

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

Matheus Bonjour Laviola da Silva

**Classificação de *Weather Patterns* e suas
relações com extremos de onda no Litoral
Sul e Sudeste do Brasil**

São Paulo

2024

Matheus Bonjour Laviola da Silva

**Classificação de *Weather Patterns* e suas
relações com extremos de onda no Litoral
Sul e Sudeste do Brasil**

Dissertação apresentada ao Departamento 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

São Paulo

2024

Versão corrigida. A original encontra-se no Serviço de Pós-Graduação

Aos meus pais, sem o altruísmo deles, nada disso seria possível

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Adenilson e Miria, cujo amor, sacrifício e apoio incondicional foram a base sobre a qual construí meus sonhos. Sem o altruísmo deles, a jornada que culminou neste trabalho não seria apenas desafiadora, mas talvez impossível. Esta conquista é tanto deles quanto minha, um reflexo do seu incansável esforço e fé inabalável em mim.

Em especial, agradeço à minha irmã, Adrieli, cuja trajetória de vida é uma fonte constante de inspiração para mim. Com admiração, testemunhei sua dedicação e esforço para obter tanto o mestrado quanto o doutorado, além de seu papel como professora, empresária e mãe. Sua determinação me ensinou o verdadeiro significado da resiliência e do comprometimento.

Agradeço à minha namorada e companheira de vida, Maisa, cujo apoio, compreensão e amor foram fundamentais durante esta jornada desafiadora. Sua determinação e esforço nos estudos também servem como fonte de inspiração para mim.

Pelos momentos de diversão e por toda troca que realizamos nas pesquisas, códigos e escrita dos documentos, agradeço aos grandes amigos e pesquisadores do IAG-USP: Renan Pimentel, Danilo Couto, Rodrigo Tecchio, Jean Peres, Victor Ranieri e Andres Flores.

Agradeço a um grande amigo e companheiro de trabalho, Fernando Barreto, cujo papel em minha jornada acadêmica foi inestimável, compartilhando sua expertise e seu conhecimento, guiando-me através dos desafios intelectuais e técnicos.

Agradeço à Carolina Gramcianinov, por contribuir efetivamente na minha pesquisa, me questionando, fazendo sugestões e ajudando na escrita científica, além de seu apoio nas tomadas de decisão da minha carreira.

Ao meu querido orientador, Ricardo de Camargo, que se tornou um grande amigo

durante esse período. Agradeço por sempre acreditar no meu potencial, enfrentando comigo os desafios inerentes a este projeto com paciência e, sempre, compartilhando sua vasta experiência acadêmica e profissional.

Agradeço aos membros da banca examinadora pelo aceite no convite em avaliar o meu trabalho, contribuindo para a melhoria do mesmo e para meu desenvolvimento profissional e acadêmico.

Agradeço às agências de fomento à pesquisa, cujo suporte por meio de uma bolsa de estudos foi essencial durante minha jornada acadêmica. Sua existência e dedicação fomentam o avanço da ciência, tecnologia e inovação em nosso país, mantendo a pesquisa científica viva e ativa.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

Resumo

A interação atmosfera-oceano afeta a formação de ondas, com sistemas meteorológicos de alta intensidade que influenciam na direção, período e altura das ondas. Essa dinâmica é crucial para navegação e indústria de petróleo, onde previsões precisas de ondas são essenciais. Ondas extremas, causadas por eventos meteorológicos severos, trazem riscos a embarcações e infraestruturas costeiras. Entender padrões atmosféricos associados a condições extremas de ondas é vital para planejamento costeiro e segurança da operação. A identificação de *Weather Patterns* (WPs) associados a ondas extremas associadas para o Oceano Atlântico Sudoeste é o objetivo do presente trabalho. Para este fim, um algoritmo K-means foi adotado para agrupar dados em condições atmosféricas semelhantes, considerando 25 anos de dados de reanálise (1993-2017) das componentes de vento zonal e meridional e altura geopotencial a 1000 hPa. Três pontos (Vitória, Santos e Rio Grande) ao longo da costa brasileira foram escolhidos para avaliar os extremos de onda e quais WPs estão associados aos extremos nessas três diferentes regiões. O método do cotovelo foi utilizado para determinar o número ideal de centróides para representar os WPs em cada ponto. As datas correspondentes a cada WPs foram usadas para plotar o campo médio de onda e a rosa de ondas associados a cada um. Além disso, foram obtidos os campos médios de 24 e 48 horas anteriores à ocorrência de cada evento, no intuito de estudar a evolução desses padrões. Os resultados indicam que os WPs são dominados tanto por ciclones, cavados e anticiclones no domínio. Ciclones com uma faixa de vento S-SW induzem ondas extremas em Santos e Rio Grande, enquanto para Vitória, a geração de ondas extremas é mais dominante devido à influência da alta pós-frontal, induzindo ondas de SE-E. Apesar de detectar com sucesso os WPs relacionados a eventos de ondas extremas, há limitações, como o uso do percentil 99 para definir eventos extremos, excluindo fenômenos

menos intensos, mas ainda significativos. Sugere-se explorar limiares de percentil menores e analisar níveis atmosféricos superiores para entender melhor a dinâmica desses eventos.

Palavras-chave: padrões meteorológicos; Oeste do Atlântico Sul; extremos de onda.

Abstract

Atmosphere-ocean interaction affects wave formation, with high-intensity meteorological systems influencing the direction, period and height of waves. This dynamic is crucial for shipping and the oil industry, where accurate wave forecasts are essential. Extreme waves, caused by severe meteorological events, pose risks to vessels and coastal infrastructure. Understanding atmospheric patterns associated with extreme wave conditions is vital for coastal planning and operational safety. The identification of weather patterns and associated surface waves for the Southwestern Atlantic Ocean is the goal of the present work. For this purpose, a K-means algorithm was adopted to group data into similar atmospheric conditions considering 25 years of reanalysis data (1993-2017) of zonal and meridional wind components and geopotential height at 1000 hPa. Three points (Vitoria, Santos and Rio Grande) along the Brazilian coast were chosen to evaluate the wave extremes and which Weather Patterns are associated with the extremes in these three different regions. The knee point detection method was used to determine the ideal number of centroids for representing the Weather Patterns at each point. The dates corresponding to each WP were used to plot the average wave field associated with each WP. Additionally, the average fields from the 24 and 48 hours prior to the occurrence of each event were obtained, with the purpose of studying the evolution of these patterns. The results indicate that WPs are dominated by both cyclones and anti-cyclones in the domain. Cyclones with a south/southwest fetch induce extreme waves in Santos and Rio Grande, while for Vitoria, extreme wave generation is more dominant due to the influence of the post-frontal high. Despite successfully detecting WPs related to extreme wave events, there are limitations, such as the use of the 99th percentile to define extreme events, excluding less intense but still significant phenomena. It is suggested to explore lower percentile thresholds and

analyze upper atmospheric levels to better understand the dynamics of these events.

Keywords: weather patterns; Western South Atlantic, wave extremes.

Lista de Figuras

- 1.1 Portos do Brasil e Blocos exploratórios de óleo e gás. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes e Agência Nacional de Águas (2000); Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2021). 26
- 2.1 Exemplo figurativo das principais regiões de ciclogênese do sudoeste do Atlântico Sul, Frente fria e baixa pressão, bem como a ASAS. 30
- 2.2 Situações sinóticas para os dias a) 06Z 21/06/1996; b) 00Z 18/04/1999; c) 00Z 25/05/2003 d) 00Z 04/07/2006, em que ocorreram eventos de erosão costeira. (Fonte: Adaptado de Machado et al. (2010)) 33
- 3.1 Exemplo do Elbow Method (Adaptado de "Finding Optimal Number of Clusters in K-means Through Elbow Method", por Asanka Perera, 2017. Fonte: LinkedIn.) 43
- 3.2 Etapas metodológicas para o algoritmo K-Means: a) Seleção dos pontos; b) Seleção dos dias com extremo; c) Extração dos dias no conjunto de dados atmosféricos; d) Preprocessamento; e) Cálculo do número ideal de clusters; f) Inicialização do algoritmo; g) Obtenção dos Weather Patterns; h) Distribuição de frequência dos eventos. 45
- 3.3 Etapas metodológicas para o algoritmo K-Means. Cada ponto de dados na figura representa as condições atmosféricas (incorporando u, v e altura geopotencial) para cada dia selecionado. O cluster central simboliza a condição média de todos os dias que têm a menor distância euclidiana do centro. Cada ponto da grade na matriz é transformado para criar um vetor singular. 49
- 3.4 Ponto de referência para as boias de Vitória, Santos e Rio Grande. 51

4.1	Gráfico de dispersão e métricas de erro para Hs do WAVERYS x Hs das boias: (a) Vitória, (b) Santos e (c) Rio Grande. A densidade é normalizada pelo número de pares de dados (entradas).	53
4.2	Série temporal de altura significativa e linha que representa o percentil 99 para a) Vitoria; b) Santos; c) Rio Grande.	55
4.3	Método do Cotovelo representando o número de clusters ideais para os dias que excedem o percentil 99 em a) Vitória; b) Santos; c) Rio Grande.	56
4.4	<i>Weather Patterns</i> principais e suas respectivas proporções na amostra total de Vitória: a) WP1 ; b) WP2; c) WP3; d) WP4; e) WP5; f) WP6.	58
4.5	<i>Weather Patterns</i> principais e suas respectivas proporções na amostra total de Santos: a) WP1 ; b) WP2; c) WP3; d) WP4; e) WP5; f) WP6.	60
4.6	<i>Weather Patterns</i> principais e suas respectivas proporções na amostra total de Rio Grande: a) WP1 ; b) WP2; c) WP3; d) WP4.	62
4.7	Distribuição de ocorrência dos WPs de a) Vitória, b) Santos, c) Rio Grande	63
4.8	<i>Weather Patterns</i> de Vitória e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.	67
4.9	<i>Weather Patterns</i> de Santos e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.	71
4.10	<i>Weather Patterns</i> de Rio Grande e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.	74
4.11	Evolução temporal WPs para ondas extremas em Vitória: primeira coluna: 48h antes do WP; segunda coluna: 24h antes do WP; terceira coluna: WP; última coluna: campo de ondas correspondente ao WP.	76
4.12	Evolução temporal WPs para ondas extremas em Santos: primeira coluna: 48h antes do WP; segunda coluna: 24h antes do WP; terceira coluna: WP; última coluna: campo de ondas correspondente ao WP.	78
4.13	Evolução temporal WPs para ondas extremas em Rio Grande: primeira coluna: 48h antes do WP; segunda coluna: 24h antes do WP; terceira coluna: WP; última coluna: campo de ondas correspondente ao WP.	80
5.1	Comparação entre WP1 de Santos e WP3 de Vitória	81
5.2	Comparação entre WP2 de Rio Grande, WP4 de Santos e WP4 de Vitória	82

5.3	Comparação entre WP1 de Rio Grande e WP5 de Santos	82
5.4	Comparação entre WP4 de Rio Grande, WP3 de Santos e WP6 de Vitória	83
5.5	Comparação entre os 3 padrões encontrados por Sondermann et al. (2023) e os WP5, WP1 e WP2 de Santos.	84
5.6	<i>Weather Patterns</i> de Vitória e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.	86
5.7	Comparação dos padrões atmosféricos encontrados por Solari e Alonso (2017) e os WPs encontrados para Rio Grande	88

Lista de Tabelas

2.1	Avaliação dos Métodos de Classificação Objetivos baseados nos resultados de Huth (1996).	38
-----	--	----

Sumário

1. <i>Introdução</i>	23
1.1 Área de Estudo	25
1.2 Objetivo Geral	26
2. <i>Revisão Bibliográfica</i>	29
2.1 Ondas e situações sinóticas no Atlântico Sul	29
2.2 Métodos de determinação de padrões	36
2.3 Weather Patterns e Ondas	40
3. <i>Metodologia</i>	43
3.1 Seleção de Dados	44
3.2 Critério Para Extremos	45
3.3 O Algoritmo K-Means	46
3.3.1 Inicialização	46
3.3.2 Atribuição de Clusters	47
3.3.3 Atualização dos centróides	47
3.3.4 Convergência	47
3.3.5 Escolha do Número de Clusters	48
3.3.6 Interpretação e Visualização do K-Means	48
3.4 Pontos Escolhidos	50
3.5 Avaliação Estatística	51
4. <i>Resultados</i>	53
4.1 <i>Weather Patterns</i>	56

4.1.1	Vitória	56
4.1.2	Santos	59
4.1.3	Rio Grande	61
4.2	Distribuição de ocorrência dos <i>Weather Patterns</i>	62
4.3	Ondas associadas aos <i>Weather Patterns</i>	63
4.3.1	Vitória	63
4.3.2	Santos	68
4.3.3	Rio Grande	72
4.4	Evolução temporal dos <i>Weather Patterns</i>	75
4.4.1	Vitória	75
4.4.2	Santos	77
4.4.3	Rio Grande	79
5.	<i>Discussão</i>	81
5.1	Intercomparação de WPs	81
5.2	Comparação de WPs com outros estudos	83
6.	<i>Considerações Finais</i>	89
7.	<i>Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros</i>	91
	<i>Referências</i>	93

Introdução

A interação entre a atmosfera e o oceano é um componente fundamental do sistema climático, exercendo uma influência significativa nas condições oceânicas, particularmente na geração de ondas. Sistemas meteorológicos de escala sinótica, como ciclones e suas frentes associadas, anti-ciclones migratórios e sistemas de alta pressão, desempenham um papel crucial na dinâmica oceânica, influenciando a geração, intensidade e direção das ondas. A transferência de momentum dos ventos relacionados a esses sistemas para a superfície do mar induz o movimento das ondas, cuja altura, período e direção são diretamente afetados pela intensidade do vento, sua duração e a extensão da área sobre a qual ele sopra (pista de vento).

A compreensão da influência dos padrões atmosféricos nas condições oceânicas é vital para diversas atividades humanas como a navegação marítima e a indústria de petróleo e gás, onde previsões precisas de ondas são essenciais para garantir segurança e eficiência operacional. Extremos de onda, frequentemente resultantes de eventos meteorológicos severos, representam um risco significativo para embarcações, plataformas de petróleo e gasodutos submarinos, demandando medidas adaptativas (Buchner e Bunnik, 2007; Veldman et al., 2011; Chandrasekaran e Koshti, 2013). Adicionalmente, tais ondas podem provocar erosão costeira, inundações em áreas litorâneas e danos à infraestrutura, afetando diretamente as comunidades costeiras (Young, 1999; Parise et al., 2009; Machado et al., 2010, 2019). Portanto, entender os padrões atmosféricos que contribuem para condições extremas de onda é crucial para o planejamento costeiro eficaz, a gestão de riscos de desastres e a adaptação às mudanças climáticas, enfatizando a necessidade de pesquisas aprofundadas nesse campo.

O presente estudo busca contribuir para o entendimento dos padrões meteorológicos de circulação à superfície relacionados a eventos extremos de onda. Esse entendimento serve

como auxílio para preditores de modo a identificar padrões "perigosos" para, por exemplo, emissão de alertas. Além disso, no atual cenário de mudanças climáticas (Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), 2023), tem-se a identificação e análise da prevalência e tendência de ocorrência destes padrões no futuro, devendo ser de grande utilidade para auxiliar a elaboração de políticas públicas que visem adaptação desses impactos.

Os padrões meteorológicos de circulação, neste trabalho também chamado de " *Weather Patterns*" (WP), podem ser classificados de forma subjetiva ou objetiva, auxiliada por computadores e técnicas de *Machine Learning*. Essas classificações podem ser utilizadas tanto para embasar previsões do tempo quanto para estudos de climatologia/extremos de diversas regiões.

A utilização de técnicas de *Machine Learning*, como o método de agrupamento K-Means, permite a investigação de padrões e variabilidade na circulação atmosférica. O algoritmo de agrupamento K-Means foi inicialmente proposto por MacQueen et al. (1967) e posteriormente aprimorado por Hartigan e Wong (1979). K-Means divide os dados em 'k' grupos, sendo 'k' um valor definido pelo usuário. Essa abordagem foi aplicada com sucesso em vários estudos para classificar padrões meteorológicos e de circulação relacionados a fenômenos como precipitação intensa na Península Ibérica Nordeste (Jiménez et al., 2009), na Argentina (Bettolli et al., 2010), no Japão (Nguyen-Le et al., 2017), na Tailândia (Nguyen-Le e Yamada, 2019), bem como tempestades de poeira na China (Yi et al., 2021), e variabilidade da precipitação na Índia (Neal et al., 2019). Além desses estudos, o uso do K-Means permitiu classificar WPs associados a extremos de onda na costa leste da África do Sul Pringle et al. (2014), no Oeste da Irlanda e Noroeste da Espanha Camus et al. (2014), na costa norte da Espanha Rueda et al. (2016), na costa do Uruguai Solari e Alonso (2017), em toda a costa da Itália De Leo et al. (2020), e na costa Sudeste do Brasil Sondermann et al. (2023).

Com isso, o foco deste trabalho é a relação entre padrões meteorológicos e eventos extremos de ondas na região Sul e Sudeste do Brasil, entre 1993 e 2017, utilizando dados de reanálise do oceano e da atmosfera. Para tal, foi adotada a classificação de padrões atmosféricos com a técnica de aprendizado não-supervisionado de máquina K-Means. Os eventos extremos são selecionados a partir dos dados que excedem o percentil 99 em 3 pontos associados às boias meteoceanográfica do PNBOIA: Rio Grande, Santos e Vitória. Feito isso, é inicializado o cálculo dos clusters, convergindo nos WP que foram identificados

e apresentados nesse trabalho. Por fim, são discutidos os WP associados a extremos de onda nesses 3 pontos, bem como a evolução temporal e o campo médio de onda associado.

1.1 Área de Estudo

O litoral brasileiro é marcado pela presença de diversas bacias sedimentares que são palco para intensas atividades de exploração de petróleo e gás natural. A região Sudeste do país destaca-se com bacias como Santos, Campos e Espírito Santo, sendo estas as principais produtoras de petróleo no Brasil. Estas áreas *offshore*, ilustradas na Figura 1.1, são essenciais para a economia nacional, representando um setor estratégico na produção de energia. O Brasil conta ainda com uma série de portos que desempenham um papel crucial na economia, particularmente no Sul e Sudeste, onde se observa uma concentração intensa do comércio marítimo do país. Estes portos, como ilustrados na Figura 1.1, não apenas atuam como hubs para exportação de uma ampla gama de produtos, mas também são infraestruturas-chave de apoio às operações *offshore* de óleo e gás. Além desses setores, há muitos recursos pesqueiros nos litorais Sul e Sudeste do Brasil, o que faz com que a pesca seja importante para a economia regional e nacional.

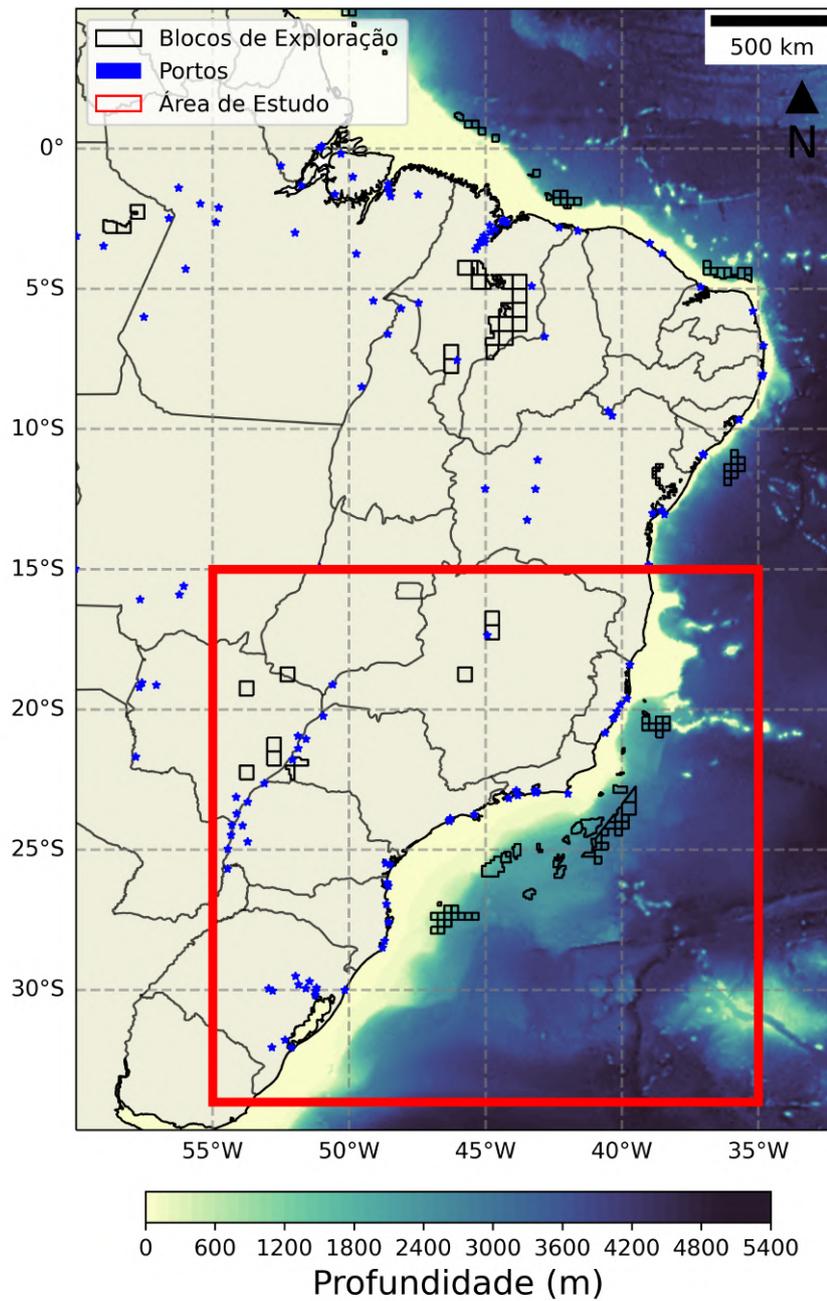


Figura 1.1: Portos do Brasil e Blocos exploratórios de óleo e gás. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes e Agência Nacional de Águas (2000); Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (2021).

1.2 Objetivo Geral

De acordo com a breve exposição apresentada, o objetivo geral deste estudo é classificar os diferentes padrões atmosféricos associados à eventos extremos de onda no Sul e Sudeste do Brasil. Para alcançar este propósito, foram estipuladas as etapas abaixo listadas:

1. Validar os dados das reanálises do WAVERYS com dados observados;
2. Processar esses dados para uso no algoritmo;
3. Aplicar método de classificação objetiva baseado em técnicas de *Machine Learning* (K-Means);
4. Identificar os *Weather Patterns* associados a eventos de extremo de onda em Rio Grande, Santos e Vitória.
5. Verificar as similaridades entre os distintos padrões para cada região.
6. Correlacionar os WPs com estudos de caso ou padrões identificados na literatura por outros autores
7. Discutir os campos médios de onda associado aos WPs encontrados.
8. Avaliar a direção de onda nos pontos escolhidos para detecção do extremo e correlacionar com os WPs encontrados.
9. Investigar a evolução típica desses WPs, estudando as 24 e 48 horas antes do evento ser detectado.

Revisão Bibliográfica

2.1 Ondas e situações sinóticas no Atlântico Sul

Sistemas meteorológicos de alta intensidade podem promover maiores agitações no oceano, gerando também ondas de alta energia, as quais podem causar danos na costa e nas operações *offshore*. Ciclones extra-tropicais são considerados fenômenos de alta intensidade que pode gerar ondas significativas nas regiões adjacentes. De modo pioneiro, Gan et al. (1991) identificaram duas regiões de ciclogênese na América do Sul: uma na Argentina (42.5 °S e 62.5 °W) relacionada à instabilidade baroclínica dos ventos de oeste e uma outra no Uruguai (31.5 °S e 55°W) associado à instabilidade baroclínica que ocorre devido à presença dos Andes. Posteriormente, Reboita et al. (2010) identificaram uma terceira região de ciclogênese, na porção Sul-Sudeste do Brasil (entre 20 °S e 35°S), exemplificadas na Figura 2.1.

