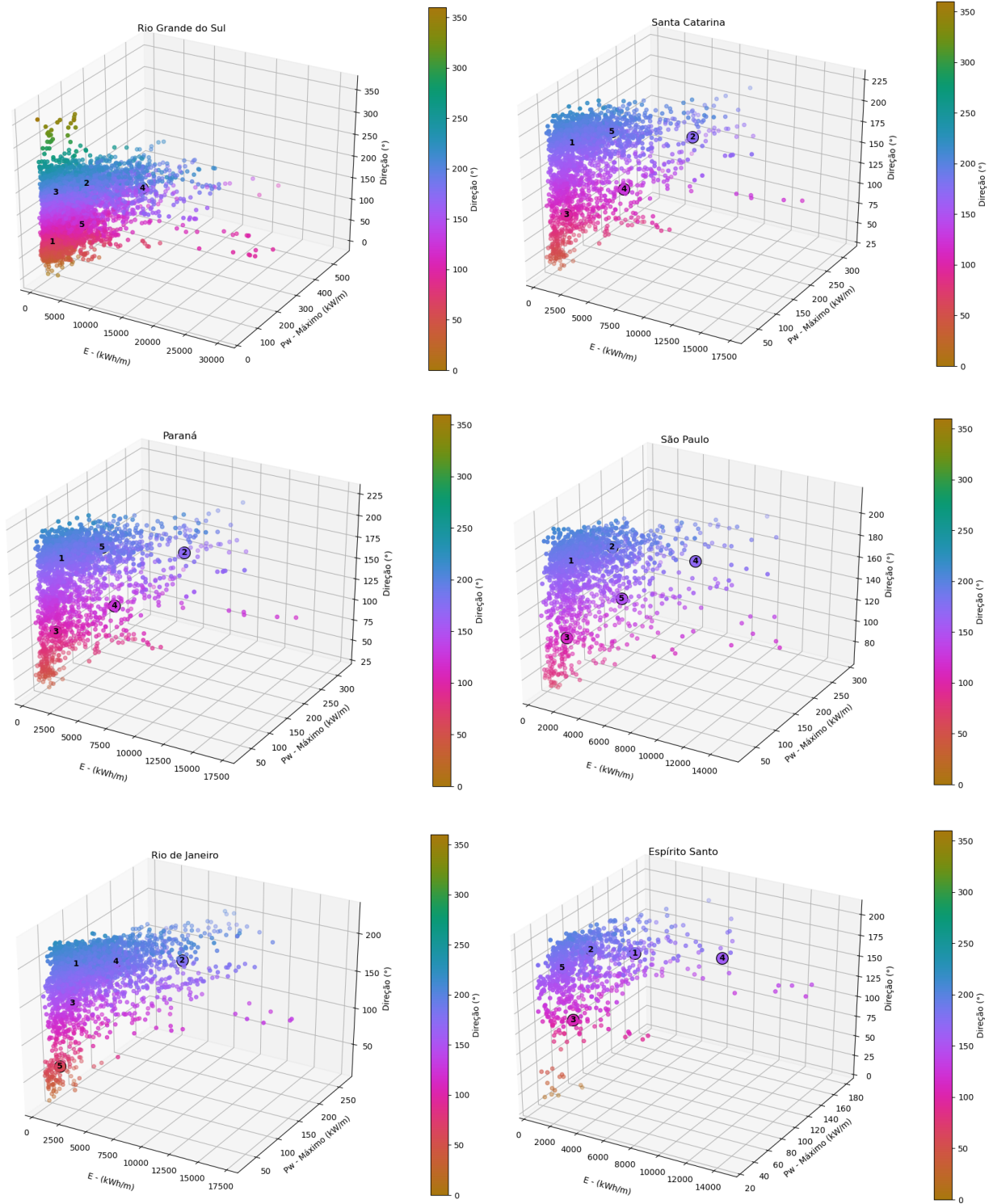


Figura 6.8: Visualização 3D da clusterização para a costa do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro e Espírito Santo.