Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
Editora

PADRÕES ATMOSFÉRICOS ASSOCIADOS A EVENTOS DE RESSACA NO LITORAL SUL DO BRASIL

Atmospheric patterns associated with storm surge events on the south coast of Brazil

Patrones atmosféricos asociados a eventos de resaca en la costa sur de Brasil

Yago Brito Marinho
Universidade Federal do Rio Grande/Programa de Pós-Graduação em Oceanologia
ybm_26@hotmail.com

Jeferson Prietsch Machado
Universidade Federal do Rio Grande/Programa de Pós-Graduação em Oceanologia
jeferson.machado@furg.br

Jaci Maria Bilhalva Saraiva
Universidade Federal do Rio Grande
jaci.saraiva@furg.br

Resumo: O Litoral Sul do Brasil encontra-se em uma região em que ocorrem a passagem de ciclones extratropicais e de sistemas frontais que influenciam as condições de mar, através da formação de ressacas, causando impactos na costa, principalmente na atividade portuária, nos tripulantes, nas embarcações e na população que habita as regiões costeiras. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi de realizar um estudo dos eventos de ressaca no Litoral do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina e a variabilidade associada ao Fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), a partir de Avisos de Mau Tempo da Marina do Brasil e dados de reanálise ERA5. Os resultados mostram que as ressacas ocorrem em qualquer época do ano, mas com maior frequência durante o outono e o inverno. Os padrões associados no outono e inverno, indicam a presença de um maior gradiente de pressão atmosférica na área de estudo, favorecendo ao predomínio de ventos do quadrante sul e o consequente empilhamento de água na costa. Por fim, através do cálculo da instabilidade baroclínica, foi possível observar que as ressacas ocorridas durante as fases neutra e positiva do fenômeno ENOS estão associadas a passagem de ciclones extratropicais e sistemas frontais mais intensos, quando comparados com períodos de La Niña.

Palavras-chave: Climatologia. Ciclones Extratropicais. Vento. Ondas. El Niño-Oscilação Sul.

Abstract: The southern coast of Brazil is a region where extratropical cyclones and frontal systems pass through, influencing sea conditions through the formation of storm surges, causing impacts on the coast, especially on port activity, crew members, vessels and the population living in coastal regions. In view of the above, the aim of this work was to carry out a study of storm surge events on the coasts of Rio Grande do Sul and Santa Catarina and the variability associated with the El Niño-Southern Oscillation Phenomenon, based on Weather Warnings from the Brazilian Navy and ERA5 reanalysis data. The results show that storm surges occur at any time of the year, but more frequently during the autumn and winter. The patterns associated with autumn and winter indicate the presence of a greater atmospheric pressure gradient in the study area, favoring the predominance of winds from the southern quadrant and the consequent piling up of water on the coast. Finally, through the calculation of baroclinic instability, it was possible to observe that the storm surges occurring during the neutral and positive phases of the ENSO phenomenon are associated with the passage of more intense extratropical cyclones and frontal systems, when compared to periods of La Niña.

Keywords: Climatology. Extratropical cyclones. Winds. Waves. El Niño-Southern Oscillation.

Resumen: El litoral sur de Brasil es una región de ocurrencia de ciclones extratropicales y sistemas frontales que influyen en las condiciones del mar a través de la formación de resacas, causando impactos en la costa, especialmente en la actividad portuaria, tripulantes, embarcaciones y población residente en las regiones costeras. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo fue realizar un estudio de los eventos de resaca en las costas de Rio Grande do Sul y Santa Catarina y de la variabilidad asociada al Fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur, a partir de los Avisos de Mal Tiempo de la Marina do Brasil y de los datos del reanálisis ERA5. Los resultados muestran que las resacas se producen en cualquier época del año, pero con mayor frecuencia durante el otoño y el invierno. Los patrones asociados al otoño y al invierno indican la presencia de un mayor gradiente de presión atmosférica en la zona de estudio, favoreciendo el predominio de los vientos del cuadrante sur y el consiguiente amontonamiento de agua en la costa. Finalmente, mediante el cálculo de la inestabilidad baroclínica, se observó que las resacas que ocurren durante las fases neutra y positiva del fenómeno ENSO están asociadas a condiciones de ciclones extratropicales y sistemas frontales más intensos, en comparación con los períodos de La Niña.

Palabras clave: Climatología. Ciclones extratropicales. Vientos. Olas. El Niño-Oscilación del Sur.