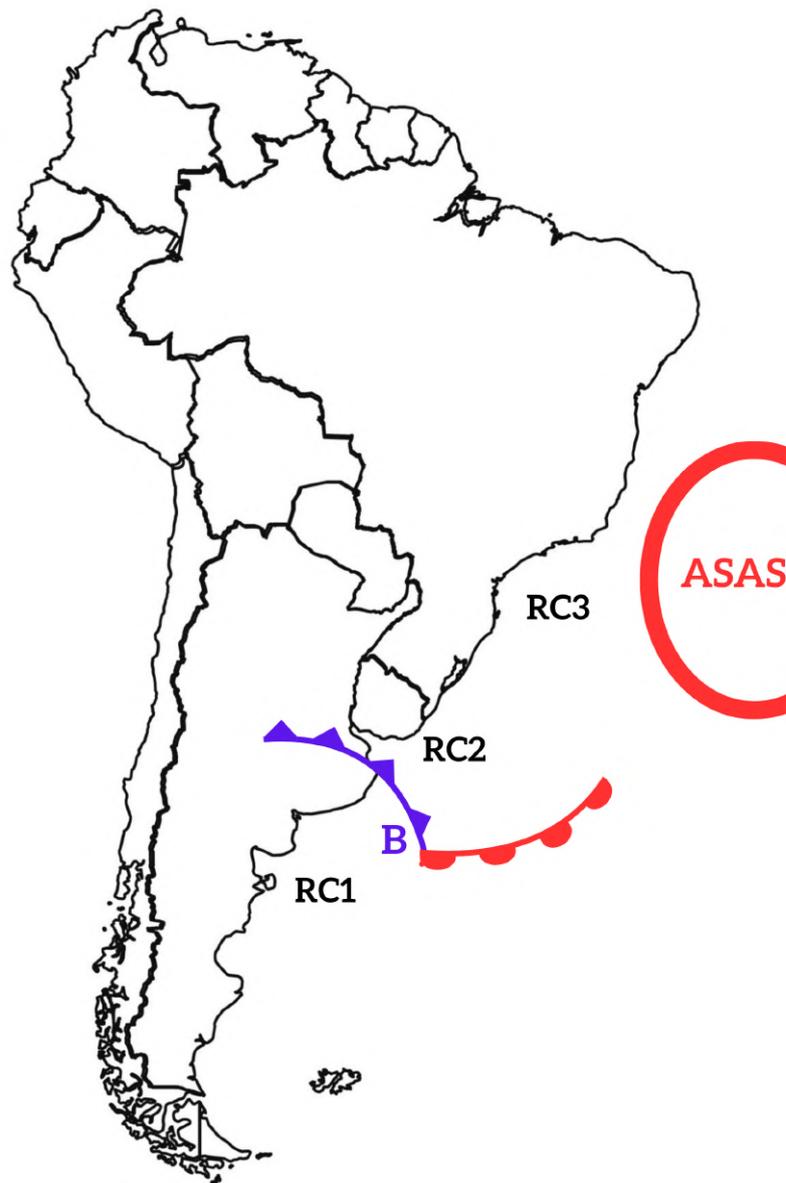


Figura 2.1: Exemplo figurativo das principais regiões de ciclogênese do sudoeste do Atlântico Sul, Frente fria e baixa pressão, bem como a ASAS.

Gan (1992) analisando 10 anos de dados (1979 a 1988) identificou eventos intensos associados à ocorrência de Ciclones Extra-tropicais no Atlântico Sul. Foi encontrado que a maioria dos eventos ocorreram no inverno (8 eventos), seguido do outono (6), primavera (4) e verão (3). Calliari et al. (1998) apresenta que a ciclogênese em latitudes médias, com centros de baixa pressão, contribui para a intensificação das tempestades da região central do Atlântico Sul, causando marés meteorológicas (*storm surges*) e ressacas (*storm waves*).

Os principais mecanismos que regulam as marés meteorológicas são as mudanças na

pressão atmosférica e a troca de momentum entre o vento e a superfície do mar. Em geral, os efeitos associados à pressão atmosférica é menor que 10% do total, sendo assim, o cisalhamento do vento na superfície do mar é o principal componente Marone e De Camargo (1994). Além disso, o aumento no nível do mar pode ser ainda maior quando há a presença de ondas de plataforma e o acúmulo de água devido aos processos de quebra de ondas na zona de arrebentação, conhecido como *Wave set up* (Marone e De Camargo, 1994).

Em um estudo realizado por Parise et al. (2009), com observações sinóticas das condições meteorológicas e elevação do nível do mar, foi mostrado que os eventos de maior elevação do nível do mar resultaram da ação dos ventos de sudoeste (SW) que escoam paralelamente à orientação da linha de costa (NE-SW). Isso pode ser explicado pelo efeito de Coriolis, que gera o transporte de Ekman médio a 90° à esquerda do vento em superfície no Hemisfério Sul, promovendo essa elevação do nível do mar na costa. O monitoramento realizado por Saraiva (2003) indicou que todas as ocorrências de marés meteorológicas estavam associadas a ciclones extratropicais.

O trabalho realizado por Melo et al. (2010) visou reconstituir o estado do mar num ponto ao largo de Rio Grande por um período de 30 anos, com o uso do modelo WAVEWATCHIII (WW3). Foram identificados extremos de altura significativa de onda para os valores que excedem 6 m. Foram analisadas as condições meteorológicas associadas aos 5 eventos mais intensos reconstruídos pelo modelo. Os mapas de pressão atmosférica dos eventos extremos mostram que todos foram gerados pelo mesmo tipo de sistema meteorológico, sendo esse representado pela passagem de intensos ciclones extratropicais pela região oceânica adjacente à costa do extremo sul do Brasil/Uruguai, entre $30-40^\circ\text{S}$. Vale ressaltar que em todos os 5 casos, havia a presença de um centro de alta pressão a oeste do ciclone, causando intensos gradientes de pressão no flanco oeste do mesmo e promovendo fortes ventos do quadrante sul. O mesmo foi encontrado por Romeu et al. (2015) em um estudo em que também foi utilizando o Wave Watch III.

Ainda nesse contexto, o estudo realizado por Machado et al. (2010) visou estudar os processos erosivos, nas praias arenosas do sul do Brasil, provocados por ondas expressivas (6 m de altura de onda), que acompanham situações sinóticas extremas. Para isso, foram utilizados dados de altura significativa de onda do WW3, forçado pelo vento no nível de 995hPa da Reanálise I do *National Center for Environmental Prediction* do *National Centers for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR) no período de 1979 a 2008. Neste trabalho,

foram encontrados 40 eventos extremos, sendo estes associados a 4 padrões de situação sinótica. Os padrões 2 e 3 representam 80% dos casos, sendo o padrão 2 a ciclogênese na costa sul uruguaia com deslocamento para leste e trajetória entre 28°S e 43°S; e o padrão 3 a ciclogênese na costa sul do Uruguai com deslocamento para sudeste e trajetória entre 32°S e 57,5°S. O padrão 2 está associado à maior erosão da costa enquanto o padrão 3 é responsável por maior elevação no nível do mar. O padrão 1 é correspondente a casos de ciclones extratropicais com ciclogênese na costa sul da Argentina e deslocamento para leste, registrando apenas 4 casos. Por fim, o padrão 4 é um centro de alta pressão que gera ventos de leste em direção a costa do Rio Grande do Sul. Neste mesmo trabalho de Machado et al. (2010) foram feitos estudos de caso para os dias em que ocorreram eventos extremos de elevação do nível do mar, para que fossem avaliados os cenários meteorológicos e a resposta em termos de erosão das praias. Algumas das condições meteorológicas estudadas pelo autor, dos dias em que ocorreram os extremos são dispostas na Figura 2.2.

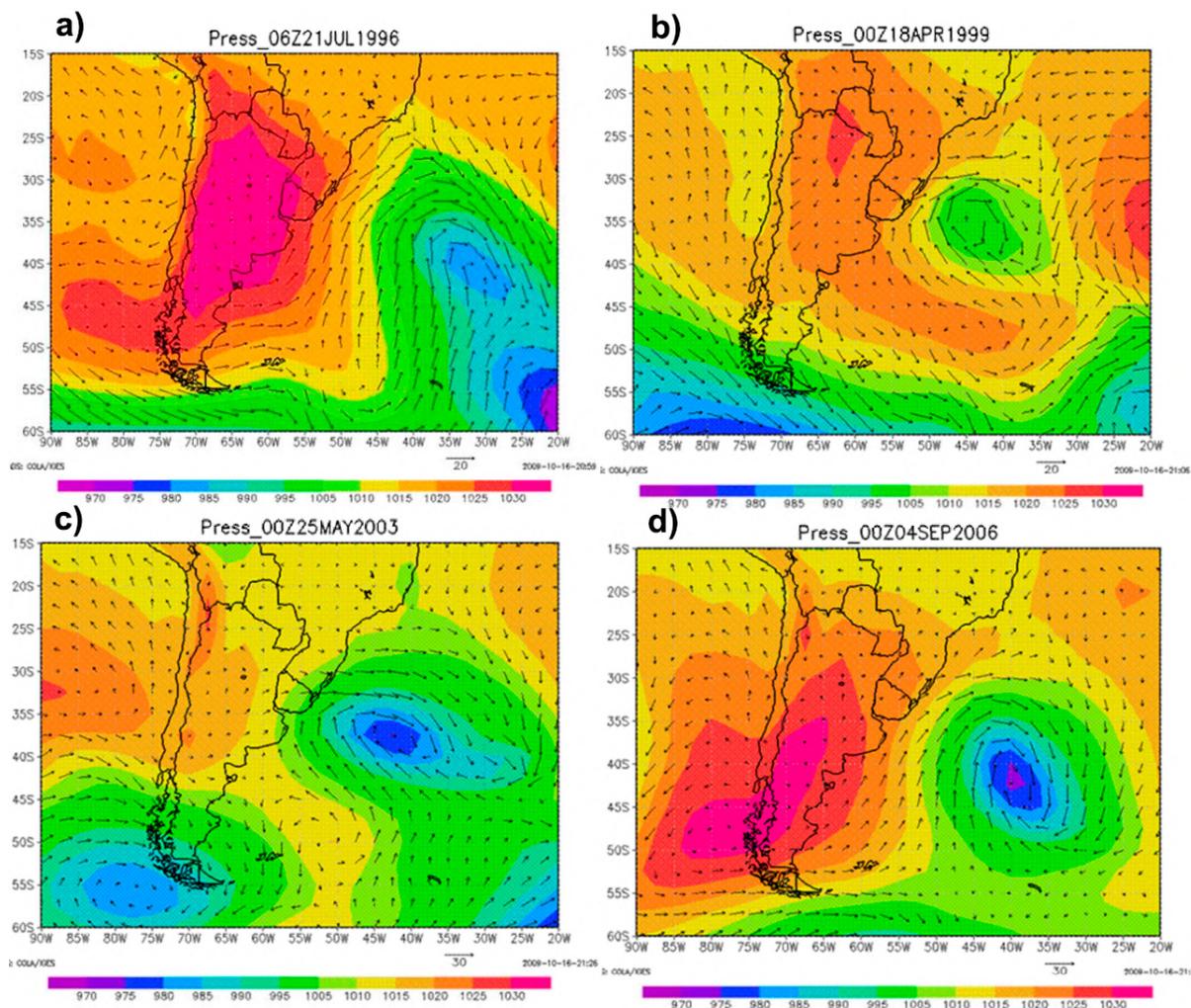


Figura 2.2: Situações sinóticas para os dias a) 06Z 21/06/1996; b) 00Z 18/04/1999; c) 00Z 25/05/2003 d) 00Z 04/07/2006, em que ocorreram eventos de erosão costeira. (Fonte: Adaptado de Machado et al. (2010))

O evento extremo que ocorreu em 21 de julho de 1996 (Figura 2.2-a) apresentou dois ciclones extratropicais paralelos um ao outro, representando os Padrões I e II. Devido ao seu trajeto para o leste e à subsequente presença de um sistema de alta pressão em sua retaguarda, uma extensa pista de vento sudoeste com mais de 3000 km foi formada sobre o Atlântico Sul, ao largo da costa sul-americana. Na Figura 2.2-b é representada a condição meteorológica do dia 18 de abril de 1999, em que o ciclone formado na costa sudoeste da América do Sul, ficou em laço, sem se mover muito para frente. Essa única tempestade foi capaz de destruir a maioria das estruturas de proteção costeira, incluindo 20% de todas as casas à beira-mar na Praia do Hermegildo. As Figuras 2.2-c e 2.2-d são outros dois casos de ciclones extratropicais que causaram danos e erosão à estruturas costeiras, sendo suas

trajetórias correspondentes com os padrões II e III.

Campos (2009) fez uma análise dos extremos de onda na Bacia de Campos e as condições atmosféricas associadas. Para isso, utilizou dados de boias e realizou a modelagem com WW3 do período entre 1986 ao final de 2005, encontrando 42 registros de extremo em um ponto. Desses 42 registros, 23 (54,8%) são associados a ciclones, 10 (23,8%) a anticiclones e 9 (21,4%) a cavados. Quanto a ocorrência dos casos associados a ciclones, a maior parte ocorre no outono e no inverno, seguido da primavera e do verão.

O trabalho de Pianca et al. (2010) representou uma análise do clima de ondas ao largo da costa brasileira, usando dados de reanálise do modelo operacional NWW3 entre Janeiro de 1997 e Dezembro de 2007. Esta investigação foi crucial, visto que as informações observacionais sobre o regime de ondas na região são limitadas. Seis setores ao longo da plataforma continental brasileira foram definidos para análise, dentre os quais W1 (Sul), W2 (Sudeste) e W3 (Central) apresentaram os regimes de ondas mais influenciados pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pela passagem de frentes frias sinóticas. Especificamente, foi destacado que as ondas mais energéticas, provenientes do sul, são geradas por ventos intensos associados à passagem de frentes frias, impactando majoritariamente as regiões sul e sudeste do Brasil. No setor central (W3), a principal circulação atmosférica é determinada pela célula anti-ciclônica do Atlântico Sul, com variações sazonais sutis, mas ainda assim apresentando ondas mais energéticas nos meses de inverno devido ao avanço das frentes polares.

Nogueira (2014) forneceu uma análise detalhada da climatologia de ondas na Bacia do Espírito Santo, no Atlântico Sul, com base em dados reconstituídos de 15 anos (1996-2010) obtidos através do modelo numérico WW3. O estudo identificou três categorias dominantes de estado de mar: Situação de Bom Tempo, predominantemente influenciada pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS); Bom Tempo com swell distante; e Situação de Mau Tempo, associada a sistemas frontais. Notavelmente, a pesquisa salientou que a Bacia do Espírito Santo apresenta características distintas das Bacias de Campos e Santos, principalmente devido à sua localização geográfica mais ao norte, tornando-a menos impactada por sistemas de Mau Tempo provenientes de SW.

Castro Firmino e Rosa Bulhões (2020) analisaram a energia das ondas em áreas de erosão costeira no litoral do Espírito Santo (ES), Brasil, usando dados de boia e modelo. O estudo revelou que sistemas ciclônicos geram as ondas mais energéticas de SW, mas o

litoral do ES é majoritariamente protegido delas. Além disso, os eventos extremos também ocorrem sob condições de ondas de SE associadas às altas pós-frontais conforme o ciclone se afasta da costa e o sistema de alta passa a dominar, flexionando as ondas de SW para SE/E.

Em um estudo mais recente, Machado et al. (2019) avaliaram os padrões atmosféricos favoráveis por ocasionar ressacas na costa S/SE do Brasil durante os El-Niño de 2015 e 2016. Os eventos foram contabilizados separadamente em cada uma das regiões de estudo, mas padrões atmosféricos apresentados são associados às ressacas que ocorreram simultaneamente nas duas regiões. Notavelmente, os meses de março a junho, correspondentes ao outono e início de inverno, apresentaram a maior frequência de ressacas em ambas as áreas. Em contrapartida, dezembro e fevereiro foram os meses com menor incidência. Os padrões atmosféricos associados à ocorrência de ressacas na região incluíram sistemas de baixa pressão sobre o oceano com alta pressão posterior, e alta pressão pós-frontal entre o litoral do Uruguai e da Argentina. Além disso, o estudo destacou a significativa influência da maré astronômica nos eventos, com 75% das ressacas ocorrendo sob a maré de sizígia. Em particular, ressacas com as maiores alturas de ondas foram registradas nos meses de outono e inverno, coincidindo com a maré de sizígia.

Gramcianinov et al. (2020a) utilizaram *hindcast* do WW3 para altura de onda e reanalises do NCEP/CFSR para as condições atmosféricas, no intuito de detectar e rastrear a trajetória de ciclones que geraram extremos de onda na costa S e SE do Brasil. Os resultados confirmaram que as ondas extremas estão associadas a ciclones gerados entre 30°S e 35°S sobre o continente. Uma observação crucial foi a pista de vento persistente no setor frio do ciclone, em particular os ventos de sudoeste ao longo da costa, considerados como os principais impulsionadores das ondas extremas na região. Gramcianinov et al. (2020a) destacaram também que posição do anticiclone (alta pós-frontal) em relação ao centro do ciclone desempenha um papel importante nas ondas extremas de duas formas. Primeiramente devido ao aumento do gradiente de pressão horizontal e, conseqüentemente, da velocidade do vento de superfície, fazendo com que as pistas de vento sejam mais intensas nessa região do ciclone; e também, afetando a velocidade de deslocamento do ciclone, que determina o posicionamento da pista de vento e, conseqüentemente, a geração de ondas.

2.2 Métodos de determinação de padrões

Uma aproximação mais holística para classificação do tempo meteorológico ficou mais evidente durante os anos 40 e 50, com a criação do conceito "*Grosswetter*", no qual está relacionado com tipos de condições meteorológicas de superfície, e suas frequências são determinadas por dias ou grupos de dias (Baur, 1951). Trabalhos similares foram realizados na época, fortalecendo o conceito de tipos e padrões de tempos meteorológicos (Lamb, 1950; Wallén e Flohn, 1956). Os primeiros estudos contavam com a experiência do pesquisador a respeito da região em que vivia, justamente por não haver ainda muitos dados históricos disponíveis, o que tornava um desafio para o avanço dos estudos no âmbito dos *Weather Types*.

Baur (1951) menciona os primórdios do que chamamos de *Weather Types*, com um primeiro raciocínio de que o inverno em regiões temperadas, quando se inicia 2 ° C mais quente que o esperado, poderia apresentar chuva em vez de neve. Porém, observações e análises como essa eram insuficientes para definir realmente como *Weather Types* ou *Weather Patterns*. Para que fossem classificados os padrões meteorológicos, era necessário estabelecer estatisticamente, a partir de extensos dados observacionais, se as probabilidades de ocorrência de certo fenômenos na atmosfera estariam ou não relacionados com a climatologia sinótica.

As classificações em meteorologia e climatologia, eram utilizadas principalmente para embasar melhor a previsão do tempo e, com isso, abrangem uma longa história de aplicações na climatologia. Em paralelo, essas classificações permitem aferir quanto à sinergia entre os padrões e a qualidade do ar (Kalkstein e Corrigan, 1986; Davis, 1991), distribuição de precipitação (Hay et al., 1991), problemas de saúde humana (Kalkstein, 1991), mudanças climáticas de longo prazo (Kalkstein et al., 1990; Kalkstein, 1993) e variações no rendimento agrícola (Brian Dilley, 1992).

Anteriormente, eram utilizados métodos subjetivos, que contavam com a experiência do meteorologista para classificação. Com o avanço da tecnologia, métodos mais objetivos foram desenvolvidos, estes envolvendo computação e inteligência artificial aplicadas a grandes quantidades de dados. A relevância das classificações é notada também em outros diversos campos da ciência, com uma séries de propósitos para a atualidade (Huth et al., 2008).

Cada classificação consistia em duas etapas principais: definição dos tipos de tempo e a atribuição de casos individuais a essas padrões. No sentido da definição de padrões meteorológicos, há uma distinção principal entre as abordagens: os tipos são definidos antes da fase de classificação; os tipos são derivados e evoluem durante o próprio processo de classificação. A priori, a definição de tipos pode ser guiada por (i) conhecimento avançado e especializado, como no catálogo de Hess-Brezowsky (Hess e Brezowsky, 1952) ou (ii) considerações físicas ou geométricas, como a intensidade e direção do escoamento do vento, grau de ciclonicidade, como no catálogo de Lamb (1972). Podemos nos referir a essas técnicas como subjetivas, pois essas classificações exigem escolhas que são arbitrárias e vão depender do meteorologista que estiver classificando.

A definição dos padrões orientada por métodos é guiada por critérios mais objetivos, que dependem do método e incluem uma medida de similaridade, a qual permite maximizar ou minimizar, dentro da análise de clusters, a similaridade do tipo. Além disso, há a maximização da variância, que consiste em uma classificação baseada em análise de componentes principais. Apesar desses métodos serem considerados objetivos, há subjetividade nas decisões de escolha da medida de similaridade e o número de classes. Nesse contexto, as classificações podem ser (i) subjetivas, consistindo numa atribuição visual de padrões individuais por um especialista treinado, e (ii) numéricas, seja baseada na minimização da distância dos padrões definidos previamente ou sendo um processo mais iterativo dentro de um algoritmo numérico (Huth et al., 2008). No que se refere à abordagem das duas etapas de classificação, obtêm-se três grandes grupos de classificações, os grupos das classificações subjetivas, híbridas e objetivas.

As classificações subjetivas envolvem definição dos padrões meteorológicos e a atribuição de casos individuais aos padrões de forma manual. Os catálogos de Hess e Brezowsky (1952) e Lamb (1972), citados anteriormente, são exemplos de métodos subjetivos de classificação, sendo o catálogo de Hess-Brezowsky voltado para os sistemas sinóticos da Europa com foco na Alemanha, enquanto o catálogo de Lamb é voltado para as Ilhas Britânicas e conta com uma análise regional. Outras técnicas subjetivas, que tiveram relevância são revisitadas por Huth et al. (2008), com destaque para catálogos e técnicas desenvolvidos na Rússia, Suíça e na antiga União Soviética.

As classificações híbridas são assim denominadas pelo fato de terem, a priori, seus padrões meteorológicos definidos subjetivamente enquanto os casos são atribuídos por

critérios objetivos. Algumas abordagens utilizadas para classificar casos com padrões pré-definidos são definição de critérios de limiar, usando uma medida de distância e meios de inteligência artificial. Exemplos de classificações híbridas são apresentadas implementando critérios objetivos nos catálogos subjetivos tradicionais, como de Hess-Brezowsky ou Lamb (Jones et al., 1993; Frakes e Yarnal, 1997). A classificação mista desenvolvida por Beck (2000) e Beck et al. (2007), baseia-se na semelhança (em termos de correlações de padrões) de padrões meteorológicos diários com três padrões de escoamentos gerais: zonal, meridional e ciclônico. Usando a distância euclidiana como medida de dissimilaridade, a classificação resulta em dois padrões centrais de baixa/alta pressão e oito tipos direcionais diferentes, que podem ser divididos em um total de 18 grupos (Beck et al., 2007).

Classificações objetivas consistem na definição dos padrões e a atribuição de casos através de procedimentos numéricos, assistidos por computadores e, geralmente, automatizados. Uma revisão extensa, envolvendo o estudo de padrões de circulação baseado apenas na altura geopotencial, realizada por Huth (1996), também avalia o desempenho dessas técnicas objetivas e são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Avaliação dos Métodos de Classificação Objetivos baseados nos resultados de Huth (1996).

Método	Consistência	Separabilidade	Estabilidade temporal e espacial	Estrutura dos clusters	Reprodução dos tipos predefinidos
Correlação	Ruim	Bom	Ruim	<i>Snowballing</i>	Ruim
Soma-dos-quadrados	Ruim	Bom	Ruim	<i>Snowballing</i>	Ruim
Ligação Média	Excelente para definição	Bom	Muito Ruim	<i>Snowballing</i>	Moderado
k-means	Ruim	Muito Bom	Bom	De mesmo tamanho	Moderado
T-mode PCA de todos dados	Bom	Bom	Bom	Sem deficiência	Excelente
T-mode PCA das anomalias	Bom	Bom	Bom	Sem deficiência	Ruim

Essas técnicas de classificação objetiva se enquadram em diversas famílias maiores, que são brevemente caracterizadas a seguir. Os critérios para avaliação incluem: (a) consistência, ou seja, o grau em que as classificações baseadas em valores próximos de parâmetros definidos a priori concordam ou diferem; (b) separabilidade, ou seja, o grau de similaridade entre os casos dentro do mesmo cluster e a dissimilaridade entre os clusters; (c) estabilidade no tempo e espaço, ou seja, o grau de similaridade dos agrupamentos baseado em subamostragem temporal de dados e numa grade ligeiramente diferente; (d) estrutura da clusterização (agrupamento), ou seja, se o método tende a produzir uma estrutura tendenciosa; (e) reprodução de tipos predefinidos, os quais refletem a habilidade de um método detectar o que se conhece como base, a respeito da estrutura dos dados na

região estudada (Huth et al., 2008).

Métodos baseados em correlação utilizam como critério a semelhança entre os padrões. Isto é, a semelhança é expressa em termos de correlações ou soma dos quadrados das diferenças (Lund, 1963). A principal ideia desse método é que o padrão com o maior número de correlações com todos os outros padrões que excedem o limite é atribuído como o primeiro padrão (padrão chave dos dias), os padrões altamente correlacionados são classificados com ele, removidos do conjunto de dados, buscando o padrão com maior número de correlações acima do limiar com os demais padrões. O procedimento continua até que todos os dias sejam classificados ou o tamanho das classes fique abaixo de um valor pré-especificado.

O método das somas dos quadrados funciona de forma semelhante, são procurados os padrões com as somas dos quadrados das diferenças abaixo do limite pré-especificado. Esses métodos de correlação tendem a gerar muito grupos, sendo alguns com poucas amostras, além dos casos individuais não classificados.