Submetido em: 26/11/2023
Aceito para publicação em: 13/05/2024
Publicado em: 18/07/2024

1. INTRODUÇÃO

O Sul do Brasil passa frequentemente por variações extremas de tempo, possuindo períodos chuvosos ou estiagem, com temperaturas elevadas ou períodos de frio intenso. O principal sistema atmosférico responsável pelas chuvas é a frente fria, que ocorre com frequência em todas as estações do ano (Cavalcanti e Kousky, 2016). Vale ressaltar que as frentes frias, assim como ciclones extratropicais e subtropicais, influenciam o comportamento do mar. De um modo geral, ciclones extratropicais intensos são associados com condições meteorológicas extremas, como tempestades severas, ocasionando riscos à população e à economia, principalmente às atividades portuárias, além de danos costeiros, como erosão de praias.

As oscilações do nível do mar respondem às condições astronômicas, oceanográficas e atmosféricas (Gill, 1982). Esses estados extremos aumentam a agitação marinha e facilitam a irradiação das ondas para o litoral (Pond e Pickard, 1983). Além disso, esses fenômenos influenciam na ocorrência de oscilação de baixa frequência do nível do mar, chamadas de marés meteorológicas (Truccolo *et al*., 2006).

A maré meteorológica é definida como a diferença entre a maré observada e a maré astronômica prevista, sendo causada por variações atmosféricas e transferência de momentum entre os ventos e a superfície do oceano por meio do cisalhamento entre o ar e a superfície oceânica (Pugh, 1987). Este fenômeno é a causa do aumento (positivo) ou diminuição (negativo) do nível do mar em determinado local em relação às previsões de maré (Marone e Camargo, 1994). O fenômeno é positivo quando a maré meteorológica é maior que a prevista pela maré astronômica, o que implica na inundação de locais onde a maré normalmente não alcança, que é conhecido como ressaca (Marone e Camargo, 1994).

Desta forma, a ressaca é definida pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM) como o aumento do nível do mar anormal causado por tempestades, sendo fortes ventos tropicais ou tempestades de latitudes médias as causas primárias. As ressacas são formadas devido a fricção dos ventos sobre a superfície do mar que causa a transferência de momentum da atmosfera para o oceano. Quando os centros de pressões atmosféricas estão dispostos de forma que o centro de alta e de baixa pressão se encontram, respectivamente, no continente e no oceano, forma-se uma pista de vento paralela à costa. Esses ventos passam a receber influência da rotação da Terra por causa do efeito de Coriolis. No

Hemisfério Sul a componente do vento paralela à costa tem uma resultante à esquerda do movimento (Pugh, 1987; Benavente *et al*. 2006). Com isso, o transporte de Ekman empilha ou retira água da costa, de acordo com a direção do vento (Stewart, 2005). De acordo com os autores, o empilhamento de água ocorre devido à força do vento na superfície do mar, que causa o aumento temporário do nível do mar, principalmente, durante a maré meteorológica.

Devido ao fato de o Brasil possuir um território com uma grande extensão litorânea, grande parte do país está exposto às condições de tempo associadas à passagem de frentes frias e à atuação de ciclones extratropicais e subtropicais, favorecendo condições de mar agitado com certa frequência, principalmente no litoral das regiões Sul e Sudeste (Parise *et al*., 2009). Conforme Eguchi e Klumb-Oliveira (2023), a costa brasileira possui uma climatologia de ondas diversificada, isso em função das diferentes orientações da linha de costa e dos diferentes sistemas meteorológicos atuantes. Consequentemente, praias e dunas sofrem fortes processos erosivos devido às ondas intensificadas pelas tempestades (Leal *et al*., 2020). O empilhamento das ondas durante o período de maré astronômica de sizígia intensifica a erosão na costa por ser mais alta que o normal (Parise *et al*., 2009).

Parise *et al*. (2009), utilizando da primeira geração de reanálises (NCEP/NCAR I), encontraram três padrões de trajetória dos ciclones responsáveis pela elevação do nível do mar ao longo do Oceano Atlântico Sul. O padrão I consiste na ciclogênese ao sul da Argentina com deslocamento para leste e trajetória entre 47,5º S e 57,5º S. O padrão II é a ciclogênese ao sul do Uruguai com deslocamento para leste e trajetória entre 35º S e 42.5º S. Já o padrão III compreende a ciclogênese ao sul do Uruguai com deslocamento para sudeste e trajetória entre 35º S e 57.5º S.

A variabilidade climática também exerce influência no que diz respeito a eventos de ressaca. Os anos de 2015 e 2016 foram caracterizados pela ocorrência da fase positiva do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS), denominada de El Niño, quando foram observadas anomalias positivas de temperatura da superfície do mar (TSM) na região do Pacífico Equatorial superiores a 2°C durante 2015 e 2016.

No litoral brasileiro são registradas condições severas na região Sul-Sudeste do país, principalmente durante o outono, entre abril e junho (Candella *et al*., 2013), sendo que cerca de 65% das ocorrências de ressacas são durante essa estação (Saraiva *et al*., 2003). Entre os

anos de 2007 e 2016 a média anual de ressacas ocorridas no litoral Sul-Sudeste foi de 24 eventos, sendo nos anos de 2015 e 2016 os que mais ocorram ressacas, principalmente no litoral do Rio Grande do Sul, devido a influência do evento El Niño de intensidade muito forte ocorrido nesses anos, sendo o total de 53 episódios do fenômeno (Machado *et al*., 2019).

Segundo Bitencourt *et al*. (2002), o perigo que tripulantes, embarcações e a população que habita as regiões costeiras são submetidos frente a condições adversas do mar e os inúmeros prejuízos socioeconômicos contabilizados devido à ocorrência de ressaca, torna o estudo deste fenômeno de maior importância, de modo a compreender melhor os processos físicos que provocam a agitação marítima.

Vale ressaltar que as projeções climáticas disponíveis no 6º Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPPC AR6) indicam um aumento do nível do mar e a maior ocorrência de eventos extremos na região de estudo em diferentes cenários de aquecimento. Logo, é provável que a ocorrência de eventos extremos associados a ciclones nas regiões costeiras venha a ocorrer com maior frequência, com mais ressacas, erosão costeira e impactos nas atividades econômicas e na população em geral que habitam essas regiões. Destaca-se que mais da população brasileira habita a faixa litorânea do país (IBGE, 2022).

Há ainda o fato de haver a escassez de estudos e de dados que explorem esse assunto, requerendo mais pesquisas na área a fim de analisar, compreender e caracterizar o comportamento da atmosfera durante a ocorrência de ressaca, principalmente em períodos de El Niño que favorecem condições de maior instabilidade atmosférica e ciclogêneses nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, interferindo nas condições do mar em suas respectivas áreas costeiras. Neste contexto, vale destacar o recente estudo de Eguchi e Klumb-Oliveira (2023) que caracterizaram de forma abrangente o clima de ondas de tempestades na costa brasileira a partir da reanálise ERA5.

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo realizar uma abordagem dos eventos de ressaca no Litoral Sul do Brasil, bem como analisar a influência do fenômeno ENOS durante esses eventos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de interesse do trabalho consiste na zona ALFA (figura 1), denominada assim pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM). A zona ALFA corresponde à faixa costeira desde o Arroio Chuí (RS) até o Cabo de Santa Marta (SC). A extensão da área de estudo, bem como as coordenadas geográficas (sendo φ a latitude e λ a longitude) dos pontos de monitoramento relacionados às condições de tempo e mar nela presente, são informadas de acordo com a tabela 1.