A análise de clusters é um método matemático utilizados para gerar classificações (Kaufman e Rousseeuw, 1990) por isso é considerada uma abordagem natural para classificar os padrões de circulação e acaba sendo a mais utilizada. Há algoritmos de clusterização hierárquicos e não hierárquicos, os quais se diferem pela necessidade de definir a quantidade de clusters (centróides) antes da execução. Seu representante típico é a técnica k-means. A análise de cluster é frequentemente precedida por análise de componentes principais para remover a colinearidade das variáveis de entrada, uma vez que sua dependência linear pode afetar negativamente os resultados de um procedimento de clusterização, principalmente por dar peso excessivo às variáveis fortemente correlacionadas (Davis e Kalkstein, 1990; Fovell e Fovell, 1993).

Yiou e Nogaj (2004) investigaram a relação entre a circulação atmosférica e eventos climáticos extremos na região do Atlântico Norte-Europa, utilizaram dados diários de precipitação e temperatura do NCEP/NCAR de 1958 a 2003, focando em extremos baseados nos quantis superiores a 90% para precipitação e inferiores a 10% para temperatura como limiares e extremos baseados na duração, como períodos de seca. Para estudar a variabilidade da circulação atmosférica, os autores realizaram uma análise de funções ortogonais empíricas (EOF) nos dados diários de inverno, que serviu para reduzir o número de variáveis espaciais. Eles mantiveram os primeiros sete EOFs, que capturam 80% da variância total. Em seguida, aplicaram a técnica de clusterização k-means nas compo-

mentes principais (PCs) correspondentes, o que permitiu identificar os quatro regimes de circulação clássicos: NAO+ (Oscilação do Atlântico Norte positiva), NAO- (Oscilação do Atlântico Norte negativa), bloqueio escandinavo e crista do Atlântico. Para estabelecer conexões entre os regimes climáticos e o índice NAO, eles calcularam o número de dias por inverno gastos em cada regime, correlacionando os tempos de residência das fases NAO+ e NAO- com o índice NAO de inverno.

2.3 *Weather Patterns e Ondas*

Camus et al. (2014) empregou uma abordagem de *Weather Typing* para caracterizar o clima de ondas em diferentes escalas temporais. Em seu trabalho, são estudadas as ondas em dois pontos no Atlântico Norte: Oeste da Irlanda e Noroeste da Espanha. Com uso de K-Means para classificação dos *Weather Patterns*, pôde-se observar que os sistemas de baixa e alta pressão na atmosfera tem uma influência significativa na geração de ondas. O autor destaca 4 *Weather Patterns* que são responsáveis por gerar condições extremas de onda, sendo estes bem caracterizados pela combinação do sistema de alta e baixa pressão na atmosfera, reforçando a significância do gradiente de pressão entre o ciclone e a alta pressão, para geração de extremos.

A abordagem de Pringle et al. (2014) ressalta a importância de identificar padrões específicos de circulação atmosférica que influenciam os eventos extremos de ondas. Estes padrões, geralmente associados a anomalias de pressão atmosférica e sistemas meteorológicos, podem ser cruciais para prever e compreender os eventos de ondas extremas que impactam as zonas costeiras. Foi realizado um estudo de caso na costa leste da África do Sul, observou-se que os WPs mais frequentes são anomalias de baixa e alta pressão localizadas ao sul do país. Esse fenômeno pode ser diretamente atribuído à progressão de oeste para leste dos ciclones de médias latitudes, que são comuns nesta região. Estes ciclones desempenham um papel crucial na construção do clima de ondas ao longo da costa sul-africana. De acordo com Rossouw et al. (1982), eles são os principais contribuintes para o clima de ondas ao longo do litoral da África do Sul. Portanto, a influência desses ciclones de latitudes medias na dinâmica das ondas torna-se um fator determinante para compreender as condições marítimas e atmosféricas da região.

Solari e Alonso (2017) contribuíram significativamente para o campo da Análise de

Valor Extremo (*Extreme Value Analysis*), particularmente no contexto de dados meteorológicos. A pesquisa baseia-se na premissa de que os dados são independentes e homogêneos, sendo que historicamente a hipótese de independência tem sido mais estudada do que a de homogeneidade. Os métodos tradicionais, como análise direcional ou diferenciação baseada no tipo de processo gerador, como furacões e ciclones, têm sido utilizados para assegurar essa homogeneidade. No entanto, os autores introduziram uma abordagem inovadora usando metodologias de análise de cluster para identificar padrões de circulação atmosférica que resultam em condições extremas de onda. A aplicação desta metodologia para a costa do Atlântico Sul uruguaio revelou aspectos interessantes sobre os padrões de circulação atmosférica na região. Dois padrões principais foram identificados, com um terceiro emergindo em análises mais detalhadas. Estes padrões eram distintos em termos de pressão atmosférica e direção, e tiveram impactos mensuráveis nas condições extremas de onda observadas. O interessante dessa metodologia é diferenciar não apenas em termos da variável alvo - a altura significativa da onda - mas também em relação a covariáveis relevantes, como direção da onda ou nível do mar. Isto fornece uma compreensão mais profunda dos processos físicos que resultam nas condições extremas observadas.

De Leo et al. (2020) desenvolveram uma metodologia que emprega a técnica de agrupamento K-Means para classificar picos de altura de onda significativos com base nos padrões de circulação atmosférica que os precedem. Aplicando esta técnica à rede de boias da costa italiana, o estudo identificou WPs homogêneos relacionados a eventos extremos de onda. A metodologia permitiu uma categorização mais precisa dos eventos, relacionando-os a sistemas ciclônicos conhecidos que cruzam a bacia mediterrânea.

O estudo conduzido por Sondermann et al. (2023) investigou as condições atmosféricas que propiciam ressacas intensas na costa de São Paulo, Brasil, usando dados de reanálise ERA5 de maio entre 1981 e 2010. Com a técnica de K-means, três padrões atmosféricos predominantes foram identificados, todos relacionados a alturas de ondas significativas que excedem 2,5 metros. O primeiro padrão é marcado por um centro de baixa pressão próximo à costa, o segundo destaca-se por uma vasta área de ventos intensos sobre o oceano, enquanto o terceiro é caracterizado por ventos intensos do sudoeste. Além disso, observou-se uma tendência decadal positiva na frequência e intensidade das ressacas durante o período estudado. A identificação desses padrões é fundamental para aprimorar sistemas de alerta e medidas de adaptação na região costeira de São Paulo, especialmente diante

dos impactos crescentes das ressacas na infraestrutura local e na população.

Metodologia

Para este estudo, foi desenvolvido um algoritmo para detectar as condições sinóticas predominantes associadas a extremos de ondas em uma região específica. Neste algoritmo, o usuário pode inserir um percentil desejado e selecionar um ponto de interesse dentro de uma região. Em seguida, a série temporal da Altura Significativa da Onda (Hs) é obtida, e os dias que excedem o percentil inserido são destacados. Estes dias específicos são então utilizados para a extração de dados atmosféricos. Após isso, o Método do Cotovelo (*Elbow method*) (Figura 3.1, que foi idealizado por Thorndike (1953) para determinar o número ideal de clusters, é aplicado aos dados atmosféricos. Depois de identificado o número ótimo de clusters para a amostra, o algoritmo K-Means é implantado, auxiliando na determinação dos Padrões Sinóticos principais ligados a extremos de ondas. Uma representação esquemática deste processo é mostrada na Figura 3.2.

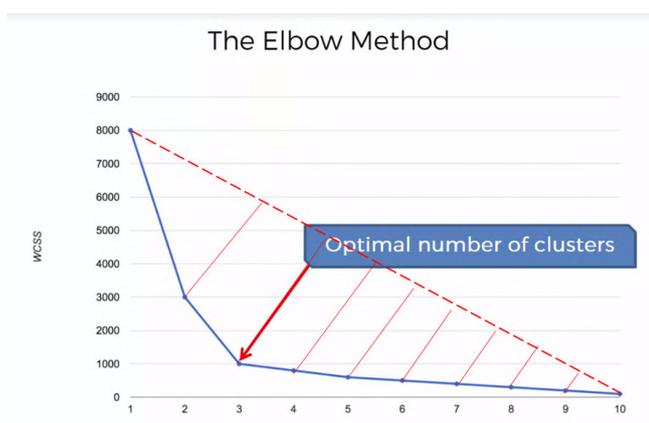


Figura 3.1: Exemplo do Elbow Method (Adaptado de "Finding Optimal Number of Clusters in K-means Through Elbow Method", por Asanka Perera, 2017. Fonte: LinkedIn.)

3.1 Seleção de Dados

Inicialmente, dados referentes à Hs e direção de pico foram recuperados do WAVERe-analYSis (WAVERYYS) ((*E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS)*, 2023; Law-Chune et al., 2021)), uma iniciativa do Serviço Núcleo Oceânico da Copernicus, da União Europeia. Este conjunto de dados apresenta um espaçamento de grade de $1/5^\circ$ e fornece informações a cada 3 horas. Os dados foram selecionados de 1 de janeiro de 1993 a 31 de dezembro de 2017. Médias diárias para ambas as métricas de altura de onda e direção foram calculadas. Além disso, para os dados atmosféricos, foi utilizada a quinta geração de reanálise do *European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)* para o clima e tempo globais, denominada ERA5 ((Hersbach et al., 2023)), com um espaçamento de grade de $0,25^\circ$ e intervalo de tempo de 3 horas, abrangendo os componentes do vento (u e v) e a altura geopotencial no nível de 1000 hPa. Para a implementação do nosso método, médias diárias foram calculadas.

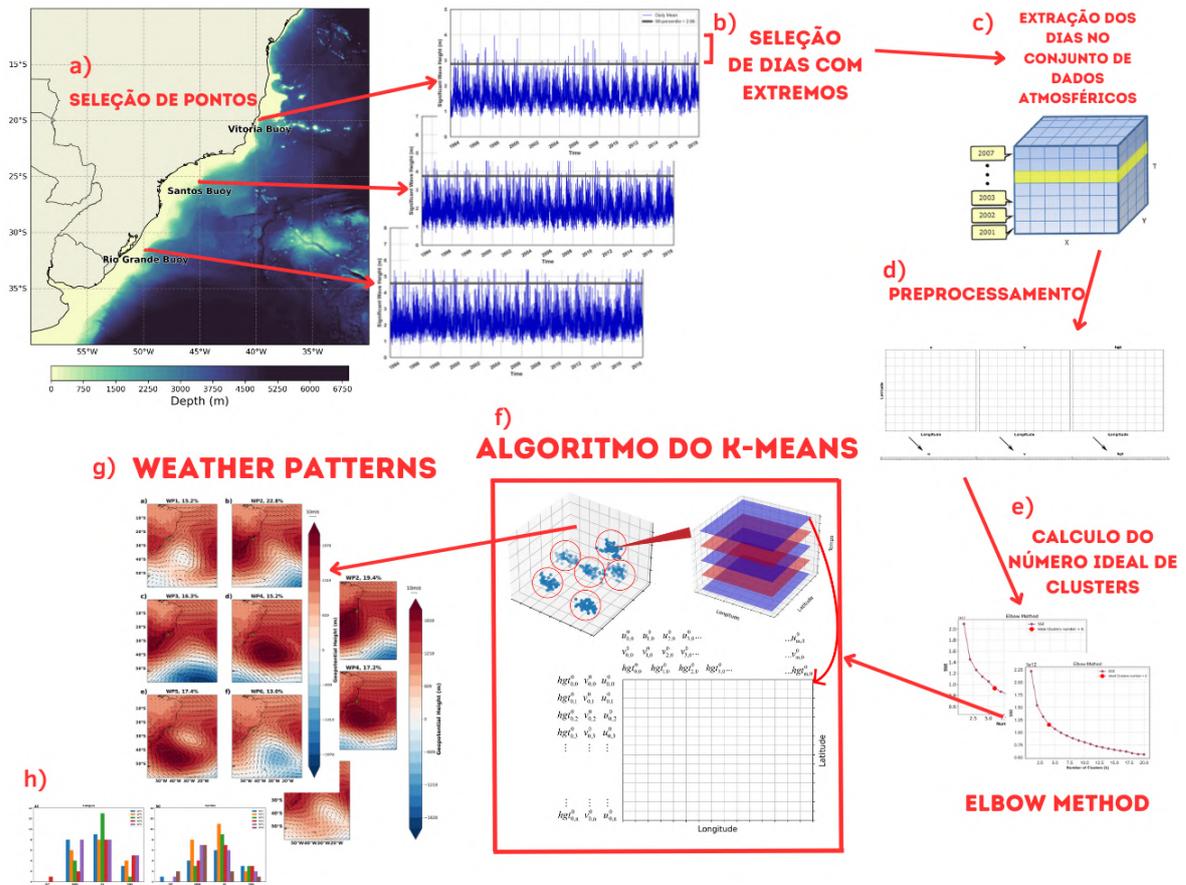


Figura 3.2: Etapas metodológicas para o algoritmo K-Means: a) Seleção dos pontos; b) Seleção dos dias com extremo; c) Extração dos dias no conjunto de dados atmosféricos; d) Preprocessamento; e) Cálculo do número ideal de clusters; f) Inicialização do algoritmo; g) Obtenção dos Weather Patterns; h) Distribuição de frequência dos eventos.

3.2 Critério Para Extremos

A identificação e análise de eventos extremos são fundamentais no estudo da dinâmica oceânica e atmosférica, especialmente em aplicações relacionadas a riscos naturais e gestão costeira (Ghil et al., 2011). A utilização de percentis para definir extremos é uma prática consolidada na literatura, pois permite uma comparação objetiva entre diferentes localidades e períodos de tempo, normalizando a frequência dos eventos extremos em relação à distribuição específica de cada conjunto de dados (Weisse e Günther, 2007; Campos et al., 2018; De Leo et al., 2020; Gramcianinov et al., 2020b). Esta abordagem é particularmente útil em estudos onde a homogeneidade e a comparabilidade dos eventos ao longo de uma ampla área são necessárias. Em consonância com este método, Gramcianinov et al. (2023)

empregaram a técnica do percentil para a seleção de eventos extremos, o que reitera a relevância e a adequação do uso de percentis na análise de extremos em estudos meteorológicos e oceanográficos. A aplicação deste método proporciona uma base estatística robusta para a definição de extremos, permitindo que a variabilidade interanual e sazonal seja considerada, e que as condições extremas sejam comparáveis entre diferentes regiões.

3.3 O Algoritmo K-Means

O algoritmo K-Means MacQueen et al. (1967) é um método iterativo de clusterização que particiona um conjunto de dados em K clusters distintos, onde cada ponto de dado pertence ao cluster com a média (centróide) mais próxima. A escolha de K , o número de clusters, é importante e baseada em cálculos para obtenção de valores ideais, que expliquem o máximo da variabilidade. A teoria inicial do K-Means foi melhorada por Arthur e Vassilvitskii (2007), com a criação do K-Means++, que é utilizado para inicializações no K-Means do pacote Python "*Scikit-Learn*" (Pedregosa et al., 2011), utilizado no presente estudo.

Em vez de escolher todos os centróides aleatoriamente, o K-means++ seleciona o primeiro centróide aleatoriamente e, em seguida, escolhe os centróides subsequentes com base em uma distribuição de probabilidade proporcional à distância quadrada dos pontos de dados para o centróide mais próximo já escolhido. Isso aumenta a chance de que os centróides iniciais estejam espalhados pelos dados, reduzindo a probabilidade de convergência para um ótimo local.

A operação do K-Means pode ser dividida em várias etapas fundamentais, detalhadas a seguir.

3.3.1 Inicialização

Na inicialização, os centróides iniciais $\{c_1, c_2, \dots, c_K\}$ são escolhidos aleatoriamente dentre os pontos de dados ou utilizando métodos mais sofisticados como o K-Means++. Este passo é crítico pois os centróides iniciais têm um impacto significativo na convergência do algoritmo e na qualidade dos clusters finais.

No caso do K-Means++, os centróides subsequentes são escolhidos através da seguinte equação:

$$P(x_i) = \frac{D(x_i)^2}{\sum_{j=1}^n D(x_j)^2} \quad (3.1)$$

onde $P(x_i)$ é a probabilidade do ponto x_i ser escolhido como o próximo centróide. $D(x_i)$ é a distância do ponto x_i ao centróide mais próximo já escolhido e $\sum_{j=1}^n D(x_j)^2$ é o somatório dos quadrados das distâncias de todos os pontos x_j (com j variando de 1 a n , onde n é o número total de pontos no conjunto de dados) aos seus respectivos centróides mais próximos já escolhidos. Serve como um normalizador para as probabilidades.

3.3.2 Atribuição de Clusters

Em cada iteração, os pontos são atribuídos ao cluster cujo centróide é o mais próximo. Matematicamente, este processo pode ser descrito pela minimização da soma das distâncias quadráticas de cada ponto x_i ao centróide c_j do cluster j , o que pode ser representado pela seguinte fórmula:

$$\min_{c_1, \dots, c_K} \sum_{i=1}^n \min_{j \in \{1, \dots, K\}} \|x_i - c_j\|^2 \quad (3.2)$$

onde $\|x_i - c_j\|$ é a distância euclidiana entre um ponto de dado x_i e um centróide c_j . No caso, o quadrado da distância euclidiana aumenta o peso de distâncias maiores.

3.3.3 Atualização dos centróides

Após a atribuição, os centróides são recalculados como a média dos pontos que foram atribuídos a cada cluster. Esse cálculo é realizado até a convergência, que no algoritmo o usuário pode definir como o máximo de iterações. Ao final dessas atualizações, o algoritmo retorna os clusters finais. A fórmula para o cálculo do novo centróide c_j do cluster j é:

$$c_j = \frac{1}{|S_j|} \sum_{x_i \in S_j} x_i \quad (3.3)$$

onde S_j é o conjunto de todos os pontos de dados atribuídos ao cluster j .

3.3.4 Convergência

O algoritmo itera entre as etapas de atribuição de clusters e atualização de centróides até que um critério de parada seja satisfeito. Geralmente, o algoritmo termina quando os

centróides não se movem significativamente entre as iterações consecutivas ou quando é atingido um número máximo de iterações.

Para esse estudo, definimos as inicializações como 10, ou seja, o algoritmo faz teste com 10 centróides iniciais e escolhe o melhor. Após isso, foram definidas o máximo de iterações como 300, fazendo com que a distância euclidiana entre a melhor inicialização dos centróides seja calculada 300 vezes até a convergência.

Para confirmar que a convergência está estável, o algoritmo foi executado 3 vezes e foi feita uma avaliação visual se a porcentagem de distribuição dos cluster e o campo sinótico estava se mantendo nas 3 execuções.

Referências para aprofundamento nestes tópicos incluem o trabalho clássico de MacQueen et al. (1967) sobre o K-Means e o artigo de Arthur e Vassilvitskii (2007) que introduziu o K-Means++. Estes podem oferecer uma visão aprofundada da teoria e das implicações práticas do algoritmo K-Means e suas variações.

3.3.5 Escolha do Número de Clusters

Antes de aplicar o algoritmo K-Means, utilizamos o Método do Cotovelo (*Elbow Method*), uma técnica projetada para determinar o número ótimo de clusters. Este método busca um equilíbrio entre a variância explicada e o número de clusters, identificando o ponto de inflexão na diminuição da variância explicada. Especificamente, ao plotar a variância explicada contra o número de clusters, o ponto onde a taxa de melhoria (redução da soma dos quadrados dentro dos clusters) começa a diminuir notavelmente no gráfico, sinaliza a contagem ideal de clusters (Thorndike, 1953). Em outras palavras, é um ponto ótimo, em que a inclusão de mais clusters não resulta em uma melhoria significativa na variância total explicada, sugerindo que o modelo pode estar se tornando excessivamente complexo sem um ganho proporcional na performance de clustering.

3.3.6 Interpretação e Visualização do K-Means

Uma vez rotuladas as datas correspondentes aos extremos da altura significativa da onda, os dados atmosféricos foram processados e reformatados para serem compatíveis com o algoritmo K-Means. Isso efetivamente reduz a componente temporal, com k padrões contabilizando toda a variabilidade baseada no tempo. Para este processamento, a grade correspondente a cada variável para cada dia é transformada em vetores dentro de um

conjunto de dados unificado.

Estruturar os dados desta maneira é importante, pois permite que o algoritmo K-Means processe os dados considerando variações temporais em vez de espaciais. Desta forma, garantimos que N anos de condições atmosféricas sejam representados por M número de clusters. Assim, a clusterização realizada pelo algoritmo é baseada nas tendências temporais das variáveis atmosféricas, e não em suas distribuições espaciais.

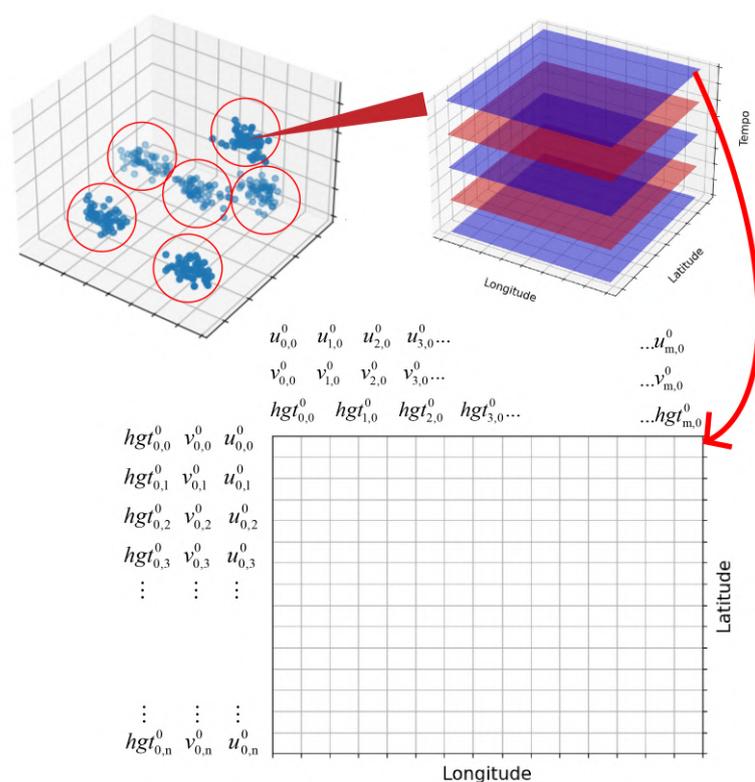


Figura 3.3: Etapas metodológicas para o algoritmo K-Means. Cada ponto de dados na figura representa as condições atmosféricas (incorporando u, v e altura geopotencial) para cada dia selecionado. O cluster central simboliza a condição média de todos os dias que têm a menor distância euclidiana do centro. Cada ponto da grade na matriz é transformado para criar um vetor singular.

Para o pre-processamento desses dados, foi preciso reestruturá-los em um único vetor com informações de cada ponto de grade para u, v e altura geopotencial. Para essa reestruturação, os dados que antes eram uma matriz, passam a ser vetores unidimensionais, sendo que o produto entre a quantidade de pontos zonais e meridionais representa um único tempo. Feito isso, temos uma única matriz, unidimensional, com informações de u, v e geopotencial ao longo do tempo. Para melhor entendimento, se tivermos uma grade

100x100, para 365 dias, e 3 variáveis (u, v e altura geopotencial), o dado preprocessado será um vetor unidimensional de tamanho 100x100x3 por 365, ou seja, terá 30000 valores para cada dia. Cada um desses valores é um ponto de grade de uma variável, sendo 10000 pontos de grade e 3 variáveis. É importante saber os intervalos onde tenho u, v e altura geopotencial para reestruturar os valores na saída do algoritmo do K-Means.

Após a execução do algoritmo K-Means, o resultado é um conjunto de dados contendo um vetor dessas três variáveis para cada centróide. No contexto dos padrões sinóticos, um 'centróide' representa o ponto central ou o padrão médio de um cluster específico de condições atmosféricas semelhantes. Após isso, o rearranjo de dados, de vetores para matrizes, é essencial para ilustrar os WPs.

Com isso, é possível discernir os dias associados a cada cluster. Para compreender melhor a evolução do sistema, obtivemos composições de todos os dias de cada padrão meteorológico, assim como para um e dois dias antes. Por exemplo, se as datas 03 de janeiro de 2001, 03 de janeiro de 2002 e 03 de janeiro de 2002 pertencem ao WP1, então as datas 02 de janeiro de 2001, 02 de janeiro de 2002 e 02 de janeiro de 2002 são escolhidas para calcular a condição atmosférica média 24 horas antes do WP. O mesmo princípio é aplicado 48 horas antes do WP.

3.4 Pontos Escolhidos

Para a avaliação robusta das ondas extremas nas costas Sul e Sudeste do Brasil, é crucial validar os dados de reanálise com medições observadas. Isso garante que a reanálise forneça informações precisas e confiáveis para a região em estudo. Nesse contexto, selecionamos pontos de referência correspondentes às localizações das boias de Vitória, Santos e Rio Grande do Programa Nacional de Boias Oceanográficas ((Marinha do Brasil, 2023; Pereira et al., 2017)). Estas boias, retratadas na Figura 3.4, fornecem dados observados de ondas, essenciais para o processo de validação.