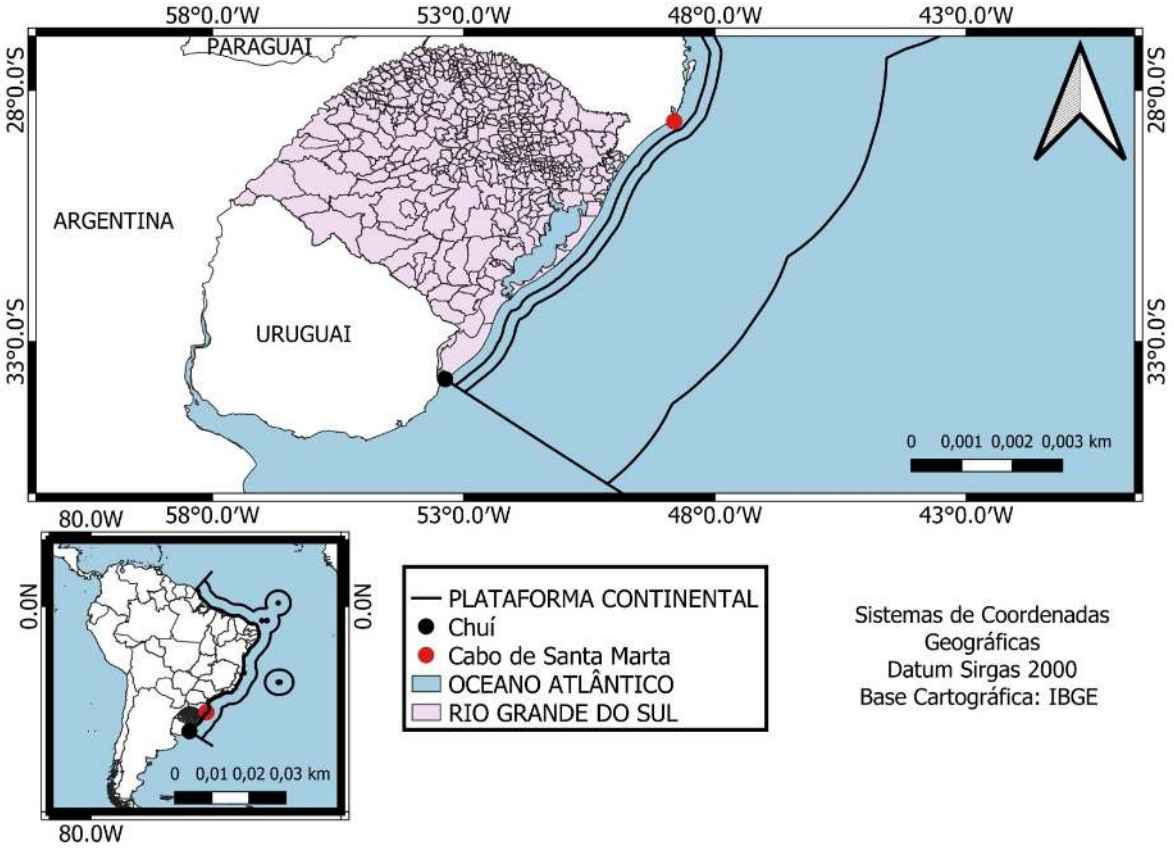
Tabela 1 - Área marítima ALFA: limites e pontos de monitoramento

ALFA (A): Arroio Chuí (RS) – Cabo de Santa Marta (SC)		
Pontos	**φ**	**λ**
1	33° 44’ S	53° 22’ W
2	36° 00’ S	48° 00’ W
3	31° 00’ S	43° 00’ W
4	28° 36’ S	48° 49’ W

Fonte: Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (CHM).

Pesquisas apontam que a área de estudo é uma região propícia para a formação de ciclones extratropicais, por ser uma região altamente baroclínica e, consequentemente, favorável ao desenvolvimento deste sistema (região ciclogenética) (Gan e Rao, 1991; Sinclair, 1994; Mendes *et al*., 2007). A atuação dos sistemas frontais e a passagem de ciclones extratropicais associados a esses sistemas, ocorre durante o ano todo na região Sul do Brasil, contribuindo para a alta frequência de precipitação (Reboita *et al*., 2010; Pampuch e Ambrizzi, 2016). Desta forma, observa-se na área de estudo ao longo do ano, situações em que os eventos de precipitação ocorrem na forma de tempestades (com ventos fortes, descargas elétricas, granizo). Consequentemente, situações de mar agitado ocorrem frequentemente no litoral sul do Brasil. De acordo com Satyamurty *et al*. (1990) as regiões do nordeste da Argentina, do Uruguai e o sul do Brasil são caracterizadas como as zonas de maior atividade de ciclones extratropicais (Satyamurty *et al*., 1990).

Figura 1 - Zona Alfa do Brasil localizada entre o Cabo de Santa Marta, Santa Catarina, até o Chuí, Rio Grande do Sul, do litoral do país até o limite da Plataforma continental.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

2.2 Dados e metodologia

Nesta seção serão abordados os conjuntos de dados utilizados no trabalho, envolvendo os Avisos de Mau Tempo da Marinha do Brasil, bem como os dados de reanálise do ERA5.

Os avisos de Mau Tempo são relatórios que identificam as condições temporais e marinhas de acordo com as condições do vento, neblina, mar grosso ou ressacas, sendo fornecidos e distribuídos pela Marinha do Brasil de forma imediata, e estão incluídos no Meteomarinha e outros boletins de previsão.

Os avisos são gerados por previsão meteorológica e validados após 24 horas com dados obtidos de múltiplas plataformas. Após sintetizados, os avisos são publicados no site https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-avisos-de-mau-tempo.

A metodologia seguiu os métodos descritos por Machado *et al*., 2019. Os dados de ressaca usados para esse trabalho foram obtidos do banco de dados da Marinha do Brasil através dos Avisos de Mau Tempo. A emissão dos relatórios ocorre quando uma ou mais condição pré-estabelecida de tempo ou mar sejam previstas. Neste estudo foram analisados os relatórios diários compreendendo o período entre janeiro de 2001 e dezembro de 2020. Logo, o estudo compõe todos os avisos que constavam a palavra "RESSACA" presentes para a área Alfa. Além disso, teve-se o cuidado para considerar somente os avisos de ressaca que não tiveram o cancelamento da informação posteriormente. É importante destacar que não foi possível obter os Avisos de Mau Tempo anteriores ao ano de 2001, com o intuito de completar a série climatológica de 30 anos.

Para realizar a separação em eventos de ressaca, foram considerados como um único evento os avisos que ocorreram de forma consecutiva ou com intervalo de um dia entre um aviso e outro. A partir de dois dias de diferença entre os avisos, foi considerado como um novo evento de ressaca. Com isso, foi feita a distribuição da frequência dos eventos de ressaca ocorridos na área de interesse, assim como a distribuição mensal e sazonal. A distribuição sazonal foi dividida de acordo com as estações do ano, sendo primavera (setembro, outubro e novembro), verão (dezembro, janeiro e fevereiro), outono (março, abril e maio) e inverno (junho, julho e agosto).

Após fazer a distribuição dos eventos de ressaca, foram feitas análises de campos médios de diferentes variáveis meteorológicas, em baixos e médios níveis da troposfera, através da reanálise do ERA5.

A reanálise ERA5 utilizada neste trabalho é a mais recente (5ª geração) do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, descrito em Hersbach *et al*. (2020). A reanálise possui resolução de 31 km, com 137 níveis atmosféricos desde a superfície (10 m) até 80 km, chegando a 0,01hPa. Os dados estão disponíveis de 1950 até os dias atuais em https://cds.climate.copernicus.eu/. Foram utilizados os seguintes dados diários entre janeiro de 1991 e dezembro de 2020: vento zonal e meridional (10 metros da superfície, 850 e 500 hPa), pressão ao nível médio do mar (PNMM), temperatura do ar e altura geopotencial em 1000 e 500 hPa. Também foram utilizados dados diários referentes à altura significativa e direção da onda provenientes da Reanálise do ERA5.

A análise dos campos médios a partir do ERA5 foi realizada a partir da diferença entre a climatologia e média dos eventos de ressaca, considerando somente os dias em que elas ocorreram. No caso de eventos que se estenderam por mais de um dia, foram considerados todos os dias de ressaca para a obtenção do campo médio. Eguchi e Klumb-Oliveira (2023) realizaram uma comparação dos dados de altura significativa e período de pico da onda para a reanálise ERA5 em vários pontos da costa brasileira, com informações de ondas medidas *in situ* por boias do Programa Nacional do Boias (PNBOIA), disponíveis na base de dados do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. Os resultados indicam que o ERA5 superestima ligeiramente as alturas significativas, períodos de pico e direções médias no litoral brasileiro, com maior superestimava no ponto representativo do litoral de Santa Catarina.

No presente artigo foi calculado o grau de baroclinicidade da atmosfera durante as fases de ENOS e neutralidade durante eventos de ressaca, em comparação com a climatologia. De acordo com Raupp *et al.* (2004), a Instabilidade Baroclínica (IB) ocorre devido ao crescimento na amplitude de distúrbios atmosféricos em função do cisalhamento vertical do vento em níveis médios da troposfera e consiste na conversão de energia potencial disponível do estado básico para as perturbações. Para o estudo da IB, utiliza-se a equação do método *Eady Growth Rate* descrita por Lindzen e Farrel (1980) (equação 1), que determina o potencial da atmosfera, com relação à instabilidade do crescimento de ciclones (Hoskins e Valdes, 1990; Paciorek *et al*., 2002).

$$\sigma_{B1} = 0.31 \frac{f}{N} \left(\frac{\partial V}{\partial Z}\right) \qquad (1)$$

O termo σ_{B1} define o grau de baroclinicidade da atmosfera em dia^{-1}, f é o parâmetro de Corilois (=2Ω senϕ), N é a frequência de Brunt- Väisälä (ou frequência de empuxo) e ∂V/∂Z o cisalhamento vertical do vento. A equação 2 descreve como o termo N é calculado.

$$N = \left(\frac{g}{\theta} + \frac{\partial \theta_{\square}}{\partial_z}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

Na equação que define a frequência de Brunt- Väisälä, g é a acelaração da gravidade e $\theta_{\square}$ é a temperatura potencial.