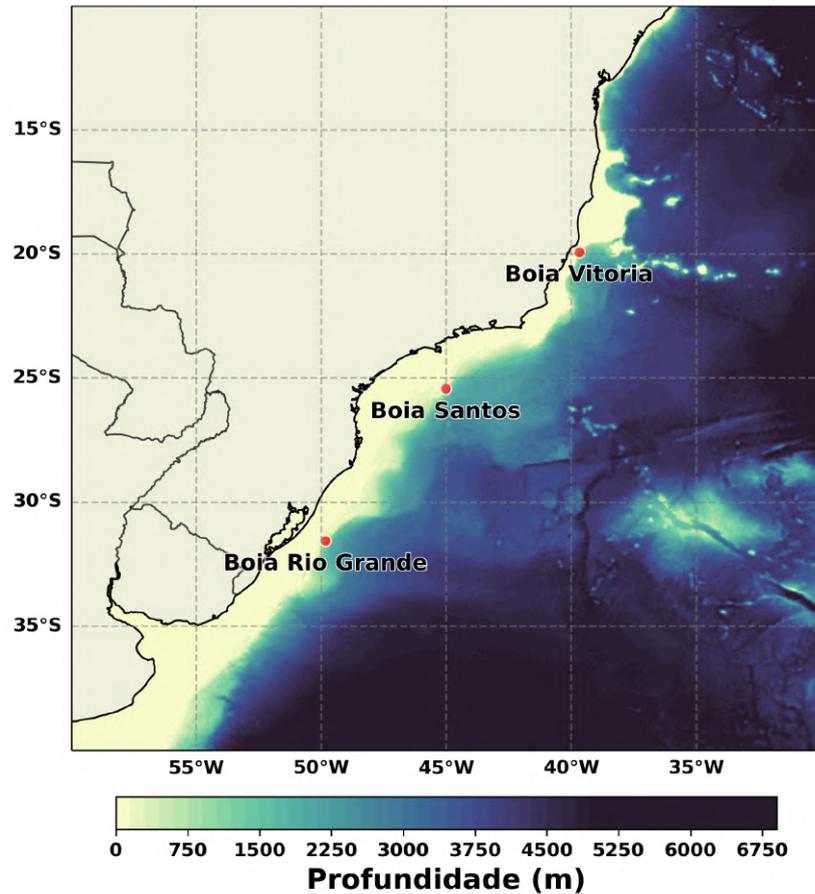


Figura 3.4: Ponto de referência para as boias de Vitória, Santos e Rio Grande.

3.5 Avaliação Estatística

Para quantificar a diferença entre os dados de reanálise (do WAVERYS) e as observações das boias, foram calculadas as seguintes métricas: BIAS, RMSE e correlação de Pearson (r). Essas métricas fornecem uma medida da confiabilidade dos dados de reanálise.

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

$$ME = BIAS = \bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (3.4)$$

Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) é frequentemente empregada. A principal vantagem do RMSE é a sua capacidade de apresentar os valores do erro na mesma unidade da variável que está sendo analisada Wilks, D. S.

(2014). Em termos matemáticos, o RMSE é definido por:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{si} - H_{oi})^2 \right]^{1/2} \quad (3.5)$$

onde H_{si} e H_{oi} são, respectivamente, a altura simulada e a observada no i -ésimo instante de tempo. Para avaliar se os dados estão em fase, utilizou-se da correlação de *Pearson*:

$$r = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_{oi} - \overline{H_o})(H_{si} - \overline{H_s})}{\sigma_{H_o} \sigma_{H_s}} \quad (3.6)$$

onde $\overline{H_o}$ e $\overline{H_s}$ são, respectivamente, a média dos valores simulados e a média dos valores observados e σ_{H_o} e σ_{H_s} são, respectivamente, o desvio-padrão dos valores simulados e dos valores observados. O valor da correlação varia entre -1 e 1. Um valor de correlação próximo de 1 indica uma forte correlação positiva, o que significa que, à medida que uma variável aumenta, a outra também aumenta. Um valor próximo de -1 indica uma forte correlação negativa, significando que, à medida que uma variável aumenta, a outra diminui. Um valor próximo de 0 indica que não há correlação linear entre as variáveis (Rodgers e Nicewander, 1988).

Resultados

Para validar os dados de ondas do WAVERYYS para a região especificada, os valores de H_s foram comparados com aqueles de três boias estrategicamente selecionadas. O gráfico de dispersão de densidade, Figura 4.1, fornece uma visualização abrangente dessa comparação para a) Boia Vitória, b) Boia Santos e c) Boia Rio Grande em comparação com o WAVERYYS.

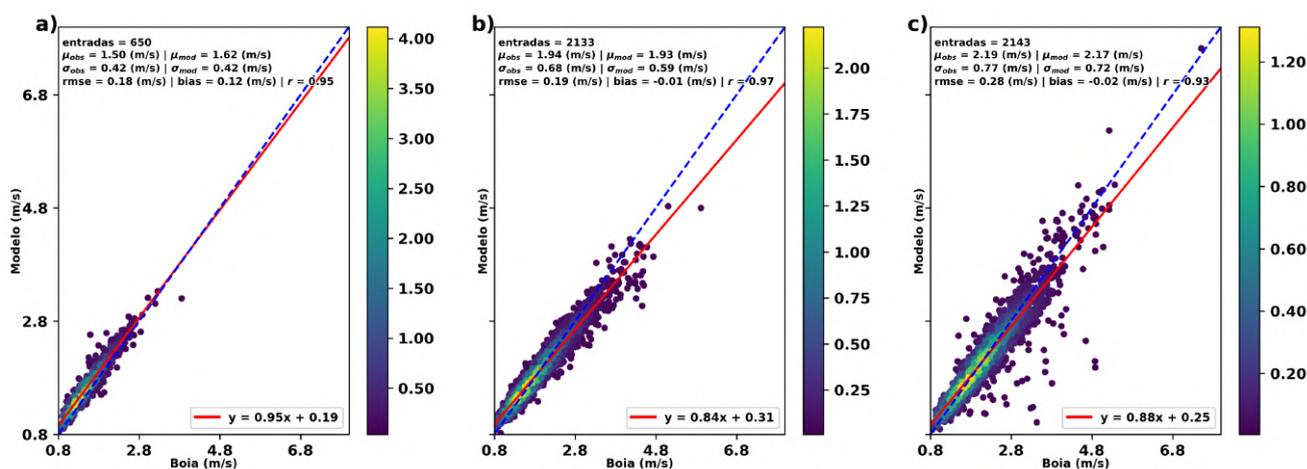


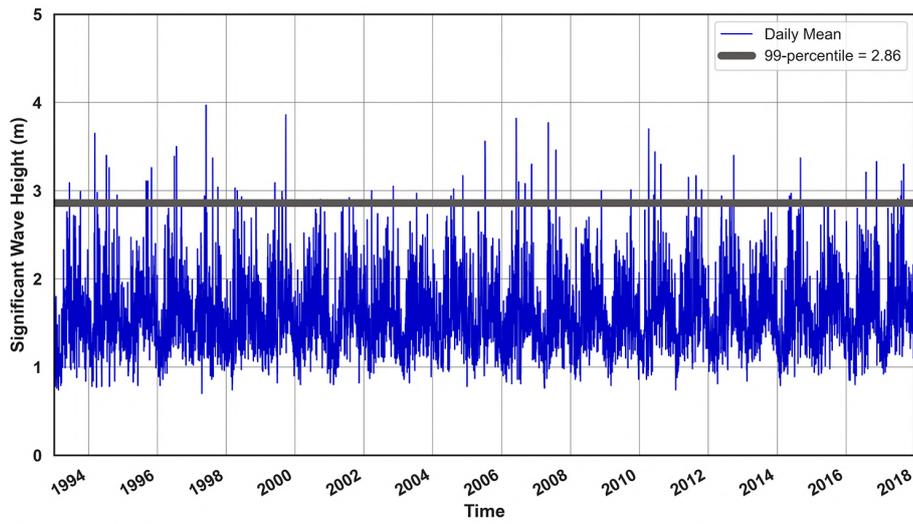
Figura 4.1: Gráfico de dispersão e métricas de erro para H_s do WAVERYYS x H_s das boias: (a) Vitória, (b) Santos e (c) Rio Grande. A densidade é normalizada pelo número de pares de dados (entradas).

Os valores de RMSE para estas boias variam de 0,18 m a 0,28 m, indicando uma boa concordância entre o modelo e as medições das boias. Os valores do BIAS, em torno de zero para todas as localizações, enfatizam ainda mais a precisão do modelo. Além disso, os coeficientes de correlação de Pearson para as boias, que estão entre 0,93 e 0,97, demonstram uma forte correlação entre a reanálise e as medições das boias. Essas métricas coletivamente sugerem que o H_s do WAVERYYS se alinha bem com as observações, demonstrando sua

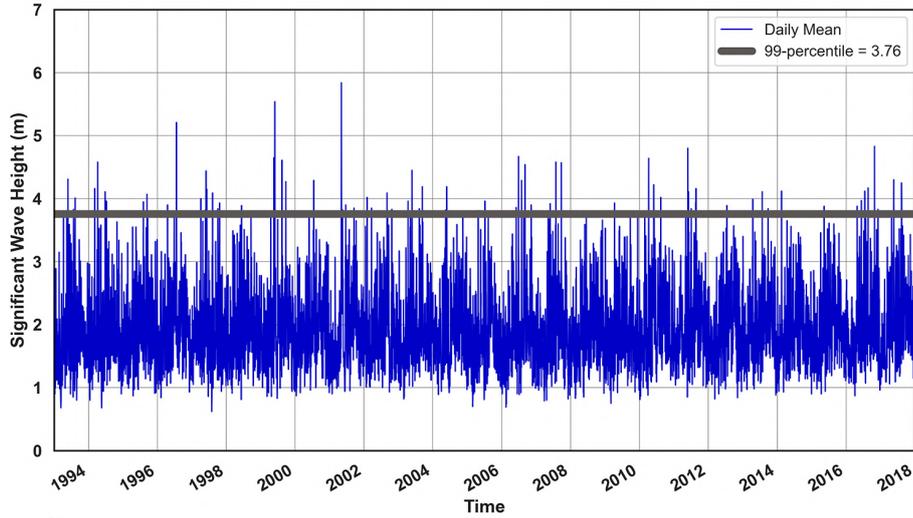
confiabilidade na região de foco.

Para a seleção dos eventos extremos foram considerados os instantes de tempo nos quais o valor instantâneo superou o percentil 99 da série correspondente. De modo objetivo, na Figura 4.2, são apresentadas as séries temporais de Hs do WAVERYS referente aos pontos selecionados para análise (Figura 3.4). O percentil de 99 correspondeu a valores de Hs acima de 2,86 m, 3,78 m e 4,58 m, para as Boias de Vitória (Figura 4.2-a), Santos (Figura 4.2-b) e Rio Grande (Figura 4.2-c), respectivamente. Dos valores que excedem o percentil, são classificados 95 extremos para Vitória, 92 extremos para Santos e 93 extremos para Rio grande.

a)



b)



c)

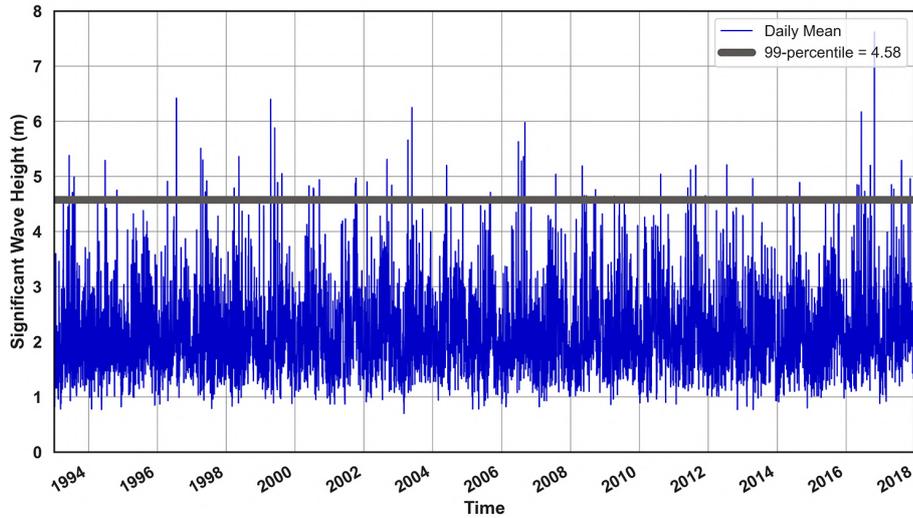


Figura 4.2: Série temporal de altura significativa e linha que representa o percentil 99 para a) Vitoria; b) Santos; c) Rio Grande.

Após a coleção de casos para cada ponto selecionado, foi aplicado o método K-Means sendo necessário determinar o número ideal de clusters. Para tanto, na Figura 4.3, encontra-se a aplicação do Método do Cotovelo para definição dos clusters ideais utilizados para a inicialização do K-Means. Desse modo, foram definidos 6 clusters para Vitória e Santos (Figuras 4.3-a e 4.3-b, respectivamente) e 4 clusters para Rio Grande (Figura 4.3-c).

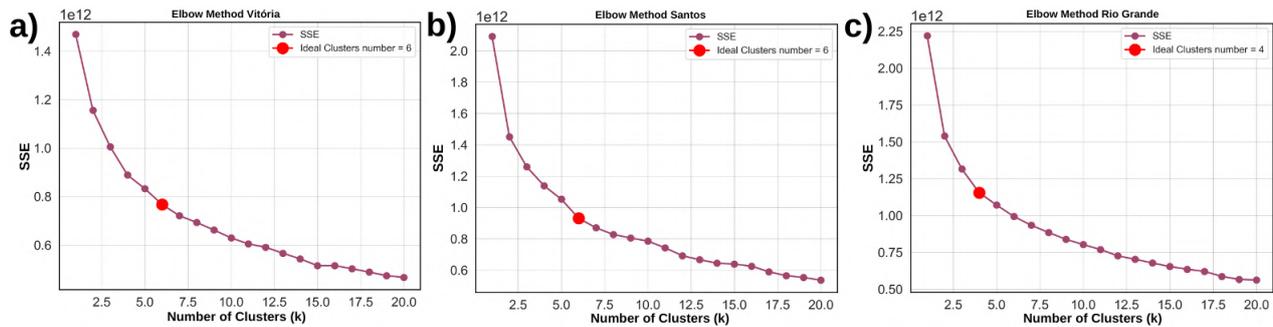


Figura 4.3: Método do Cotovelo representando o número de clusters ideais para os dias que excedem o percentil 99 em a) Vitória; b) Santos; c) Rio Grande.

4.1 Weather Patterns

4.1.1 Vitória

Na Figura 4.4 são representados os WP para os extremos de onda no ponto de Vitória (ES). Em todos esses WP a feição mais proeminente é a presença de altura geopotencial positiva, associada à alta pressão (alta pós-frontal), localizado na porção sudoeste do Atlântico Sul, próximo à região Sul do Brasil e ao Uruguai. Diferenças são notadas na posição exata deste sistema, estando mais próximo da porção central do Atlântico sul no caso dos WPS 2 e 6 (Figura 4.4-b e 4.4-f) e mais próximo da região continental nos demais. Além disso, o centro de alta é menos intenso nos WPs 2 e 4 (Figura 4.4-b e 4.4-d) que nos demais. Outra feição que pode ser observada é a ocorrência de um cavado sob a porção central do Atlântico Sul, no sudeste do domínio, nos WPs 1, 4 e 5 (Figuras 4.4-a, 4.4-d e 4.4-e) e próximo ao sul da América do Sul no WP2. Em alguns WPs também é possível observar a borda da ASAS na região central do Atlântico Sul (WPs 1, 4 e 5). Por fim, o WP3 (Figura 4.4-c) se destaca dos demais pela assinatura de um sistema de baixa pressão a nordeste da alta pós-frontal. Devido à posição e intensidade do sistema de alta (e, conseqüentemente, do gradiente de geopotencial associado) há variações na intensidade

e direção da pista de vento que se orienta para a costa sudeste, no ponto da Boia Vitória. A direção predominante da pista vento foi de SE para os WPs 2, 3 e 6 e de S, para os WPs 1, 4 e 5.

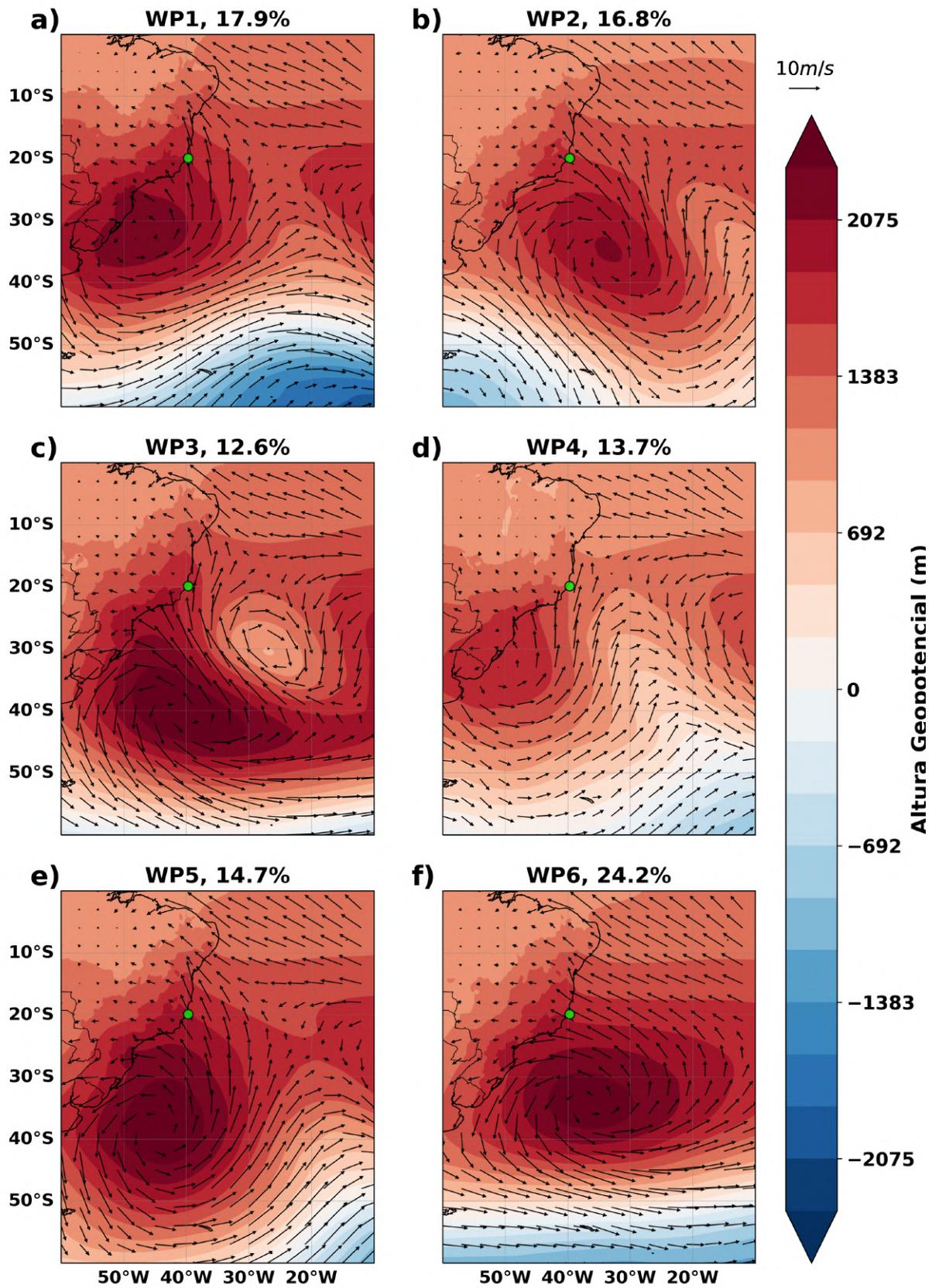


Figura 4.4: *Weather Patterns* principais e suas respectivas proporções na amostra total de Vitória: a) WP1 ; b) WP2; c) WP3; d) WP4; e) WP5; f) WP6.

4.1.2 Santos

Na Figura 4.5, são representados os WPs para os extremos de onda no ponto da Boia Santos. Assim como no caso anterior, fica evidente a influência de altura geopotencial tanto positivas quanto negativas, associadas, respectivamente, à sistemas de alta e baixa pressão, que orientam os ventos nesta região. Os WPs 5 e 6 (Figuras 4.5-e e 4.5-f) são caracterizados por sistemas de baixa pressão localizados no Atlântico Sul central, com uma alta pós-frontal sobre o continente, e se distinguem pelo fato do WP6 apresentar a baixa mais ao sul do que o WP5. O WP1 (Figura 4.5-a) é caracterizado pela presença de um sistema de baixa pressão à nordeste da alta pós-frontal, enquanto esta se limita a porção sudoeste do domínio. Os WPs 2 e 4 (Figuras 4.5-b e 4.5-d), são caracterizados por cavados que se estendem do sul até a porção central do domínio, com sistemas de alta pressão à oeste mais intensos e extensos que os sistemas pós-frontais dos WP 5 e 6 (Figuras 4.5-e e 4.5-f). Por fim, o WP3 se difere pela presença de uma alta pressão no centro-sul do Atlântico Sul. Com exceção do WP3, todos os WPs apresentam um sinal da ASAS no extremo leste do domínio. Esses sistemas apresentam diferentes direções da pista de vento que podem ter originado o extremo de onda no ponto da Boia Santos, sendo a pista de SW para os WP 5 e 6, de S-SW para o WP 2 e 4, de SE para o WP1 e de E para o WP3, mostrando que há uma certa variação na direção média de vento associado a extremos na região da boia de Santos.

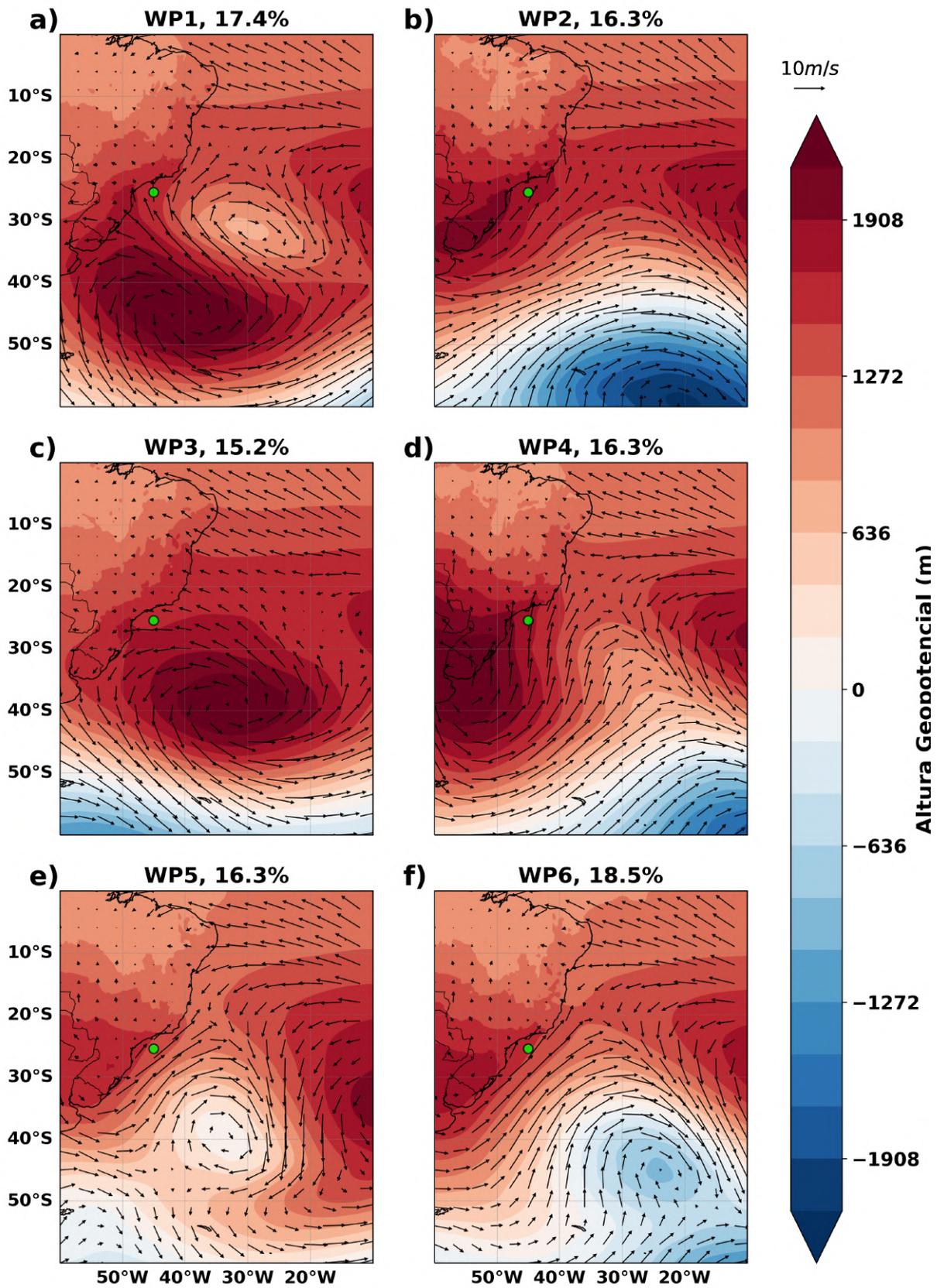


Figura 4.5: Weather Patterns principais e suas respectivas proporções na amostra total de Santos: a) WP1 ; b) WP2; c) WP3; d) WP4; e) WP5; f) WP6.

4.1.3 *Rio Grande*

Já para a Boia de Rio Grande, diferente das demais, o Método do Cotovelo determinou apenas o agrupamento de quatro WP (Figura 4.6). Os WPs 1 e 3 (Figuras 4.6-a e 4.6-c) destacam-se pela presença de uma baixa pressão no sudoeste do Atlântico Sul, sendo que no WP3 essa baixa parece estar conectada com um cavado ao sul do domínio, enquanto o WP1 a baixa está completamente fechada no sudeste da costa sul do Brasil. Nesses dois WPs a alta pós-frontal se estende do norte da Argentina ao centro-oeste do Brasil. Já o WP2 (Figura 4.6-b) apresenta uma alta pós-frontal mais extensa, seguida de um cavado que abrange o extremo sudeste até o sudoeste do Atlântico Sul. O WP4 (Figura 4.6-c), por outro lado, é dominado por uma alta pressão abrangendo toda a longitude ao sul, com um sinal da ASAS menos evidente que nos outros WPs. As pistas de vento que estão associadas ao extremos de onda no ponto da Boia Rio Grande são de SW para os WP 1 e 3, de S para o WP2 e de E para o WP4.

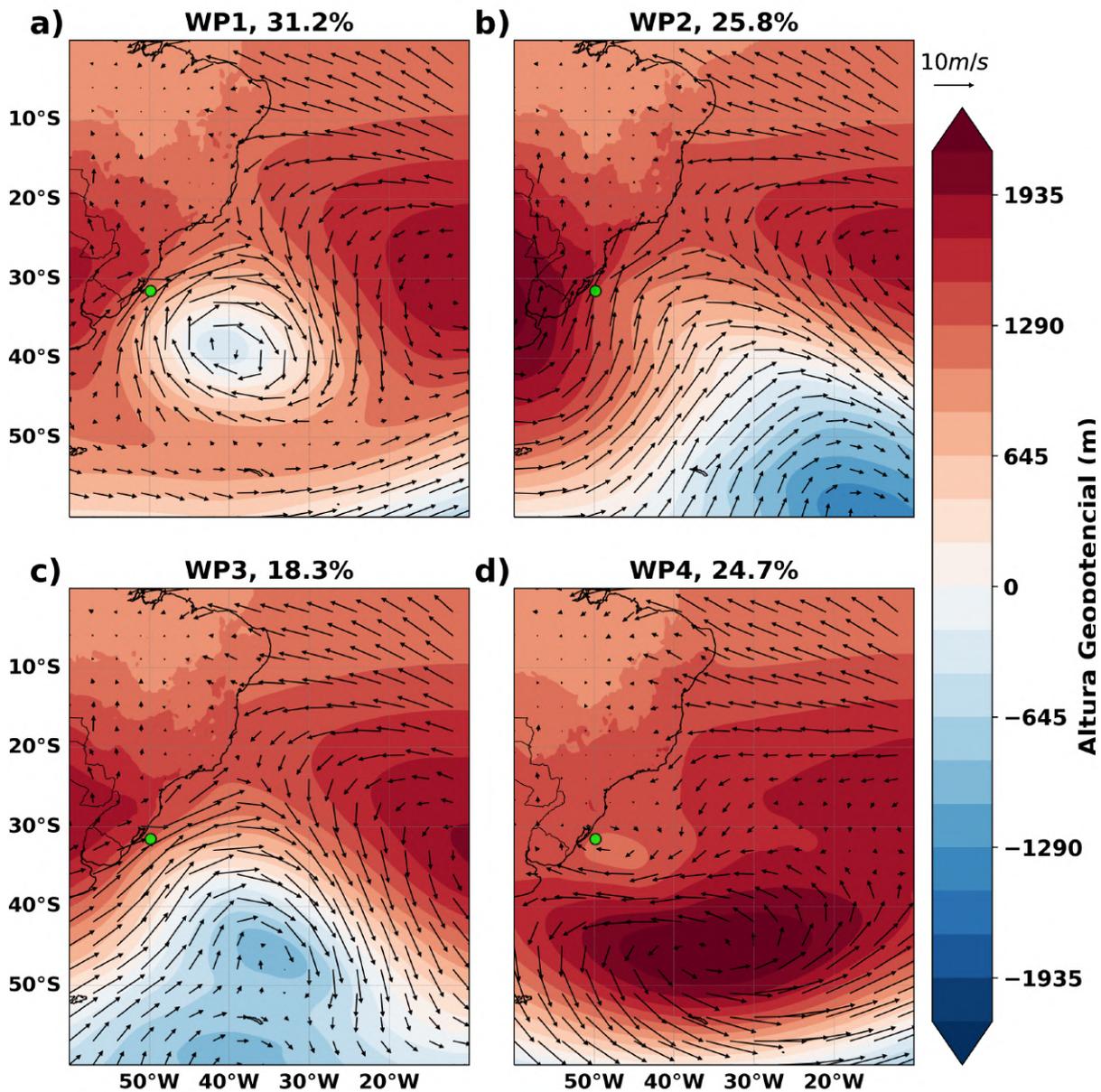


Figura 4.6: *Weather Patterns* principais e suas respectivas proporções na amostra total de Rio Grande: a) WP1 ; b) WP2; c) WP3; d) WP4.

4.2 Distribuição de ocorrência dos *Weather Patterns*

Os WPs aqui apresentados mostraram uma acentuada variabilidade sazonal (Figura 4.7). A característica mais evidente desta variabilidade sazonal foi a maior ocorrência dos eventos nos meses de inverno austral (JJA). Para o ponto de Vitória a segunda estação com maior ocorrência de WPs para extremos foi a primavera (SON) enquanto para a localidade de Santos e Rio Grande foi o outono (MAM). Além disso, não houve ocorrências de WP

para os meses de verão austral (DJF) para a localidade de Vitória e apenas algumas ocorrências para os pontos de Santos e Rio Grande.

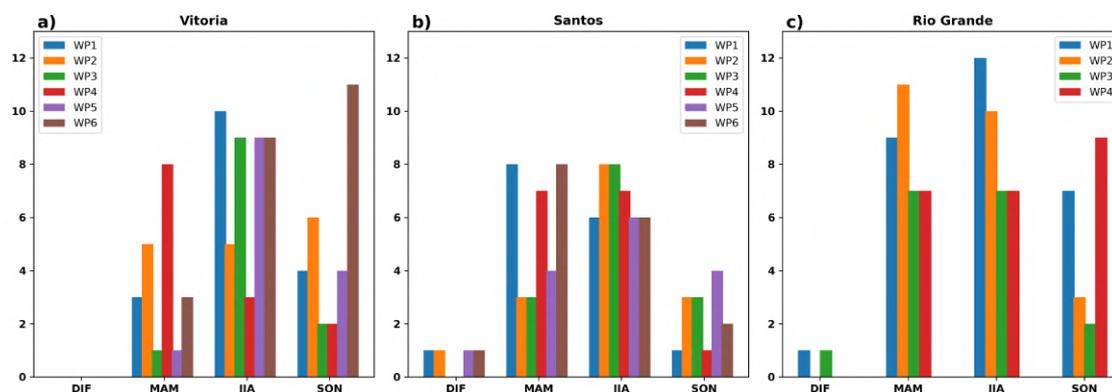


Figura 4.7: Distribuição de ocorrência dos WPs de a) Vitória, b) Santos, c) Rio Grande

Ao examinar essas tendências, é essencial considerar o impacto da seleção do percentil 99 na composição do conjunto de dados. Escolher este alto limiar percentil assegura que apenas os dias com valores que excedem os 99% mais altos da série temporal são incluídos, resultando em um foco nos eventos mais extremos e potencialmente mais impactantes. Esta abordagem exclui uma gama mais ampla de eventos que seriam capturados por limiares inferiores, como percentis de 97,5% ou 95%. Assim, embora esta seleção limite o conjunto de WPs, ela também proporciona uma visão mais precisa da intensidade e da frequência dos eventos extremos. Lembrando que é possível escolher o percentil no algoritmo e expandir essa análise.

4.3 Ondas associadas aos Weather Patterns

4.3.1 Vitória

Nas Figuras a seguir são apresentados os WP e seus respectivos campos médios de onda, isto é, Hs e direção de pico, além dos histogramas polares das ondas correspondentes. Para o WP1 de Vitória, o campo apresenta tem valores médios de Hs de 3 metros no ponto em questão. Na Figura 4.8-(b), a mesma região sul parece ter as maiores Hs, que alcançam até 4 metros, como indicado pelas áreas em tons mais claros de vermelho. Isso sugere que o cavado, no sul do domínio do WP, tem um papel importante no aumento da altura das ondas. Além disso, a presença de uma alta pós-frontal no oeste do domínio, que

possivelmente pode ser visualizada como uma região de cores vermelhas na Figura 4.8-(a), parece influenciar o padrão de ondas, induzindo ondas de até 3 metros que chegam no ponto de Vitória. A rosa de ondas fornece uma representação gráfica das ocorrências das ondas de diferentes direções e alturas correspondentes aos dias de extremos associados aos WPs. A análise da rosa das ondas do WP1 (Figura 4.8-c) indica que existe uma predominância de ondas originárias do setor sul, com uma inclinação significativa para o sudeste (S-SE) e sudoeste (S-SW). No setor S-SE, observamos 11 ocorrências de ondas com alturas significativas acima de 2,5 metros, o que indica uma frequência notável de ondas mais altas provenientes dessa direção. Por outro lado, no setor S-SW, há 6 ocorrências de ondas com alturas significativas acima de 3 metros, sugerindo que, embora menos frequentes, as ondas dessa direção tendem a ser mais altas. Portanto, pode-se inferir que as maiores ondas associadas ao WP1 em Vitória tendem a vir do setor S-SW. No entanto, de forma geral, a maior parte das ondas, incluindo aquelas de menor altura, têm sua origem no setor sul, possivelmente devido ao fato da alta pós-frontal, no WP1, estar com maiores intensidades do vento de sul na borda leste, induzindo essas ondas de sul.

Na Figura 4.8-c, observa-se também o WP2 que destaca um centro de alta pressão no centro do domínio, com ventos mais intensos nas bordas leste, nordeste e norte desse centro. À leste desse centro há um cavado, e, nessa região entre o centro da alta pós-frontal e o cavado, é que são observadas as maiores ondas (Figura 4.8-d). Estas ondas mais altas se estendem até o ponto da Boia Vitória, para noroeste, com valores acima de 3,5. Essas ondas que chegam no ponto em questão, podem ter sido influenciadas pelos ventos intensos de sudeste, na borda norte do centro de alta pressão. No caso da rosa de ondas associada ao WP2 (Figura 4.8-f), dentro dos 16,8% dos dias extremos, há 15 ocorrências de ondas acima de 2,5 metros com direção de S-SE e 1 caso de SE-E, também acima de 2,5 metros. Observando o WP2, e fazendo um paralelo com o campo médio de onda da Figura 4.8-(e), nota-se que tanto os ventos quanto a direção média das ondas que chegam no ponto de Vitória, são de S-SE.

Na Figura 4.8-(g), o WP3 é apresentado, caracterizando-se por um sistema de baixa pressão centralizado próximo aos 30°S e 25°W, com uma alta pós-frontal à sudoeste desse sistema, marcando 12,6% dos eventos de ondas extremas em Vitória. O campo de onda (Figura 4.8-h) tem seu núcleo de intensidade associado à região onde há o intenso gradiente de pressão entre os dois sistemas do WP3. As ondas que chegam no ponto de Vitória são,

aparentemente, de sudeste, justamente pelo fato do WP3 ter intensos ventos de sudeste entre os centros de alta e baixa pressão, na borda nordeste do centro de alta que seria a borda sudoeste do centro de baixa. Também vale ressaltar que as ondas mais altas associadas ao WP3, se concentram numa região bem menor mas com ondas bem mais altas, quando comparada com outros campos médios de onda, dos outros WPs. Já para o WP3, a rosa das ondas (Figura 4.8-i) indica 5 ocorrências de S-SW, com altura superior a 3 metros e outras 7 ocorrências de ondas de S-SE. É possível observar os ventos se orientando para S-SW, no WP3, bem próximo do ponto de Vitória, o que pode justificar a ocorrência de ondas de S-SW. O sistema ciclônico, bem próximo da alta pós-frontal, nesse WP, exerce um papel importante na intensificação dos ventos, na borda sudoeste do ciclone e na borda nordeste do anticiclone. Essa configuração faz com que o gradiente de pressão seja intensificado e, em consequência, os ventos de sudeste na interface ciclone-anticiclone. Nesse caso, as ondas são sempre acima de 3 metros, o que chama atenção pois, aparentemente, é um WP associado às condições sempre mais severas do que os anteriores (WP1 e WP2).

O WP4 (Figura 4.8-j), é caracterizado por uma alta pressão na parte oeste do domínio, entre região centro-sul do Brasil e a região norte da Argentina. De oeste para leste, em seguida, temos um cavado na porção central do domínio e um pequeno sinal da ASAS na borda leste do domínio. As condições médias de ondas (Figura 4.8-k) associadas a esse sistema mostram tons avermelhados do centro ao sudeste do domínio, representando as maiores ondas associadas a esse conjunto de sistemas do WP4. Assim como nos outros casos, a alta pós-frontal parece exercer um papel importante, principalmente devido aos ventos mais intensos em sua borda leste, esses com direção de sul, induzindo ondas acima de 3 - 3,5 metros no ponto de Vitória. O WP4 tem a rosa de ondas (Figura 4.8-l) associada com 7 eventos de S-SW acima de 3 metros e 6 eventos de S-SE acima de 2,5 metros, dentro dos 13.7% dos eventos que estão associados ao WP em questão. A configuração do WP4, com os ventos de SW e S, na borda leste do anticiclone, podem ser os responsáveis pela direção dos eventos. É interessante ressaltar que as ondas com direções voltadas para SW são maiores que os eventos de SE, associados a esse WP. O cavado posicionado à leste da alta pós-frontal parece contribuir para a geração das ondas, reforçando a ideia de intensificação dos ventos na interface ciclone-anticiclone.

O WP5 se assemelha com o WP4, mas nesse caso, a alta pós-frontal é maior e mais

intensa, além do fato dela se estender mais para a região oceânica. O cavado à leste/sudeste e o possível sinal da ASAS em sequência também aparecem no WP5. Ao observar o campo médio de onda (Figura 4.8-n) associado a esse WP, percebe-se que no sudeste do campo de altura significativa, há um região com ondas acima de 4 m, em tons que tendem ao vermelho claro, associado, principalmente com o cavado que aparece no sudeste do domínio. A porção em vermelho mais escuro, que chega até o ponto de Vitória, aparenta estar associada com os ventos de S e SE, intensos na borda leste da alta pós-frontal. A rosa de ondas associada ao WP5 (Figura 4.8-o), apresenta 2 casos de ondas de S-SW acima de 3 metros, 1 caso de S-SE acima de 3 metros e 11 casos de ondas de S-SE acima de 2,5 metros, tudo dentro dos 14,7% dos eventos extremos. De todos os 14, apenas 3 são superiores a 3 metros, o que indica que WP5 está mais associado às ondas acima de 2,5 metros. A configuração do WP5 exhibe ventos de sudeste próximos ao ponto de Vitória, na borda N-NE do anticiclone, o que justifica a ocorrência de 12 casos de S-SE.

O WP6, que é representado por um centro de alta pressão extenso longitudinalmente, que os outros que observamos para o ponto de Vitória. Esse sistema abrange e afeta quase todo o domínio longitudinalmente. O campo médio de onda (Figura 4.8-q) associado ao WP6, tem, de forma geral, ondas menores do que as ondas associadas aos outros WPs. No extremo sudeste do domínio, encontram-se ondas acima de 3,5 metros, possivelmente associadas à interação da borda sul do anticiclone com o sinal da onda baroclínica no extremo sul do domínio. Observando a região próxima ao ponto de Vitória, nota-se uma pequena núcleo em vermelho de ondas acima de 3,5 metros, possivelmente associadas aos ventos de SE/E na borda N-NE do anticiclone. Analisado o WP6 e sua rosa de ondas (Figura 4.8-r), observa-se 15 eventos acima de 3 metros, em que a direção das ondas foi de S-SE. Outros 7 eventos acima de 2,5 metros são de SE-E e apenas 1 evento, de 2,5 metros, foi de S-SW. Juntos totalizam 23 eventos, representando os 24,7% das ocorrências de extremos. Com exceção do último, era esperado que as ondas tivessem essa direção, justamente pelo fato do WP6 apresentar, os ventos que incidem no ponto de Vitória, mais inclinados para E quando comparado com os outros WPs. Além disso, vale ressaltar que as ondas de S-SE associada a esse WP são as maiores (superiores a 3 metros).

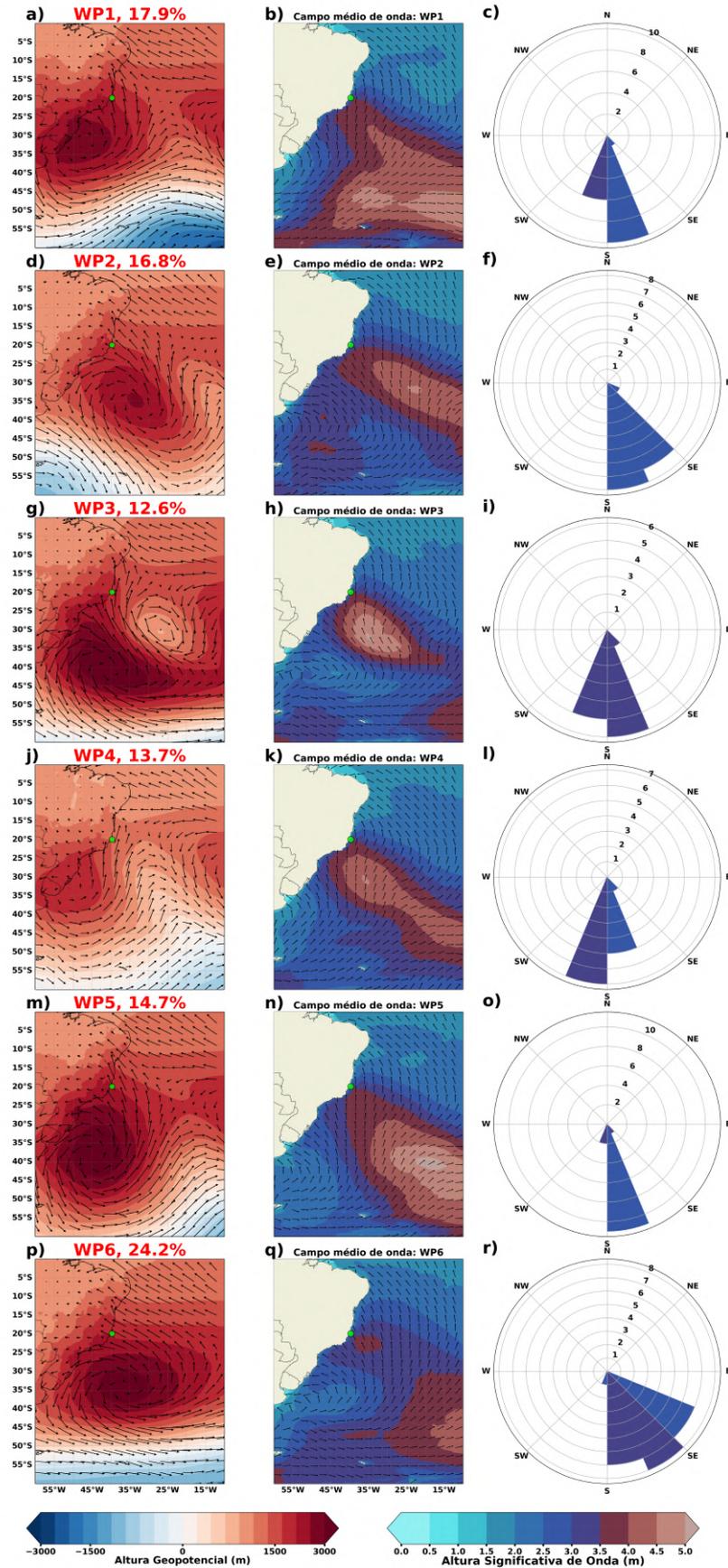


Figura 4.8: Weather Patterns de Vitória e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.

4.3.2 Santos

Para o WP1 de Santos, o campo médio de onda (Figura 4.9-b) é caracterizado por uma região em tons de vermelho no centro do domínio, chegando a valores superiores a 4 metros no ponto de Santos. Essa região de ondas maiores está em concordância com o ciclone que aparece no WP1 (Figura 4.9-a), onde tem-se um ciclone na parte central e um anticiclone à sudoeste dele. O elevado gradiente de pressão que surge entre os dois sistemas faz com que os ventos se intensifiquem ali, e como os ventos são de sudeste, o campo médio de onda se configura com ondas de SE/S conforme se aproxima do ponto. A análise da rosa de ondas do WP1 (Figura 4.9-c) indica casos de ondas superiores a 4 metros, sendo estas 8 ocorrência de ondas de S-SE, 1 caso de onda de E e 3 ocorrências de ondas de S-SW. Além disso, há 4 casos de ondas superiores a 4,5 metros, sendo estas de S-SW. O WP1 está associado a 17,4% dos eventos de extremo de onda no ponto de Santos e, ao observar a rosa de ondas, vemos que não há um domínio de SW ou SE, e sim direções bem distribuídas para cada caso. O fato de termos 4 casos de ondas superiores a 4,5 metros, com direção S-SW, mostra que apesar de existir uma intensa pista de vento de SE, os casos mais extremos para esse WP são com ondas provenientes do setor SW.

Observa-se também o WP2 (Figura 4.9-d) que destaca um centro de baixa pressão no extremo sudeste do domínio, com um cavado que chega a 25 °S, e uma alta pressão do Centro ao Sul do Brasil. O vento entre a alta pressão e o centro de baixa no sudeste é bem intenso, o que reflete no campo médio de onda (Figura 4.9-e), onde os tons avermelhados abrangem quase toda a porção sul do domínio. Isso indica que esse WP é bastante energético para todo sul do Atlântico Sul e induz ondas superiores a 4 m com direção sudoeste, até o ponto de Santos. Para o WP2, a rosa de ondas associada (Figura 4.9-f) abrange 16,3% dos dias extremos, com 14 ocorrências de ondas de S-SW, sendo 4 superiores a 3,5 metros e 10 superiores a 4 metros. Ao correlacionar com o campo de vento e altura geopotencial do WP2 (Figura 4.9-d), percebe-se que os intensos ventos de SW, à leste do cavado que abrange todo o sul do domínio, podem ser os responsáveis pelas ocorrências de ondas do setor S-SW. Esses ventos estão associados à alta pós-frontal que se posiciona ao sul do Brasil no WP2 e ao cavado que foi mencionado anteriormente.

No WP3 (Figura 4.9-g), caracterizado por um sistema de alta pressão centralizado, com um sinal da ASAS a leste, marcando 15,2% dos eventos de ondas extremas em Santos. O

campo médio de onda (Figura 4.9-h) se apresenta com uma faixa em tons avermelhados, que representam ondas superiores a 3,5 metros, indo do sudeste do domínio até a região do ponto de Santos. Essas ondas, mais intensas no domínio, acompanham as regiões onde os ventos, na borda norte e sudeste do anticiclone, são mais intensos. Os ventos de E na borda noroeste do anticiclone induzem as ondas de SE/E que chegam superiores a 3,5 metros no ponto de Santos. No WP3, a rosa das ondas (Figura 4.9-i) revela 7 ocorrências de ondas do S-SE, sendo 3 com altura superior a 3,5 metros e 4 com altura superior a 4 metros. Há 4 casos de SE-E, sendo 1 com altura superior a 3,5 metros e outros 3 superiores a 4 metros. Há um caso que distoia das ondas que temos visto, que é um caso de onda de E-NE superior a 4 metros. Geralmente, as direções de onda extremas são de Sul, mas nesse caso, aparecem mais casos de E e até de E-NE, justamente pela posição que a alta pós-frontal se encontra. Os intensos ventos no setor norte desse sistema, induzem ondas de E e até um caso de E-NE, revelando que sistemas de alta pressão também podem estar associados a ondas extremas. Por fim, há 2 ocorrências de ondas de S-SW superiores a 3,5 metros, que não era esperado pela configuração do padrão atmosférico do WP3 de Santos (Figura 4.9-g), mas o fato de ser de SW pode revelar que foi uma onda gerada por um ciclone que transitou antes da alta pós-frontal se posicionar no domínio.