O uso desse método torna-se conveniente para determinarmos a baroclinicidade em cada ponto de grade uma vez que sistemas sinóticos em latitudes médias tem sua origem

em processos associados à teoria da instabilidade baroclínica (Carmo, 2002). Para o Hemisfério Sul, quando os valores de σ_{B1} estiverem mais próximos de zero, menos barocliníca estará a atmosfera e, quanto mais negativo o valor de σ_{B1} tem-se maior baroclinia. O cisalhamento vertical do vento foi calculado a partir de dados diários das componentes U e V do vento entre os níveis de 850 hPa e 500 hPa.

Para testar a significância estatística entre as diferenças entre os campos médios da IB e períodos com ocorrência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) durante eventos de ressaca, foi realizado o Test-t de Student ao nível de confiança de 95% (Wilks, 2006). Ressalta-se que o Teste de Student também foi realizado considerando as anomalias nos campos de pressão atmosférica e altura significativa da onda.

Por fim, o método das EOF's, também conhecido de Análise de Componentes Principais, é utilizado para se obter os principais padrões espaciais de variabilidade, sua variação no tempo, e a quantificação da importância relativa desses padrões. Neste estudo as EOF's foram utilizadas para determinar os padrões espaciais dos campos relacionados à pressão atmosférica ao nível médio do mar e de altura significativa da onda. A EOF foi calculada no espaço, considerando somente os dias com ressaca. A análise das EOF's é eficiente no sentido de que campos de dados podem ser adequadamente representados pelo menor número de funções ortogonais e seus coeficientes temporais correspondentes (Componentes Principais) (Preisendorfer, 1988). Mais detalhes podem ser obtidos em Pereira (2003).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

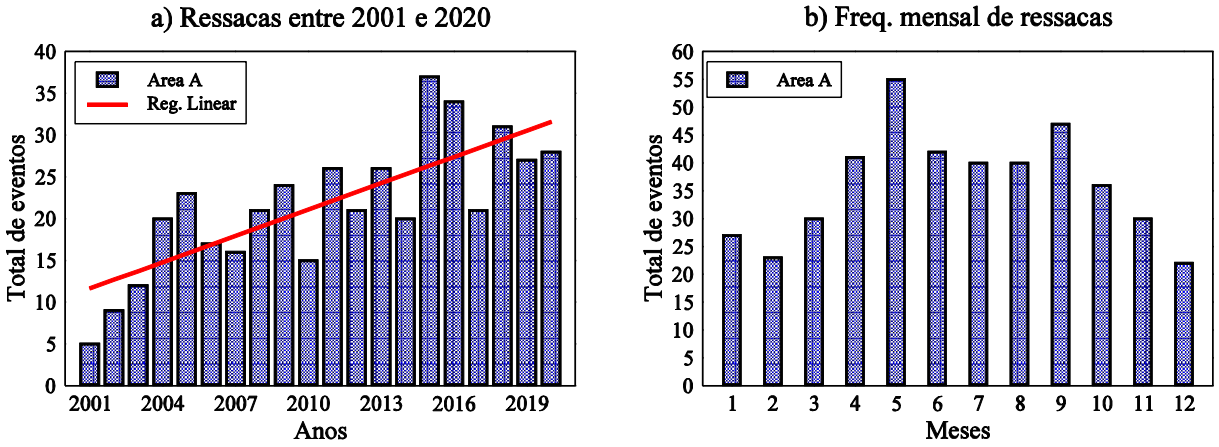
A Figura 2 mostra a distribuição anual (Figura 2a) e mensal (Figura 2b) dos eventos de ressaca entre 2001 e 2020 para a área Alfa, onde é possível observar uma variabilidade no número de casos de ano para ano. Durante o período estudado, os Avisos de Mau Tempo identificaram 433 eventos de ressaca, sendo que os maiores anos de ocorrência foram em 2015 e 2016, com 71 casos, devido a condição de El Niño muito forte que aconteceu entre esses anos (Machado *et al*, 2019). De acordo com Pereira *et al*. (2017), a presença de anomalias negativas de altura geopotencial no sudeste do continente sul-americano e no

oceano Atlântico durante a primavera de 2015, modulou os jatos de baixos níveis (JBN) de modo a transportarem umidade dos trópicos para os subtrópicos, contribuindo para maior frequência de ciclones nas latitudes subtropicais do oceano Atlântico. De um modo geral, os casos de ressaca tiveram a característica mais comum de duração de um a três dias. Entretanto ocorreram alguns eventos de ressacas mais prolongados, com duração de até nove dias, como o ocorrido entre 22 de setembro 01 de outubro de 2009. Além disso, destaca-se na Figura 2a, a tendência de aumento no número de ressacas durante os 20 anos de estudo. Entretanto, não é possível determinar se os eventos de ressaca têm ocorrido com maior frequência, ou o monitoramento desses eventos a partir dos Avisos de Mau Tempo se tornou mais frequente.