O WP4 (Figura 4.9-j) é caracterizado por um intenso cavado abrangendo do centro ao sudeste do domínio, com uma intensa alta pressão a oeste do domínio e um possível sinal da ASAS à leste. O campo médio de onda (Figura 4.9-k) associado a esse WP é semelhante ao campo médio de onda no WP2, porém mais enfraquecido. As direções médias que chegam ao ponto de Santos, aparentam ser mais de sul e conforme se aproximam do ponto, indicam um pouco para sudoeste. Para o WP4, encontramos na rosa de ondas (Figura 4.9-l) um total de 13 eventos (representando 16,3 % dos casos) provenientes do S-SW, com ondas superiores a 4 metros. Outros dois eventos são de S-SE, sendo um superior a 4,5 metros e outro a 4 metros. Os intensos ventos na borda oeste da alta pressão no extremo oeste do domínio, ao sul do continente Sulamericano, induzem essas ondas predominantemente de sul. A combinação da alta pós-frontal e o cavado, faz com que os ventos fiquem direcionados de sul e induzam essas ondas de S-SW, que são mais frequentes nas rosas de ondas.

O WP5 (Figura 4.9-m) é caracterizado por um ciclone no centro-sul do domínio. O campo médio de onda (Figura 4.9-n) mostra uma região de ondas mais elevadas, concomitantes com a região do ciclone. Em tons de vermelho, próximo da costa, há uma região

de ondas superiores a 3,5 e 4 metros, chegando no ponto de Santos com direção média de sudoeste. A pista de vento no flanco noroeste do ciclone está sobre a região de maiores ondas, sendo assim, o mecanismo responsável por esse efeito. O WP5 tem sua rosa de ondas (Figura 4.9-o) com todas suas ocorrências de S-SW, sendo superiores a 4 metros e representando 14 casos no total. Os intensos ventos de sudoeste, no setor noroeste do ciclone que aparece no WP5, são os responsáveis pelo predomínio das ondas de sudoeste.

O WP6 (Figura 4.9-p) é semelhante ao WP5, mas o centro do ciclone está mais deslocado para o sudeste do domínio e o mesmo também é maior. Próximo ao seu centro, a altura geopotencial é menor, o que dá entender que é um sistema mais intenso que o WP5. O campo médio de onda (Figura 4.9-q) mostra, de forma geral, um padrão semelhante ao padrão de onda do WP5, porém, no caso do WP6, a região em que as ondas em tons avermelhado abrange, é maior, se estendendo da costa sul do Brasil até o sudeste do domínio. A rosa de ondas associada ao WP6 (Figura 4.9-r), indica também o predomínio quase total de ondas de S-SW, com 16 ocorrências superiores a 4 metros, há apenas um caso de S-SE. Pelo fato da configuração dos ventos do WP6 e do WP5 de Santos serem semelhantes, é possível que esse predomínio de ondas de S-SW estejam associadas aos intensos ventos de sudoeste à noroeste do centro do ciclone.

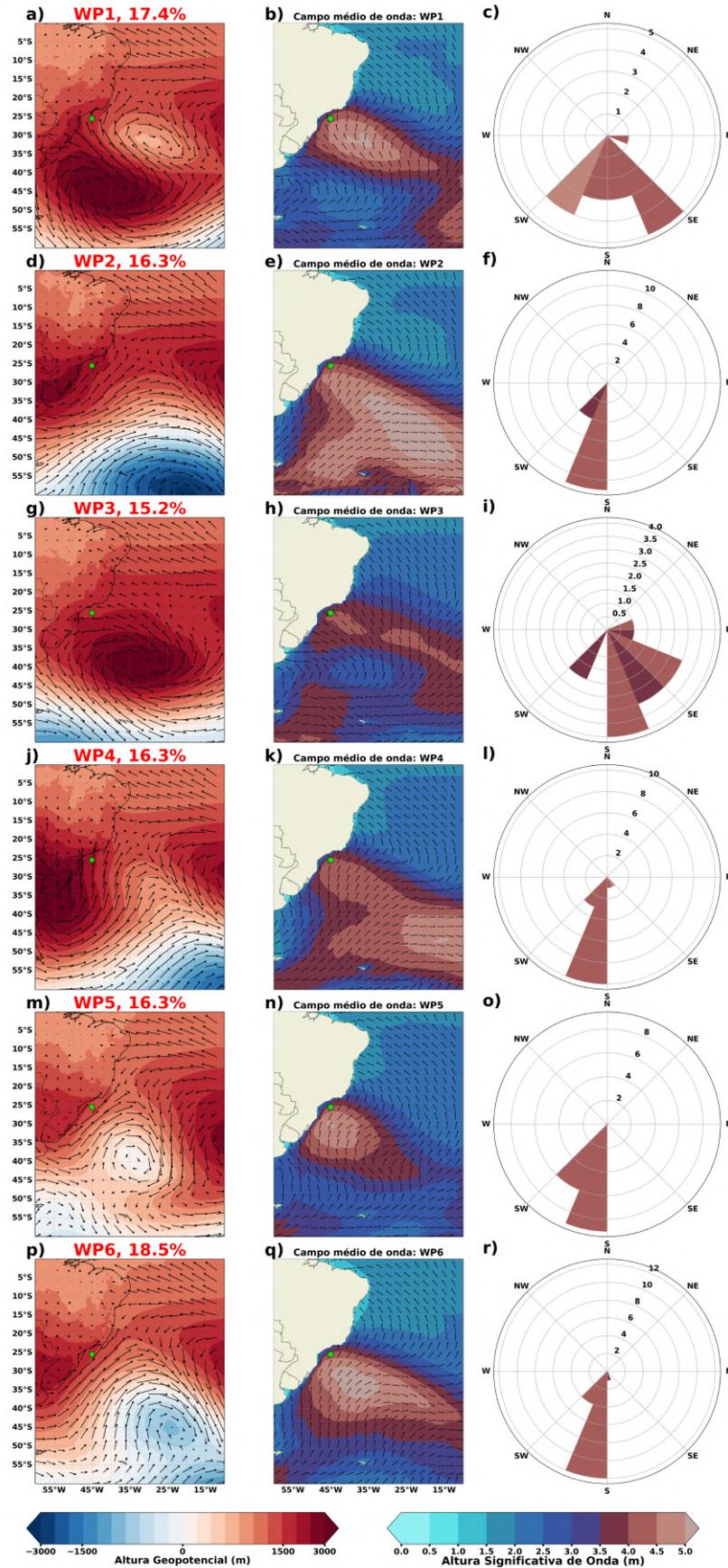


Figura 4.9: Weather Patterns de Santos e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.

4.3.3 Rio Grande

Para o WP1 de Rio Grande, o campo médio de onda (Figura 4.10-b) é caracterizado por uma região em tons de vermelho no Sul do litoral Brasileiro associada às maiores ondas, onde os tons em vermelho mais claro representam ondas com altura superiores a 5 metros. Essa núcleo vermelho que aparece está numa região concomitante com o ciclone do WP1 de Rio Grande (Figura 4.10-a), onde os intensos ventos no flanco oeste do ciclone podem ser os responsáveis por essas ondas extremas. A representatividade desse WP chama atenção pois tem-se 31,2% dos dias de extremo em Rio Grande associados a ciclones que se caracterizam com o campo atmosférico visto no WP1. As direções médias das ondas, nesse caso, são de SW mais ao sul do ponto, girando para S e SE ao se aproximarem do ponto de Rio Grande. A análise da rosa de ondas do WP1 (Figura 4.10-c) indica ocorrência de 19 casos de ondas de S-SW, sendo 15 superiores a 4,5 metros e 4 superiores a 5 metros. Há também 6 casos de ondas de SW-W com altura superior a 4,5 metros e 2 casos de S-SE, sendo 1 superior a 5 metros e outro a 4,5. A maioria dos casos é bem condizente com a direção predominante da pista de vento associada ao ciclone do WP1 que é de SW. Os dois casos de ondas de S-SE podem ser justificados quando observamos ondas médias (Figura 4.10-b) de S-SE ao sul do ponto, pode ser que em dois casos elas quem chegavam no ponto de Rio Grande.

O WP2 (Figura 4.10-d), representado por um cavado que se estende do sudeste do domínio até a região marítima do sul e sudeste do Brasil, tem seu campo médio de onda (Figura 4.10-e) dominado por cores avermelhadas no sul do domínio. Da costa sul do Brasil até o extremo leste do domínio, as ondas superiores a 4 metros estão presentes. Dois pequenos núcleos de ondas superiores a 5 metros aparecem, em tons de vermelho mais claro, bem em cima do ponto e no sudoeste do domínio. Um desses núcleos está associado ao intenso gradiente formado entre o cavado e a alta pós-frontal que o acompanha e o outro na borda noroeste do ciclone ao qual o cavado está associado. As direções médias que predominam próximas ao ponto é de sul. Para o WP2, a rosa de ondas associada (Figura 4.10-f) abrange 25,8% dos dias extremos, com 18 ocorrências de ondas de S-SW, sendo 10 superiores a 5 metros e 8 superiores a 4,5 metros. Ondas de S-SE também aparecem, marcando 3 casos superiores a 4,5 metros. Além disso, há 3 casos de ondas superiores a 5 metros com direção de SE-E. Ao correlacionar com o campo de vento e altura geopotencial

do WP2 (Figura 4.10-d), percebe-se que os intensos ventos de SW, à leste do cavado que abrange todo o sul do domínio, podem ser os responsáveis pelas ocorrências de ondas do setor S-SW. Como os ventos estão bem orientados para serem quase de S, é possível que apareçam os casos de extremos associados a ondas de S-SE, mas as ondas de SE-E parecem ter sido geradas antes do instante em que detectamos o WP2.

No WP3 (Figura 4.10-g), caracterizado por um sistema de baixa pressão ao sul do domínio que parece se desprender de outro centro, apresenta o campo médio de onda associado como uma evolução do campo médio de onda associado ao WP1. Nesse caso, os campos médio de onda são bem semelhantes, mas se diferem pelo fato do campo de onda associado ao WP3 (Figura 4.10-h) apresentar uma extensão maior das ondas superiores a 5 metros, e conseqüentemente das de 4 e 4,5 metros. Próximo do ponto as ondas se mostram superiores a 5 metros, se estendo até o centro do domínio. Essa região é concomitante com a região do ciclone que aparece no WP3, e provavelmente é mais extensa devido ao fato do ciclone ser maior e mais intenso. A direção média nesse caso é de S ao sul do ponto e de SW no ponto de Rio Grande. A rosa das ondas associada ao WP3 (Figura 4.10-i) compreende os eventos extremos que representam 24,7% dos casos em Rio Grande. Há 11 ocorrências de ondas de S-SW superiores a 5 metros e outras 2 de mesma direção superiores a 4,5 metros. Além disso, há 3 casos de ondas de SW-W superiores a 4,5 metros e 1 caso de ondas de W-NW superior a 5 metros. Esse último caso chama atenção pois pode haver um dia no conjunto que o ciclone estivesse um pouco mais ao sul e gerasse ondas de W no seu setor norte. De forma geral, a direção média predominante está condizente com a intensa pista de vento que observamos no WP3.

Já no WP4 (Figura 4.10-j), que é caracterizado por uma alta pressão alongada, abrangendo desde 55°W a 15°W na latitude de 45°S, tem seu campo médio de onda (Figura 4.10-k) caracterizado por ondas médias de SE que superam 5 metros no ponto de Rio Grande. Nas bordas do anticiclone aparecem as cores mais avermelhadas no campo médio de onda, justamente pelo fato do vento ser mais intenso e persistente nessas regiões. Com isso, o campo médio de onda também se caracteriza por ter essas ondas superiores a 3,5 metros no entorno do sistema de alta pressão que caracteriza o WP4. Encontramos na rosa de ondas (Figura 4.10-l) do WP4 a maior variedade em direção em todos os WPs. A maioria é superior a 4,5 metros, compreendendo 7 casos de ondas de E-NE, 6 casos de ondas de S-SE, 7 casos de ondas de S-SW e 2 casos de ondas de SW-W. Há um único

caso de onda de SE-E e é também o único superior a 5 metros. Os 7 casos de E-NE e 1 caso de S-SE indica que as ondas podem ter sido geradas pelos ventos associados à porção norte do anticiclone. Já os casos de S-SW e SW-W revelam que podem ter amostras de um pequeno ciclone nesse conjunto, bem próximo ao ponto de Rio Grande, onde há um mínimo de altura geopotencial.

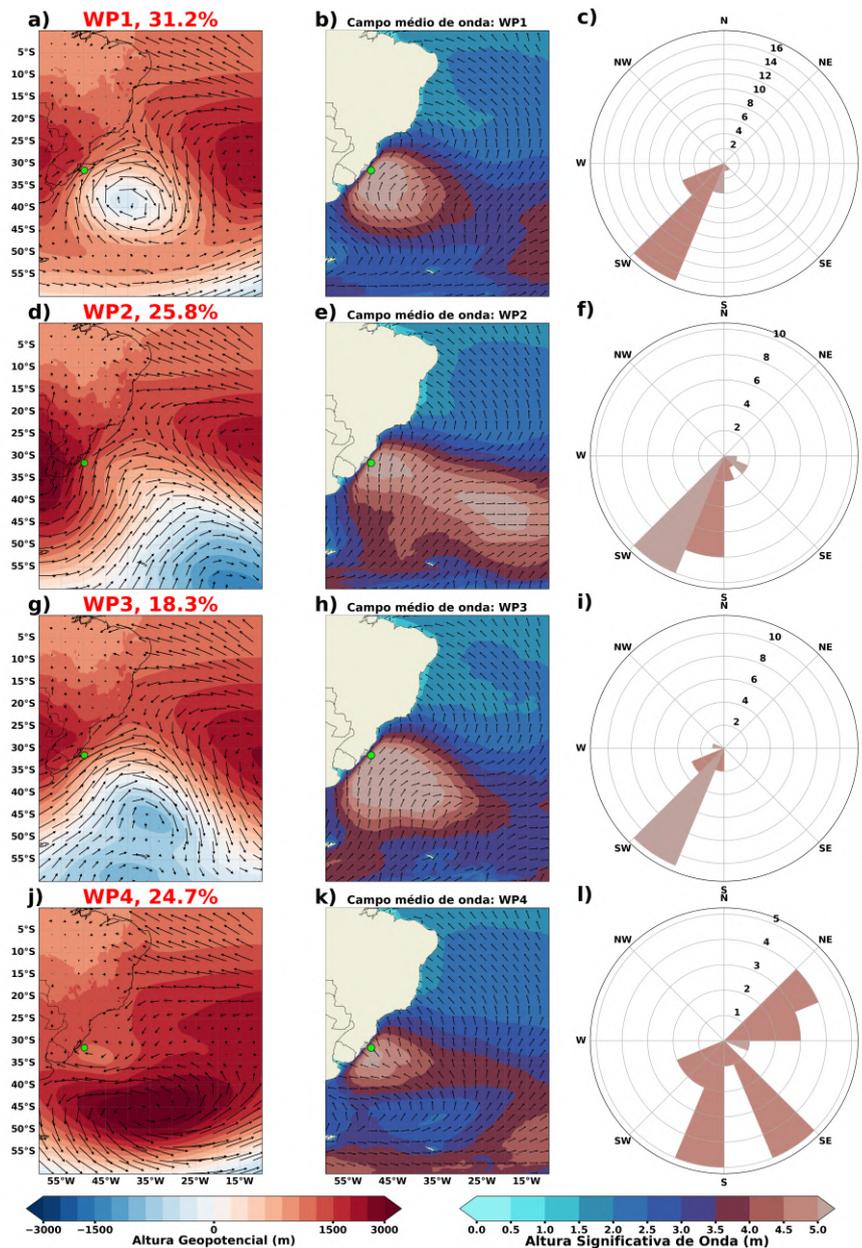


Figura 4.10: *Weather Patterns* de Rio Grande e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.

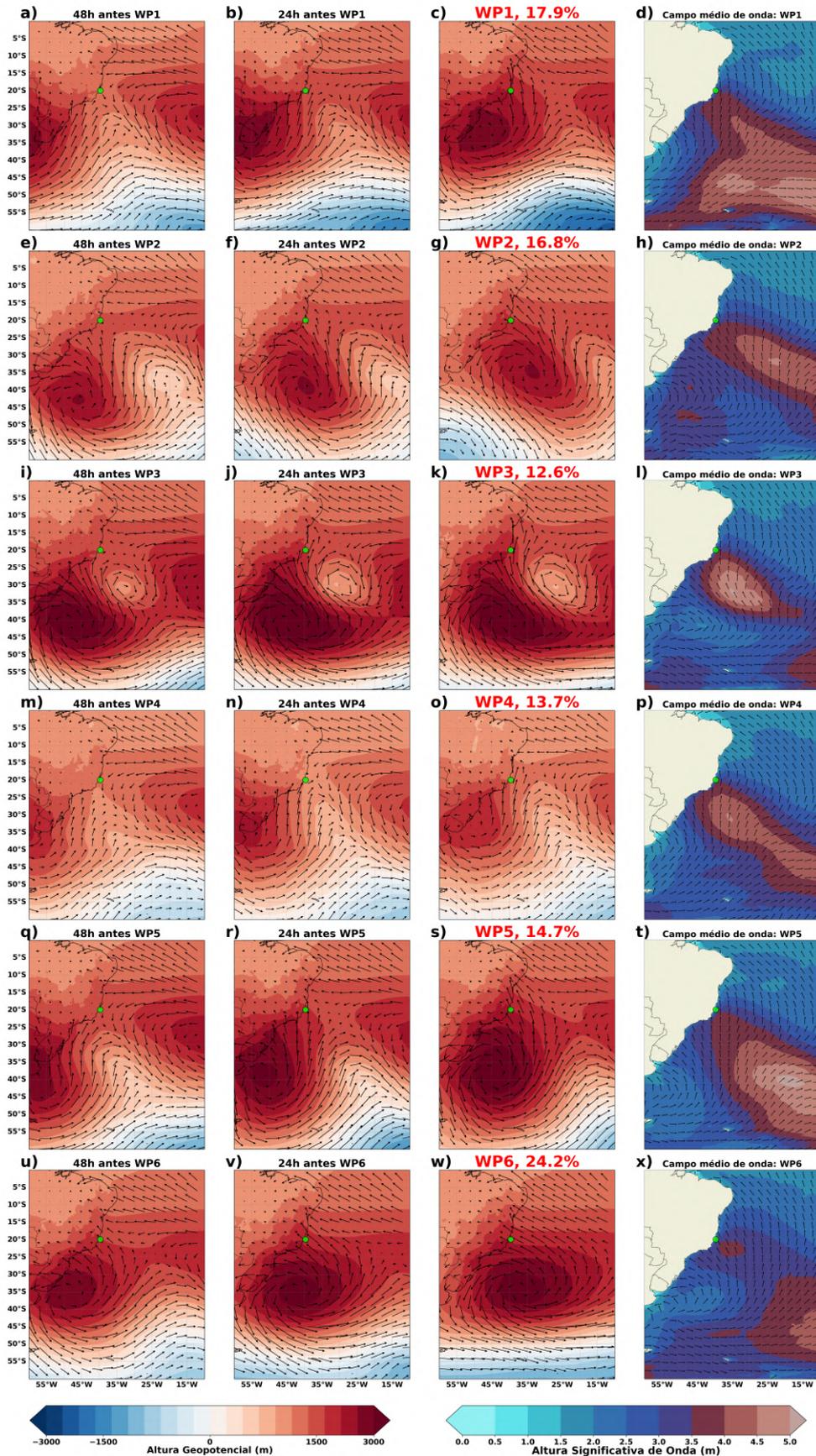
4.4 Evolução temporal dos Weather Patterns

Para entender melhor a evolução sinótica dos sistemas responsáveis por gerar os extremos de ondas em cada ponto selecionado, foram realizadas médias dos campos de geopotencial e vento para os dias anteriores, associados a cada WP. A seguir serão exibidos, junto do campo médio de onda e dos WPs, as médias do campo atmosférico, das condições 24 e 48 horas antes do evento de extremo em cada ponto.

4.4.1 Vitória

Na Figura 4.11 temos a evolução temporal das condições sinóticas associadas aos extremos de ondas para a Boia de Vitória. Em todos os WP é possível observar a passagem da onda baroclínica pela porção sul do Atlântico Sul, havendo diferenças principalmente em sua amplitude, fase e velocidade de deslocamento. Tal fatores acabam refletindo na extensão e intensidade da pista de ventos apontada para a Boia de Vitória, gerando diferentes padrões espaciais de *swell* incidente na região. Um caso notável é o WP3 onde a o sistema de baixa na altura da região Sudeste do Brasil não aparenta estar relacionado com a onda baroclínica, indicando possíveis mecanismos de gênese distintos. Já no WP1 o intenso cavado sob o Atlântico Sul associado a seu pequeno deslocamento foi capaz de gerar um padrão de elevado Hs pela maior parte do domínio selecionado. De todo modo, é possível identificar que em todos os WP para a Boia de Vitória há a persistência (pelo menos 48h) de um sistema de alta pressão na porção sudoeste do Atlântico Sul, responsável por ventos persistentes de S ou SE em direção a este ponto e, conseqüentemente a direção predominante de onda é de S e SE

Figura 4.11: Evolução temporal WPs para ondas extremas em Vitória: primeira coluna: 48h antes do WP; segunda coluna: 24h antes do WP; terceira coluna: WP; última coluna: campo de ondas correspondente ao WP.



4.4.2 Santos

A evolução das condições sinóticas associadas aos extremos de onda para o ponto de Santos encontra-se na Figura 4.12. Assim como para as condições sinóticas apresentadas para a Boia de Vitoria, há nesse caso variação em amplitude, fase e velocidade de deslocamento da onda baroclínica na porção sul do Atlântico Sul. Nos WPs 2, 4 e 6 evidenciam-se cavados de grande amplitude, estendendo-se pela porção central do domínio, e a presença de sistemas de alta pós-frontal localizada sob o continente no sudeste da América do Sul, variando em intensidade e extensão dentre os WP. O *swell* gerado por esses WPs são provenientes de sudoeste em média, porém as extensões deles divergem entre si: no WP1, um *swell* menos extenso que os outros, mais restrito à porção sudoeste do Atlântico Sul. No WP4, um *swell* que se estende da costa sudeste do Brasil até a porção sudeste do Atlântico Sul e, no WP2 há a geração de um extenso *swell* no sul do Atlântico Sul. Nos WP 1 e 5 (Figura 4.12-c e 4.12-s) é possível observar a presença de um sistema ciclônico na porção central do domínio. Observando os dias anteriores, pode-se concluir que esse sistema tem geração entre o Rio Grande do Sul e o Uruguai no WP5 e o WP1 na região marítima do sudeste do Brasil. Entretanto, a direção do *swell* que se orienta para a costa difere entre eles, sendo o WP1 ondas de sudeste, este último com maior extensão de HS elevado e o WP5 gerador de ondas de sul/sudoeste. Já o WP6 é caracterizado por um sistema de alta pressão, induzindo *swell* de sudeste.

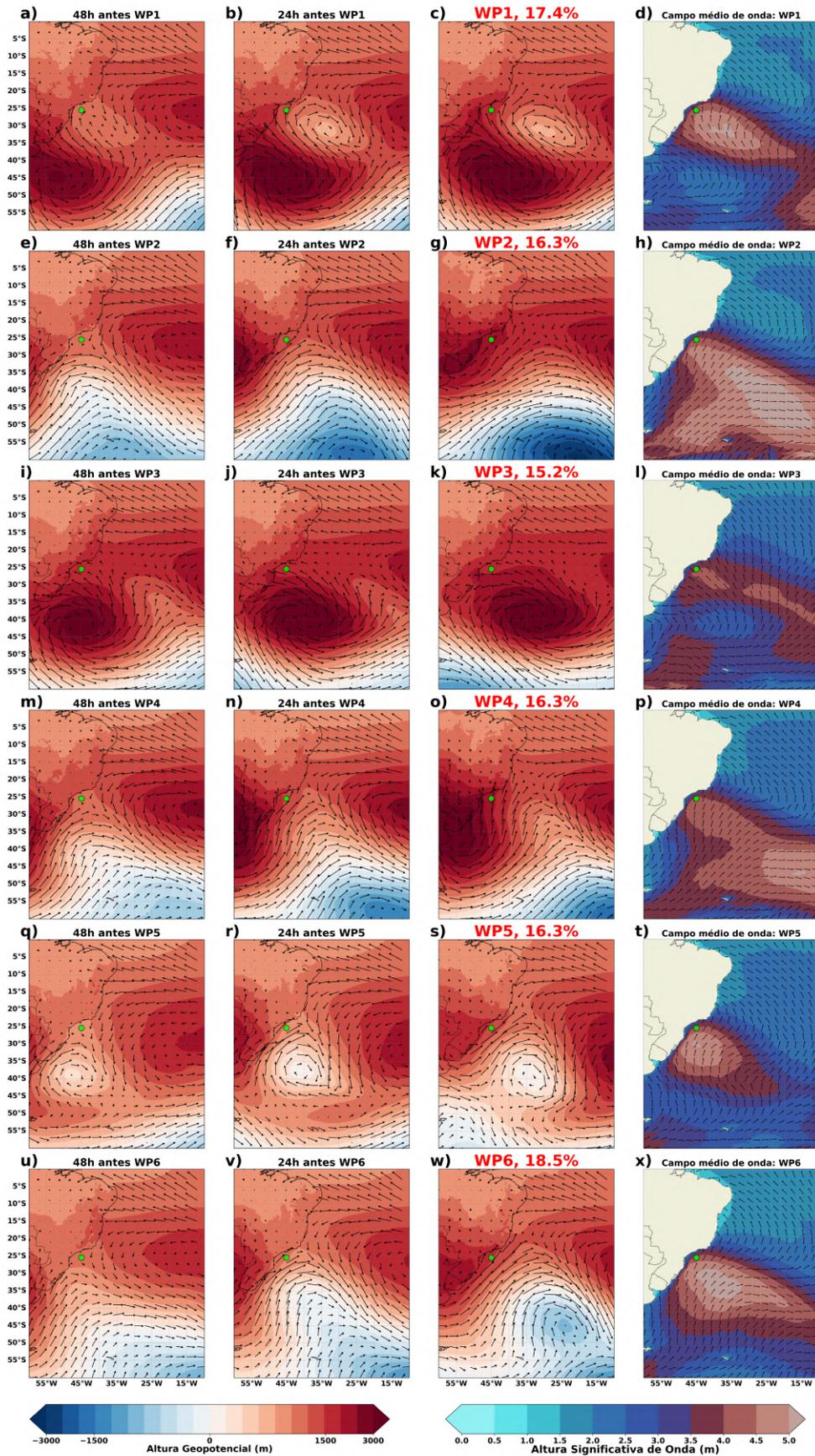


Figura 4.12: Evolução temporal WPs para ondas extremas em Santos: primeira coluna: 48h antes do WP; segunda coluna: 24h antes do WP; terceira coluna: WP; última coluna: campo de ondas correspondente ao WP.