A partir da distribuição mensal das ocorrências de ressaca (Figura 2b) é possível observar que elas ocorrem durante todos os meses do ano, principalmente entre abril e setembro. Considerando a sazonalidade, o maior número de ressacas ocorreu durante os meses de outono com 126 eventos de ressaca, seguido do inverno com 122 casos. Vale ressaltar que, no outono e no inverno, os ciclones extratropicais e os sistemas frontais ocorrerem com maior frequência, além da formação das pistas de vento devido aos sistemas de alta pressão pós frontais (Reboita *et al*., 2015; Gan e Seluchi, 2009; Cavalcanti e Kousky, 2009; Gan e Rao, 1991), interferindo nas condições de tempo e de mar no litoral sul do Brasil. A Primavera, assim como o Verão tiveram as menores ocorrências de ressacas, 113 e 72 respectivamente. Esse resultado está de acordo com o trabalho de Campos *et al*. (2010) e Machado *et al*. (2019), registrando mais eventos de ressaca na região Sul do Brasil durante os meses de outono e de inverno.

Levando em consideração os eventos ENOS, a maior frequência de ressacas foi durante o período neutro, por ser o período mais frequente, seguido do período de El-Niño (tabela 2). Entre 2001 e 2020, segundo os dados disponibilizados pelo *Climate Prediction Center*, do *National Weather Service* (NOAA), ocorreram 116 meses na fase neutra, 60 meses na fase positiva e 64 meses na fase negativa do fenômeno ENOS. Logo, não há uma diferença em média de eventos de ressaca entre a fase neutra e de El Niño, com aproximadamente 2 eventos por mês. Em relação à sazonalidade dos eventos ENOS, os meses de inverno (JJA) são os que apresentam o maior número de eventos (não mostrado).

Figura 2 – Distribuição de frequência dos eventos de ressaca entre 2001 e 2020. a) Frequência anual e; b) Frequência mensal.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 2- Distribuição das ressacas durante ENOS e neutralidade entre 2001 e 2020.

Fases do ENOS	Nº de meses	Nº de eventos
Neutro	116	222
El Niño	60	116
La Niña	64	95

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Durante o verão, em eventos de ressaca, o campo médio da pressão ao nível médio do mar na zona Alfa (figura 3a) mostra um aumento notável sobre a Argentina e litoral adjacente, com centro de aproximadamente 1016 hPa. Mais ao sul do Brasil, observa-se uma região com área alongada de baixa pressão (cavado). Observando o campo de vento a 10 m, nota-se que durante a ocorrência de ressacas, no verão, existe um fluxo de ventos predominantes de sudeste na zona Alfa. Essa condição média de pressão e ventos mostra o padrão sazonal associado a eventos de ressaca em DJF, com alta pressão ao sul e baixas pressões ao norte da zona Alfa, favorecendo a ocorrência de pistas de ventos em direção a região costeira do litoral do Rio Grande do Sul (RS).

No outono (MAM), a pressão ao nível médio do mar (figura 3b) é maior durante a ocorrência de eventos de ressaca, ficando em torno de 1016 a 1018 hPa, considerando valores médios e localizado sobre a Argentina. Isso reflete a entrada de massas de ar de origem polar após a passagem de frentes frias e ciclones extratropicais, com aumento do gradiente de pressão favorecendo a ocorrência de ressacas na área de estudo. No campo de