4.4.3 Rio Grande

Já para a Boia de Rio Grande, (Figura 4.13), os WP1 e 2 apresentam ciclones que parecem se formar na mesma região. No WP3, o cavado na porção sudeste do domínio se intensifica desde as 48h anteriores até o momento de configuração do WP, permanecendo quase estacionário, o que gera uma pista de ventos do quadrante S sob o a região costeira do Sul do Brasil e, conseqüentemente, um *swell* que se estende por toda a porção sul do domínio. Já no WP4 a configuração da alta pós-frontal está associada com ventos persistentes de E/SE, gerando o *swell* que atinge principalmente a região Sul do Brasil e o Uruguai.

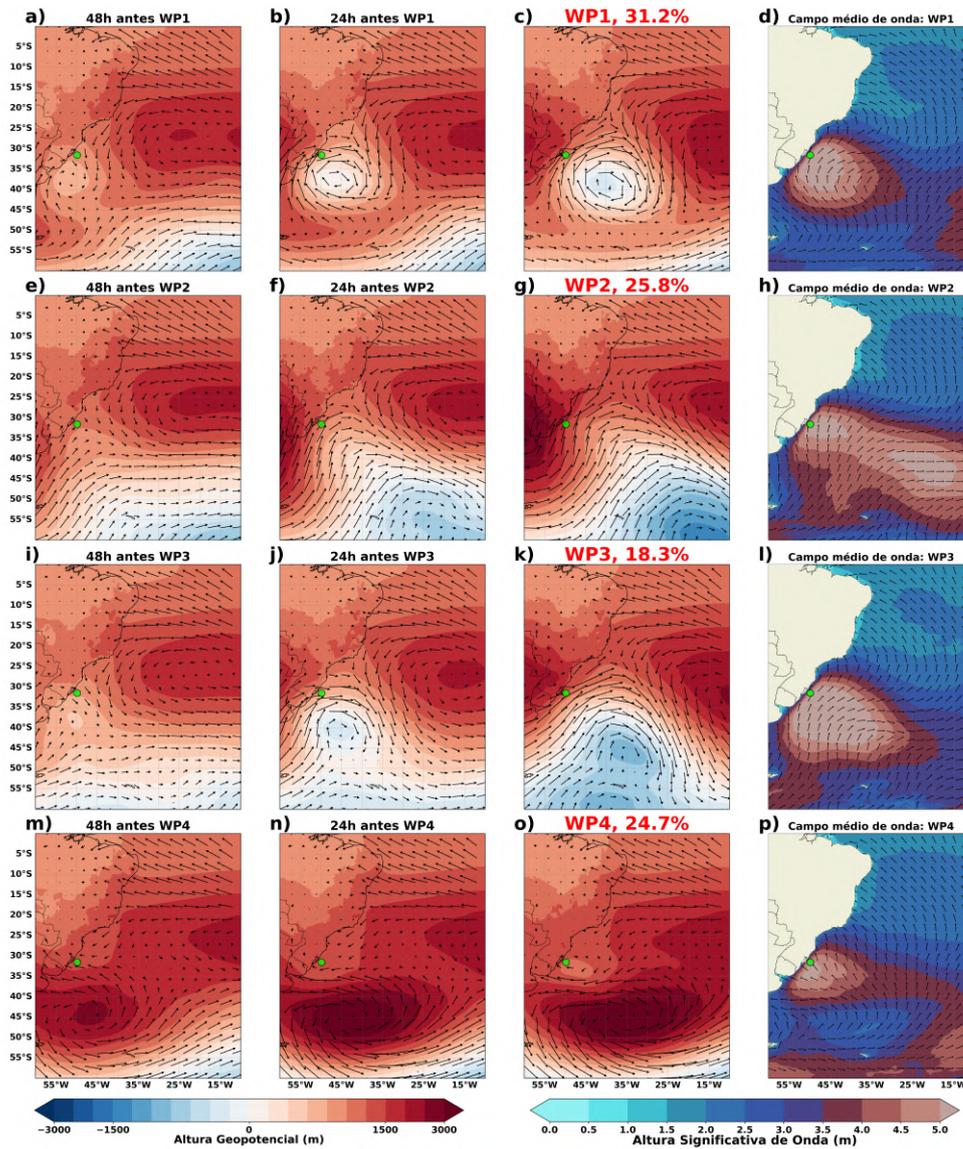


Figura 4.13: Evolução temporal WPs para ondas extremas em Rio Grande: primeira coluna: 48h antes do WP; segunda coluna: 24h antes do WP; terceira coluna: WP; última coluna: campo de ondas correspondente ao WP.

Discussão

5.1 Intercomparação de WPs

Alguns dos WPs encontrados para as diferentes regiões foram avaliados visualmente. Nota-se uma semelhança entre o WP1 de Santos com o WP3 de Vitória, dando uma ideia de que os mesmos sistemas atmosféricos podem ter influenciado no extremo tanto em Santos quanto em Vitória. Há uma pequena diferença entre os padrões observados no WP1 de Santos e no WP3 de Vitória, o que indica uma ideia de propagação do sistema ciclônico para leste, fazendo a pista de vento se inclinar no sentido do ponto de Vitória.

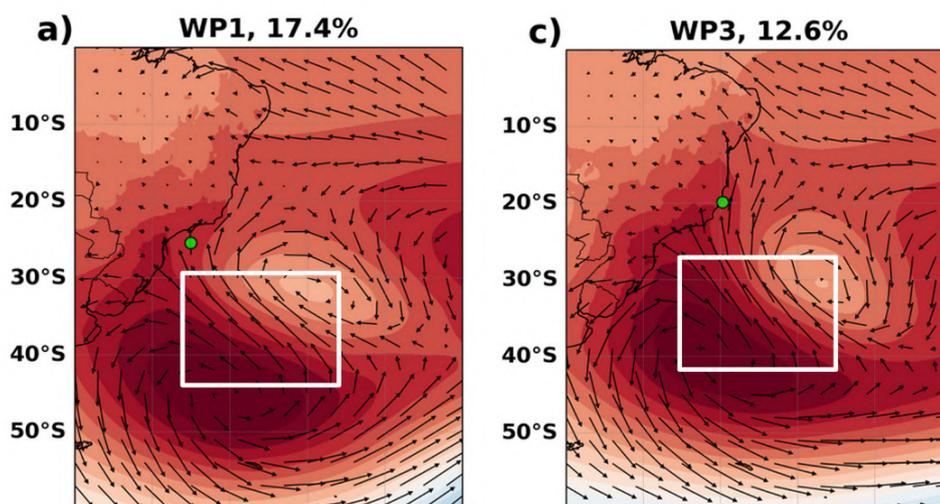


Figura 5.1: Comparação entre WP1 de Santos e WP3 de Vitória

Nos próximos 3 sistemas observados nos WP2 de Rio Grande, WP4 de Santos e WP4 de Vitória, há uma ideia de propagação e aprofundamento para baixas latitude do cavado situado à leste da alta pressão. Como sabemos da propagação desses sistemas para leste,

possivelmente há sistemas que compartilham a geração de extremos para as 3 regiões.

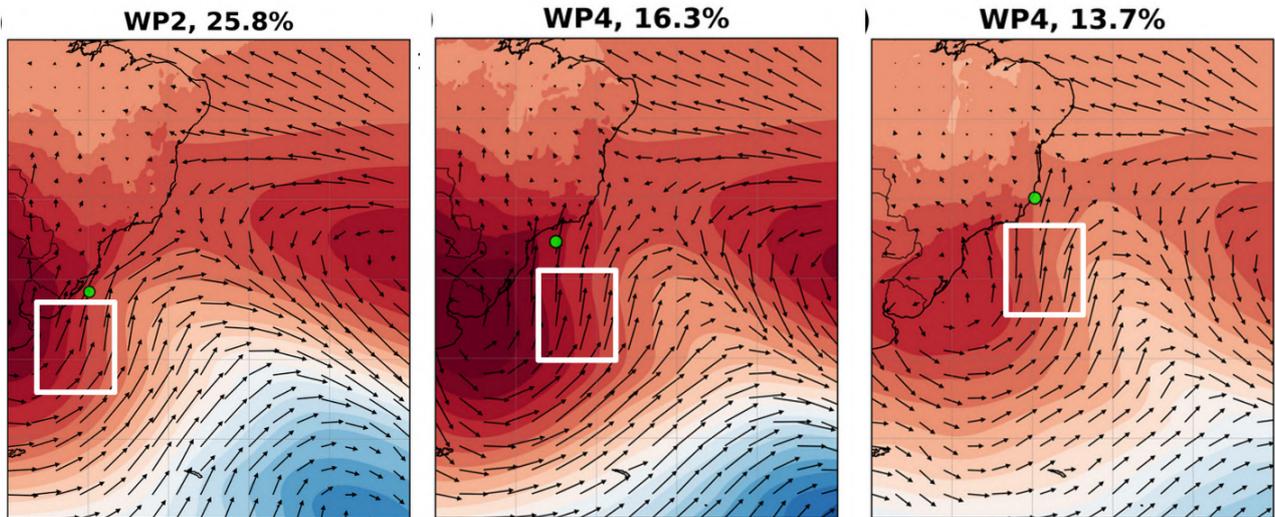


Figura 5.2: Comparação entre WP2 de Rio Grande, WP4 de Santos e WP4 de Vitória

Essa mesma ideia continua se replicando ao observarmos o WP1 de Rio Grande e o WP5 de Santos, onde a pista de vento à oeste do ciclone se desenvolve ao longo da costa brasileira, podendo gerar extremos para todo litoral Sul/Sudeste.

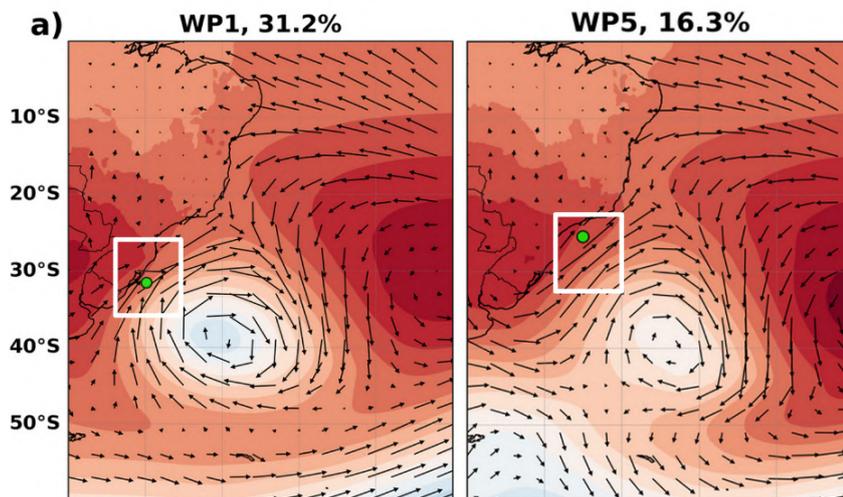


Figura 5.3: Comparação entre WP1 de Rio Grande e WP5 de Santos

Os anticiclones dos WP4 de Rio Grande, WP3 de Santos e WP6 de Vitória são bem semelhantes, porém há um deslocamento do sistema à medida que avaliamos os extremos

ao longo da costa. O anticiclone mais ao sul associado ao extremo em Rio Grande e o anticiclone mais ao norte associado aos extremos em Santos.

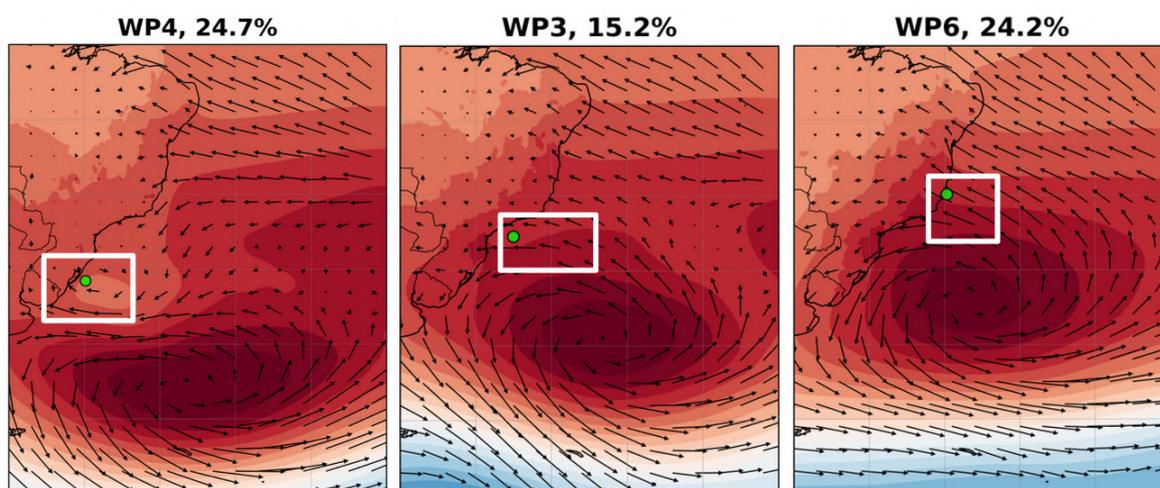


Figura 5.4: Comparação entre WP4 de Rio Grande, WP3 de Santos e WP6 de Vitória

5.2 Comparação de WPs com outros estudos

Campos (2009) analisou extremos de ondas na Baía de Campos e as condições atmosféricas associadas. Com resultados do WaveWatchIII de 1986 a 2005, foram identificados 42 eventos extremos em um certo ponto de referência: 23 (54,8%) estão associados a ciclones, 10 (23,8%) com anticiclones e 9 (21,4%) com depressões. Em relação aos casos associados a ciclones, a maioria ocorre no outono e inverno, seguidos pela primavera e verão. Embora a área estudada por Campos (2009) seja a Baía de Campos, a distribuição de frequência dos eventos extremos 4.7 nas três regiões estudadas no presente trabalho alinha-se com as descobertas do autor.

A metodologia e os resultados descritos por Sondermann et al. (2023) enfatizam a importância dos padrões atmosféricos na direção tanto de extremos de ondas quanto de ressacas no litoral de São Paulo. Aplicando a técnica de agrupamento K-means, os autores reconheceram três padrões primários de circulação atmosférica (I, II e III) ligados a ressacas. A semelhança entre esses padrões e os WPs para Santos (4.5) destaca o papel crítico que os sistemas atmosféricos transientes desempenham em ambos os fenômenos. Na Figura 5.5, foram traçados paralelos entre os WP5, WP1 e WP2 de Santos, com os 3

padrões encontrados por Sondermann et al. (2023).

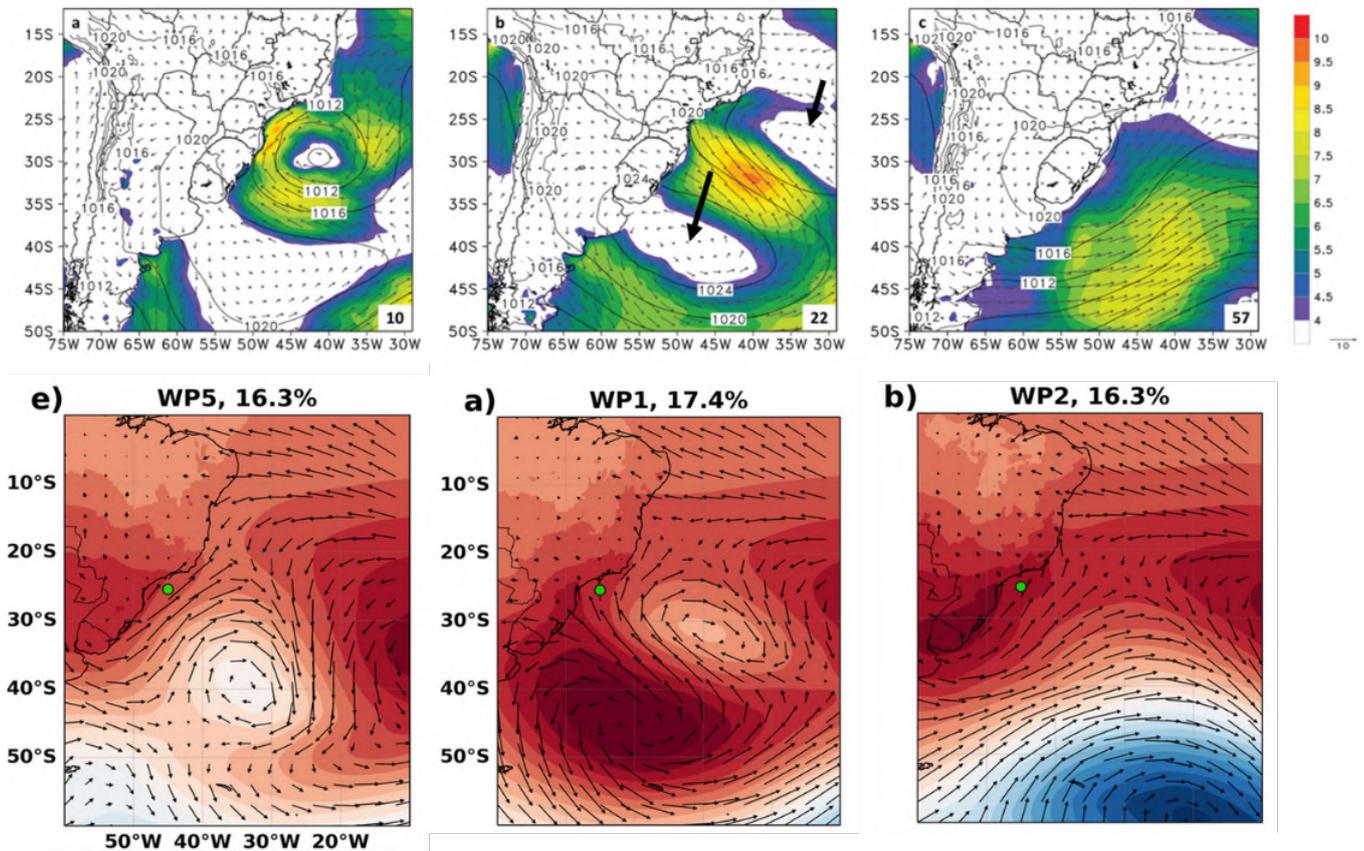


Figura 5.5: Comparação entre os 3 padrões encontrados por Sondermann et al. (2023) e os WP5, WP1 e WP2 de Santos.

Gramscianinov et al. (2020a) detectaram e rastream a trajetória de ciclones que geraram extremos de ondas na costa S e SE do Brasil. Os autores selecionaram os 10 casos mais extremos, e as condições atmosféricas alinharam-se com o WP 1 e 3 de Rio Grande e o WP 5 de Santos, sistemas ciclônicos que induzem ondas extremas próximas à costa. Gramscianinov et al. (2020a) mostram que a posição do anticiclone pós-frontal em relação ao centro do ciclone desempenha um papel significativo em ondas extremas de duas maneiras. Primeiro, devido ao aumento do gradiente de pressão horizontal e, conseqüentemente, da velocidade do vento de superfície, uma intensificação do alcance é causada neste setor do ciclone. Em segundo lugar, afetando a velocidade de movimento do ciclone, determina o posicionamento do alcance e, conseqüentemente, a geração de ondas. Machado et al. (2019) também enfatizam que a posição do alto pós-frontal é o mecanismo primário de geração de ondulações para essas regiões.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, que exibem a evolução média dos padrões atmosféricos antecedendo as datas dos WPs, pode-se observar que esses sistemas ciclônicos geradores de extremos são relativamente lentos, o que pode ter gerado as ondas extremas no Sul (Rio Grande) e Sudeste (Santos) da costa brasileira. Como são campos médios, não é possível determinar a velocidade exata de propagação. No entanto, pode-se observar (Figura 4.12) que todos os WPs associados a ciclones ou cavados (WP1, WP2, WP4, WP5 e WP6 de Santos) têm um padrão sinótico semelhante ao WP correspondente nas 48 horas que antecedem o evento extremo. Isso indica que a condição de ciclone/cavado não se propagou rapidamente e estava presente 48 horas antes do evento. A situação para o Rio Grande (Figura 4.13) não é diferente.

No trabalho de Machado et al. (2010), citado anteriormente no capítulo da Revisão Bibliográfica, os padrões encontrados também são semelhantes com o WP4 e WP1 de Rio Grande, sendo o WP4 o padrão anticiclônico e o WP1 um padrão ciclônico.

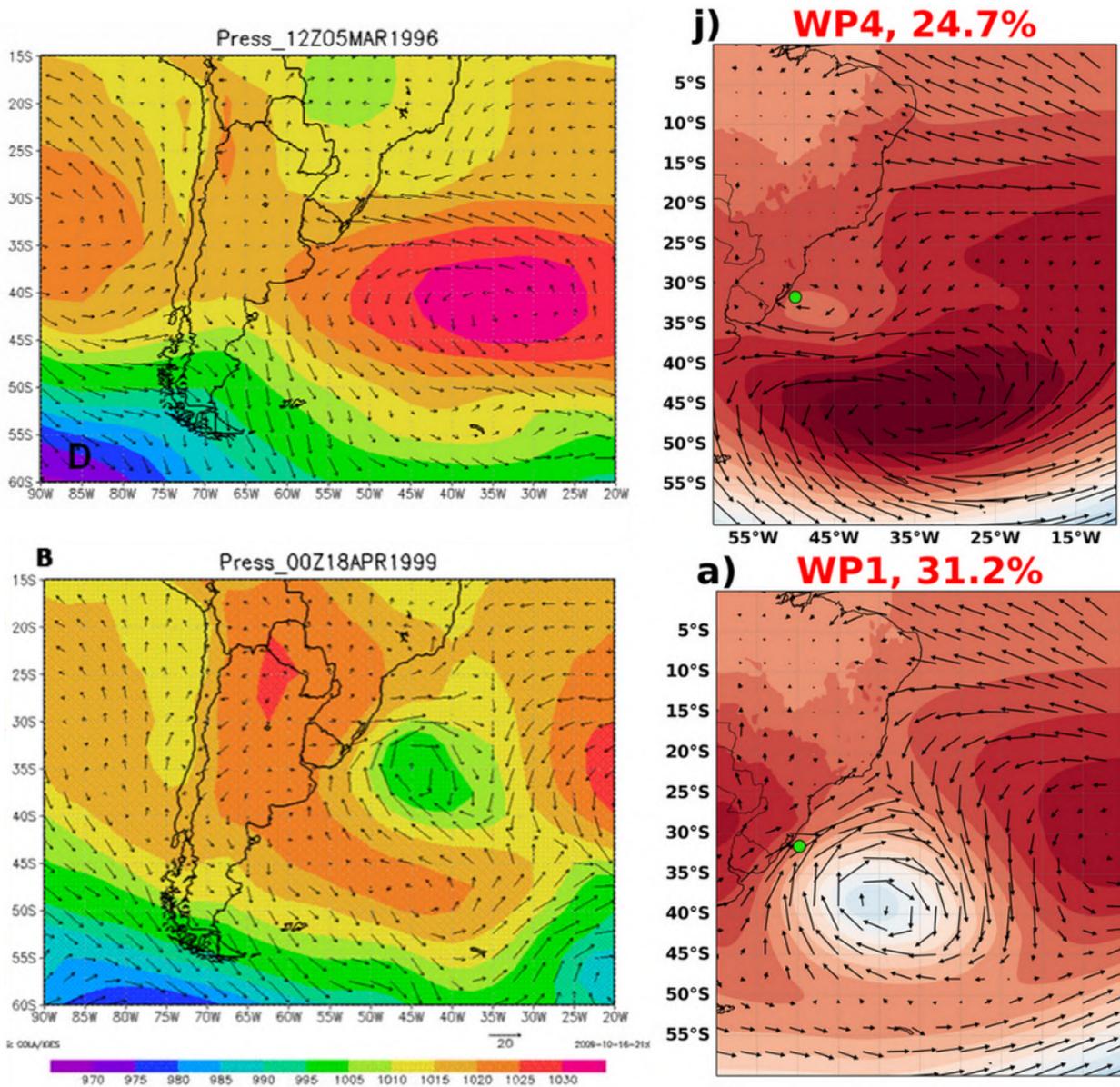


Figura 5.6: *Weather Patterns* de Vitória e seus respectivos campos médios de Hs e direção de pico, bem como as rosas de ondas associadas.

Pianca et al. (2010) estudaram o clima de ondas ao largo da costa brasileira e no Setor 3 do estudo, perto da Baía do Espírito Santo e os autores destacam a dominância do ASAS e a passagem de sistemas transientes como os sistemas que regem o clima naquele ponto. Em seus resultados, é evidente que o inverno tem uma maior frequência de ondas mais energéticas e predominantemente orientadas para E, enquanto o verão é a estação com as ondas menos energéticas. Essas condições estão consistentes com a distribuição de frequência dos WPs para Vitória, conforme mostrado na Figura 4.7-a, onde extremos não são detectados no verão (DJF) e a maior energia está associada ao inverno austral (JJA).

Durante esta estação, há um aumento da passagem de sistemas transientes que induzem ondas SW/S ($H_s > 2$) e ondas SE ($H_s > 1,5$) na Bacia do Espírito Santo (Nogueira, 2014; Castelli, 2021). Essas condições são refletidas nos WPs representando anticiclones no sudoeste do Atlântico Sul, que foram identificados como sendo associados a ondas extremas no ponto de Vitória (Figura 4.4). O estudo de Castro Firmino e Rosa Bulhões (2020) revelou que sistemas ciclônicos geram as ondas SW mais energéticas, mas a costa do ES é amplamente protegida delas. Além disso, eventos extremos também ocorrem sob condições de ondas SE associadas a altas pós-frontais à medida que o ciclone se afasta da costa e o sistema de alta pressão começa a dominar, redirecionando as ondas de SW para SE/E. Este último padrão está consistente com os WPs encontrado para Vitória, que todos se assemelham à dominância de altas pós-frontais.

Em sua pesquisa sobre o clima de ondas, Camus et al. (2014) utilizaram uma abordagem de *Weather Typing* e o agrupamento K-Means, identificando quatro tipos principais de WPs responsáveis por ondas extremas. Pringle et al. (2014) também destaca a importância de WPs específicos em eventos de ondas extremas, com descobertas semelhantes ao longo da costa brasileira, indicando uma relevância global desses padrões na geração de ondas. Além disso, De Leo et al. (2020) também usaram uma metodologia comparável revelando que sistemas ciclônicos que afetam a costa italiana têm paralelos no Atlântico Sul, pela semelhança entre os WPs encontrados pelo autor e pelos WPs encontrados no presente trabalho. Isso sugere que os mecanismos atmosféricos impulsionam eventos de ondas extremas em regiões diferentes. Ambos os estudos observaram uma frequência reduzida de eventos extremos durante o verão, onde se tem menos passagem dos sistemas atmosféricos transientes.

Os achados de Solari e Alonso (2017) em relação à costa uruguaia lançam luz sobre WPs que se alinham notavelmente com os padrões identificados em nossa investigação para o Rio Grande. As semelhanças são evidentes, especialmente considerando as proximidades geográficas das duas áreas de estudo, indicam que os mesmo sistemas atmosféricos provavelmente influenciam eventos extremos em ambas as regiões, o que é possível observar na Figura 5.7. Essa constatação mostra o papel crucial dos WPs no entendimento de eventos de ondas extremas no Atlântico Sul-Sudoeste. Tais percepções são cruciais para aprofundar nosso entendimento da dinâmica costeira e têm implicações significativas para os empreendimentos de engenharia e gestão de riscos da região.

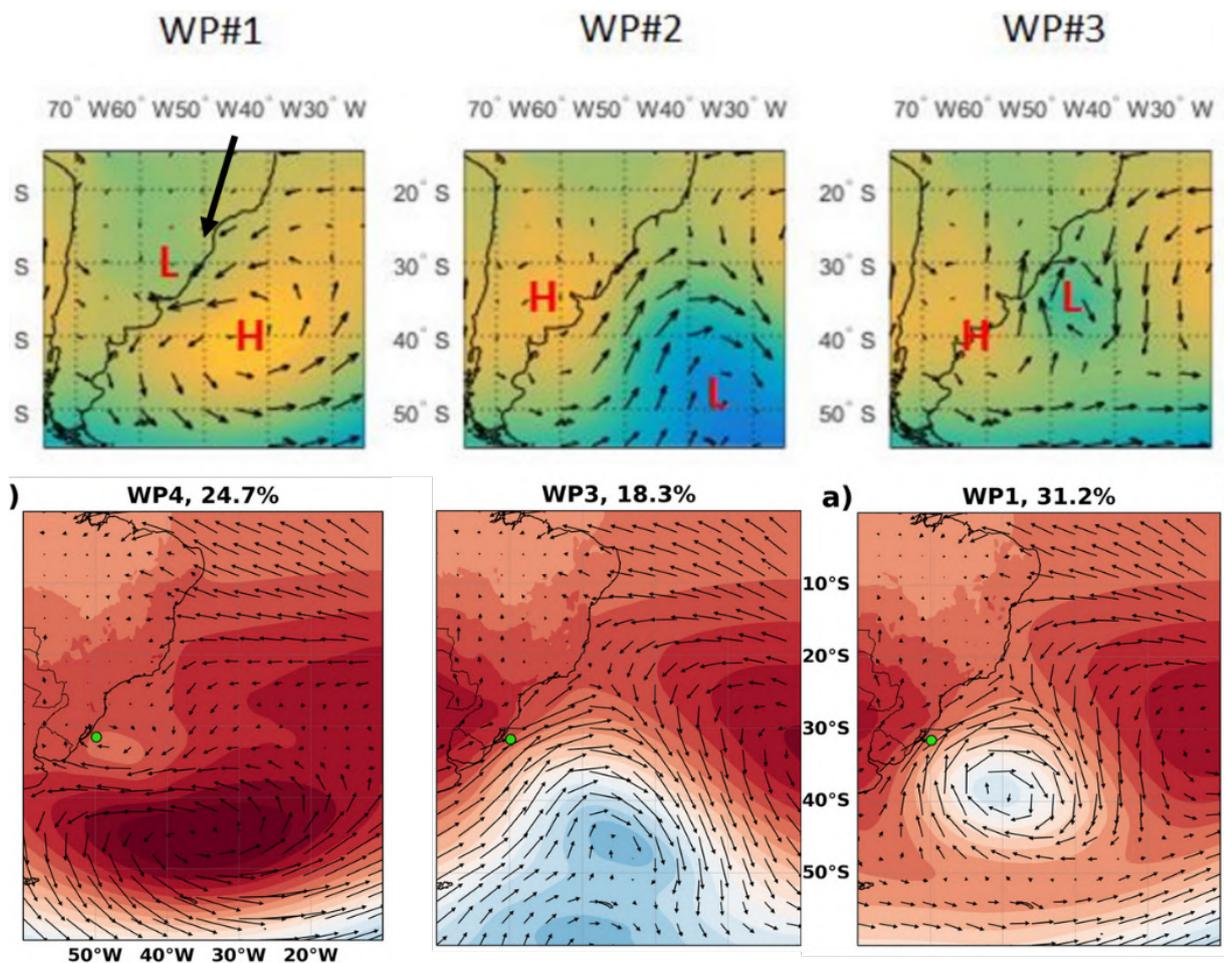


Figura 5.7: Comparação dos padrões atmosféricos encontrados por Solari e Alonso (2017) e os WPs encontrados para Rio Grande

Considerações Finais

O estudo identifica condições sinóticas semelhantes associadas a eventos de ondas extremas em três locais-chave. O método de agrupamento K-Means categoriza eficazmente as condições atmosféricas ligadas a esses extremos, confirmando padrões reconhecidos em Campos (2009); Melo et al. (2010); Machado et al. (2010, 2019); Gramscianinov et al. (2020a); Pianca et al. (2010); Nogueira (2014); Castro Firmino e Rosa Bulhões (2020); Solari e Alonso (2017); Sondermann et al. (2023) como influentes na geração de ondas extremas.

Apesar de poucos casos extremos (95 para Vitória, 92 para Santos e 93 para Rio Grande), dentro de 25 anos de dados diários, vale lembrar que esses casos estão associados aos dias que excedem o percentil 99 de Hs. Provavelmente, se selecionarmos outro percentil (95 ou 97,5) que também podem ser utilizados como critério para extremos de onda, mais eventos aparecerão. Essa decisão poderia impactar na determinação dos WPs, podendo aparecer amostras de eventos que não estão contidos nos dias que excederam o percentil 99.

A região costeira central do Brasil, especificamente em torno do ponto da boia de Vitória, é comparativamente menos estudada no contexto de extremos de ondas do que as áreas em torno de Santos e Rio Grande. A costa do Espírito Santo é mais protegida das ondas SW associadas a ciclones transitando pelo Atlântico Sul Ocidental, resultando em eventos de ondas extremas menos frequentes e, conseqüentemente, ondas menores nesta região. Nogueira (2014); Castro Firmino e Rosa Bulhões (2020) sugerem uma mudança direcional significativa das ondas de SW/S para SE/E ao longo da costa brasileira, com as ondas SE/E identificadas como mais impactantes e danosas para as regiões costeiras. Consistente com esses achados, a pesquisa atual indica especificamente que as ondas extremas

na área de Vitória estão predominantemente associadas a direções de ondas S/SE.

Os extremos na região costeira sudeste, perto da boia de Santos, são influenciados tanto por ciclones quanto por anticiclones transitando pelo SW do Atlântico Sul. A presença simultânea desses sistemas nos WPs de Santos intensifica as faixas de vento S/SW, levando a condições extremas de onda nesta área.

A região costeira sul, particularmente perto do local do Rio Grande, mostra menos variabilidade nos padrões atmosféricos associados a extremos de onda. Esta região é mais suscetível aos efeitos das faixas de vento SW de ciclones e cavados que se movem pelo SW do Atlântico Sul. Esta área está mais próxima das regiões de ciclogênese no SW do Atlântico Sul e é diretamente influenciada por ondas baroclínicas que se movem para leste na parte sul deste oceano.

As faixas de vento SW e S são os principais impulsionadores de ondas extremas nas porções sul e sudeste da costa brasileira. Em contraste, a região central, incluindo a área em torno de Vitória, experimenta condições extremas de onda principalmente devido a faixas de vento SE, que são significativamente influenciadas por altas pós-frontais que se movem para leste.

Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Este estudo, embora abrangente em sua análise WPs associados a eventos de onda extrema em três locais importantes economicamente, apresenta algumas limitações intrínsecas que fornecem oportunidades para pesquisas futuras. Uma limitação é a escolha do percentil 99 como critério para definir eventos extremos. Essa abordagem dá foco nos eventos mais raros e intensos, mas simultaneamente exclui uma gama mais ampla de eventos que, apesar de menos extremos, ainda podem ser significativos e impactantes. A utilização de limiares de percentil mais baixos, como 95 ou 97,5, poderia abranger um espectro mais amplo de eventos extremos, proporcionando uma compreensão maior da variabilidade de fenômenos que geram extremos nessas regiões.

Além disso, uma análise mais detalhada dos níveis atmosféricos de 500hPa e 200hPa para cada *Weather Pattern* identificado poderia enriquecer significativamente nossa compreensão da dinâmica atmosférica subjacente a esses eventos. Examinar esses níveis superiores permitiria uma avaliação mais profunda dos mecanismos de propagação e alimentação, bem como a evolução dos sistemas atmosféricos que influenciam a geração de ondas extremas.

Esse trabalho traz luz para próximas análises e estudos, abrindo caminho para a investigação da percentagem de migração de um WP para outro. Esta análise pode revelar tendências significativas na evolução dos padrões atmosféricos e suas implicações em eventos de ondas extremas. Além disso, a aplicação desses padrões como ferramenta preditiva apresenta um potencial considerável. Observando a geração e a progressão dos WPs antes dos eventos extremos, seria possível desenvolver sistemas de alerta antecipado, aumentando a capacidade de prevenir ou mitigar os riscos associados a tais eventos.

A implementação de modelos baseados em WPs para previsão de eventos de ondas

extremas poderia significativamente aprimorar as medidas de segurança para atividades costeiras e marítimas, como a navegação, pesca, e operações de plataformas *offshore*. Com a capacidade de antecipar a ocorrência de ondas extremas com base em mudanças nos padrões atmosféricos, autoridades e profissionais do setor poderiam tomar decisões mais informadas e preparar respostas adequadas. Este enfoque proativo não apenas aumentaria a segurança, mas também ajudaria a minimizar os impactos econômicos adversos desses eventos naturais imprevisíveis.

Referências Bibliográficas

- Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, 2021 Blocos Exploratórios sob Concessão e Campos de Produção. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/dados-tecnicos/shapefile-de-dados>. [Online; Acesso em: 10 de dezembro de 2022]
- Arthur D., Vassilvitskii S., K-Means++: The Advantages of Careful Seeding , vol. 8, 2007, p. 1027
- Baur F., Extended-Range Weather Forecasting, Compendium of Meteorology, 1951
- Beck C., Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780, Würzburger Geographische Arbeiten Heft, 2000
- Beck C., Jacobeit J., Jones P., Frequency and within-type variations of large-scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in central europe since 1780, International Journal of Climatology, 2007
- Bettolli M., Penalba O., Vargas W., Synoptic weather types in the south of South America and their relationship to daily rainfall in the core crop-producing region in Argentina, Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 2010, vol. 60, p. 37
- Brian Dilley F., The statistical relationship between weather-type frequencies and corn (maize) yields in southwestern Pennsylvania, USA, Agricultural and Forest Meteorology, 1992, vol. 59, p. 149
- Buchner B., Bunnik T., Extreme Wave Effects on Deepwater Floating Structures, Sea Technology, 2007, vol. 49

- Calliari L. J., Calliari L. J., Tozzi H. A. M., Klein A. H., Klein A., Klein A. H. F., Beach morphology and costline erosion associated with storm surges in southern Brazil-Rio Grande to Chui, RS, Anais Da Academia Brasileira De Ciencias, 1998
- Campos R. M., , 2009 Análise dos extremos de onda no Rio de Janeiro associados a ciclones extratropicais no Atlântico Sul
- Campos R. M., Alves J. H. G. M., Soares C. G., Guimaraes L. G., Parente C. E., Extreme wind-wave modeling and analysis in the south Atlantic ocean, *Ocean Modelling*, 2018, vol. 124, p. 75
- Camus P., Menéndez M., Méndez F. J., Izaguirre C., Espejo A., Cánovas V., Pérez J., Rueda A., Losada I. J., Medina R., A weather-type statistical downscaling framework for ocean wave climate, *J. Geophys. Res. Oceans*, 2014, vol. 119, p. 7389
- Castelli L. C., Análise de extremo de ondas na bacia do Espírito Santo baseado em modelagem numérica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, 2021, Dissertação de mestrado
- Castro Firmino L. A., Rosa Bulhões E. M., Aspectos das ondas oceânicas em áreas de erosão costeira. Litoral do Espírito Santo, Brasil, Finisterra, 2020, vol. 55, p. 23
- Chandrasekaran S., Koshti Y., Dynamic analysis of a Tension Leg Platform under extreme waves, *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*, 2013, vol. 10
- Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.), 2023 Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- Davis R., A synoptic climatological analysis of winter visibility trends in the mideastern United States, *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 1991, vol. 25, p. 165
- Davis R. E., Kalkstein L. S., Development of an automated spatial synoptic climatological classification, *International Journal of Climatology*, 1990

- De Leo F., Solari S., Besio G., Extreme wave analysis based on atmospheric pattern classification: an application along the Italian coast, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2020, vol. 20, p. 1233
- Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes Agência Nacional de Águas, 2000 Dados sobre Portos no Brasil <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/0afc9687-db93-4eb1-ab31-3bbd871ff303>
- E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS)*, 2023 GLOBAL_REANALYSIS_WAV_001_032: WAVERYS Global Wave Reanalysis
- Fovell R. G., Fovell M.-Y. C., Climate zones of the conterminous United States defined using cluster analysis, *Journal of Climate*, 1993
- Frakes B., Yarnal B., A procedure for blending manual and correlation-based synoptic classifications, *International Journal of Climatology*, 1997
- Gan M. A., , 1992 Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul
- Gan M. A., Gan M. A., Rao V. B., Rao V. B., Surface Cyclogenesis over South America, *Monthly Weather Review*, 1991
- Ghil M., Yiou P., Hallegatte S., Malamud B. D., Naveau P., Soloviev A., Friederichs P., Keilis-Borok V., Kondrashov D., Kossobokov V., Mestre O., Nicolis C., Rust H. W., Shebalin P., Vrac M., Witt A., Zaliapin I., Extreme events: dynamics, statistics and prediction, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2011, vol. 18, p. 295
- Gramcianinov C., Campos R., Guedes Soares C., de Camargo R., Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean, *Ocean Engineering*, 2020a, vol. 213, p. 107745
- Gramcianinov C., Campos R., Guedes Soares C., de Camargo R., Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean, *Ocean Engineering*, 2020b, vol. 213, p. 107745
- Gramcianinov C. B., Staneva J., Souza C. R. G., Linhares P., de Camargo R., da Silva Dias P. L., , 2023 in von Schuckmann K., Moreira L., Traon P.-Y. L., Grégoire M., Marcos M., Staneva J., Brasseur P., Garric G., Lionello P., Karstensen J., Neukermans G., eds,

- , Vol. 1-osr7, 7th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR7). Copernicus Publications p. 12
- Hartigan J. A., Wong M. A., Algorithm AS 136: A K-Means Clustering Algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 1979, vol. 28, p. 100
- Hay L., McCabe G., Wolock D., Ayers M., Simulation of Precipitation by Weather Type Analysis, *Water Resources Research - WATER RESOUR RES*, 1991, vol. 27, p. 493
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Biavati G., Horányi A., Muñoz Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Rozum I., Schepers D., Simmons A., Soci C., Dee D., Thépaut J.-N., , 2023 ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present
- Hess P., Brezowsky H., Katalog der Grosswetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, Deutscher Wetterdienst in d. US-Zone, 1952
- Huth R., AN INTERCOMPARISON OF COMPUTER-ASSISTED CIRCULATION CLASSIFICATION METHODS, *International Journal of Climatology*, 1996
- Huth R., Beck C., Philipp A., Demuzere M., Ustrnul Z., Cahynová M., Kyselý J., Tveito O. E., Classifications of Atmospheric Circulation Patterns, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2008
- Jiménez P. A., González-Rouco J. F., Montávez J. P., García-Bustamante E., Navarro J., Climatology of wind patterns in the northeast of the Iberian Peninsula, *International Journal of Climatology*, 2009, vol. 29, p. 501
- Jones P., Hulme M., Briffa K. R., A COMPARISON OF LAMB CIRCULATION TYPES WITH AN OBJECTIVE CLASSIFICATION SCHEME, *International Journal of Climatology*, 1993
- Kalkstein L., Direct impacts in cities, *The Lancet*, 1993, vol. 342, p. 1397
- Kalkstein L. S., A new approach to evaluate the impact of climate on human mortality., *Environmental health perspectives*, 1991, vol. 96, p. 145
- Kalkstein L. S., Corrigan P., A Synoptic Climatological Approach For Geographical Analysis: Assessment of Sulfur Dioxide Concentrations, *Annals of the Association of American Geographers*, 1986, vol. 76, p. 381

- Kalkstein L. S., Dunne P. C., Vose R. S., Detection of Climatic Change in the Western North American Arctic Using a Synoptic Climatological Approach, *Journal of Climate*, 1990, vol. 3, p. 1153
- Kaufman L., Rousseeuw P. J., *Finding Groups in Data*, null, 1990
- Lamb H., *British Isles Weather Types and a Register of the Daily Sequence of Circulation Patterns 1861-1971*. Geophysical memoirs, H.M. Stationery Office, 1972
- Lamb H. H., *Types and spells of weather around the year in the British Isles : Annual trends, seasonal structure of the year, singularities*, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1950
- Law-Chune S., Aouf L., Dalphinet A., Levier B., Drillet Y., Drevillon M., *WAVERYS: a CMEMS global wave reanalysis during the altimetry period*, *Ocean Dynamics*, 2021, vol. 71, p. 357
- Lund I. A., *Map-Pattern Classification by Statistical Methods*, *Journal of Applied Meteorology*, 1963
- Machado A. A., Calliari L., Melo E., Klein A. H., *Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes*, *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 2010, vol. 5, p. 277
- Machado J. P., Miranda G. S. B., Gozzo L. F., de Souza Custódio M., *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
- MacQueen J., et al., *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability* , vol. 1, 1967, p. 281
- Marinha do Brasil, 2023 Programa Nacional de Boias (PNBOIA) <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/pnboia>
- Marone E., De Camargo R., *Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993*, *Nerítica*, 1994, vol. 8, p. 73

- Melo E., Romeu M., Hammes G., Extreme sea state conditions off rio grande based on the ww3 model, The Fourth Semiário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2010
- Neal R., Robbins J., Dankers R., Mitra A., Jayakumar A., Rajagopal E., Adamson G., Deriving optimal weather pattern definitions for the representation of precipitation variability over India, *International Journal of Climatology*, 2019, vol. 39, p. 3756
- Nguyen-Le D., Yamada T., Using Weather Pattern Recognition to Classify and Predict Summertime Heavy Rainfall Occurrence over the Upper Nan River Basin, Northwestern Thailand, *Weather and Forecasting*, 2019, vol. 34, p. 447
- Nguyen-Le D., Yamada T., Tran-Anh D., Classification and forecast of heavy rainfall in northern Kyushu during Baiu season using weather pattern recognition, *Atmospheric Science Letters*, 2017, vol. 18, p. 499
- Nogueira I. C. M., Caracterização do clima de ondas na Bacia do Espírito Santo através de modelagem numérica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, 2014, Dissertação de mestrado
- 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
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Édouard Duchesnay Scikit-learn: Machine Learning in Python, *Journal of Machine Learning Research*, 2011, vol. 12, p. 2825
- Pereira H., violante carvalho N., Nogueira I., Babanin A., Liu Q., Pinho U., Nascimento F., Ribeiro C., Wave observations from an array of directional buoys over the southern Brazilian coast, *Ocean Dynamics*, 2017, vol. 67
- 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
- Pringle J., Stretch D. D., Bárdossy A., Automated classification of the atmospheric circulation patterns that drive regional wave climates, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2014, vol. 14, p. 2145

- 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
- Rodgers J., Nicewander A., Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient, *American Statistician - AMER STATIST*, 1988, vol. 42, p. 59
- Romeu M., Fontoura J. A., Melo E., Typical Scenarios of Wave Regimes off Rio Grande do Sul, Southern Brazil, *Journal of Coastal Research*, 2015, vol. 299, p. 61
- Rossouw J., Coetzee L., Visser C., A SOUTH AFRICAN WAVE CLIMATE STUDY, *Coastal Engineering Proceedings*, 1982, vol. 1, p. 6
- Rueda A., Camus P., Tomas A., Vitousek S., Mendez F., A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on weather patterns, *Ocean Modelling*, 2016, vol. 104
- Saraiva J. M. B., Monitoring of Storm Surges on Cassino Beach, RS, Brazil, null, 2003
- Solari S., Alonso R., A NEW METHODOLOGY FOR EXTREME WAVES ANALYSIS BASED ON WEATHER-PATTERNS CLASSIFICATION METHODS, *Coastal Engineering Proceedings*, 2017, vol. 1, p. waves.23
- 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
- Thorndike R. L., Who belongs in the family?, *Psychometrika*, 1953, vol. 18, p. 267
- Veldman A., Luppens R., Bunnik T., Huijsmans R., Duz B., Iwanowski B., Wemmenhove R., Borsboom M., Wellens P., van der Heiden H., Plas P., Extreme Wave Impact on Offshore Platforms and Coastal Constructions , vol. 7, 2011
- Wallén C. C., Flohn H., Witterung und Klima in Mitteleuropa, *Geografiska Annaler*, 1956
- Weisse R., Günther H., Wave climate and long-term changes for the Southern North Sea obtained from a high-resolution hindcast 1958–2002, *Ocean Dynamics*, 2007, vol. 57, p. 161

- Wilks, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences 2 edn. International Geophysics, Academic Press, 2014
- Yi Z., Wang Y., Chen W., Guo B., Zhang B., Che H., Zhang X., Classification of the Circulation Patterns Related to Strong Dust Weather in China Using a Combination of the Lamb–Jenkinson and k-Means Clustering Methods, *Atmosphere*, 2021, vol. 12, p. 1545
- Yiou P., Nogaj M., Extreme climatic events and weather regimes over the North Atlantic: When and where?, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, vol. 31
- Young I. R., Wind Generated Ocean Waves elsevier edn. Elsevier Ocean Engineering Series 2, Elsevier, 1999