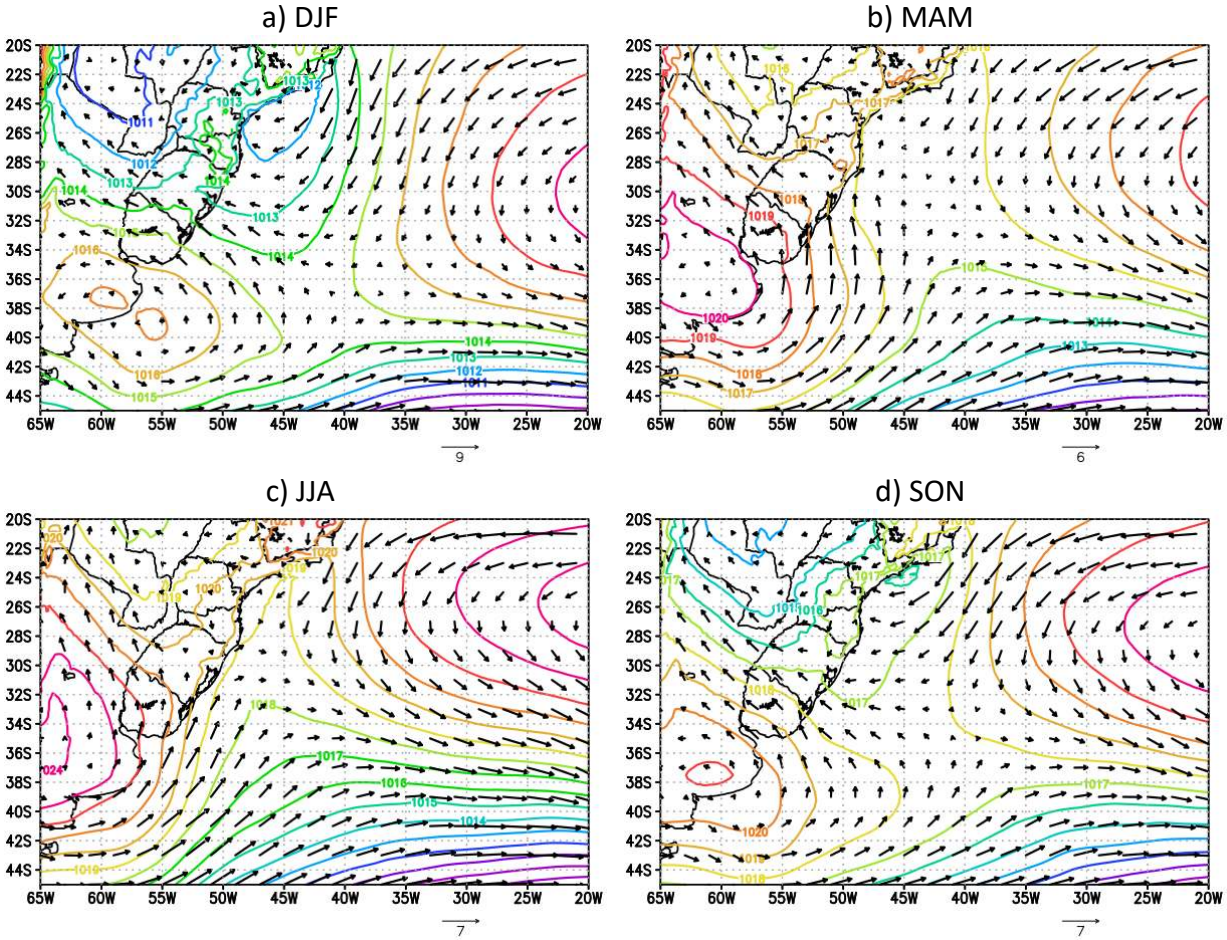
vento a 10 metros se observa uma configuração de ventos chegando ao continente de forma perpendicular, com predominância do vento sul na zona alfa.

Para a pressão ao nível médio do mar (figura 3c), durante o inverno na zona Alfa, é notado o aumento médio na pressão, ficando em torno de 1018 a 1020 hPa, com o centro de alta pressão mais ao centro da Argentina. Devido ao centro de maior pressão se encontrar mais continental, os ventos não entram mais na zona Alfa de forma perpendicular, passando agora de forma quase paralela à costa da região. Além disso, é possível notar a presença de um cavado no litoral do RS, associado a maior passagem de sistemas frontais durante o inverno, considerando os dias com ressacas. Desta forma, após a passagem dos sistemas frontais, tem-se a entrada de massas de ar continentais mais intensas nessa estação, favorecendo a entrada de vento do quadrante sul/sudoeste mais fortes, contribuindo para a ocorrência de ressacas na zona Alfa. Neste contexto, destaca-se Saraiva *et al*. (2003), que mostraram a componente de sudoeste do vento presente em eventos de ressaca no litoral sul do RS (Praia do Cassino).

Durante os eventos de ressaca na primavera (figura 3d) é notado um padrão próximo ao que foi mostrado durante o verão (figura 3a), com valores médios do centro de alta pressão sobre a Argentina, próximo ao litoral adjacente. No sul do Brasil, nota-se um cavado associado a um centro de baixa pressão sobre o Paraguai. Sobre o litoral do RS, fica evidente a zona de separação entre as massas de ar (sistemas frontais), influenciando nos eventos de ressaca. O gradiente de pressão formado favorece a predominância de ventos de sudeste na zona alfa, o que também contribui para a formação de ressacas.

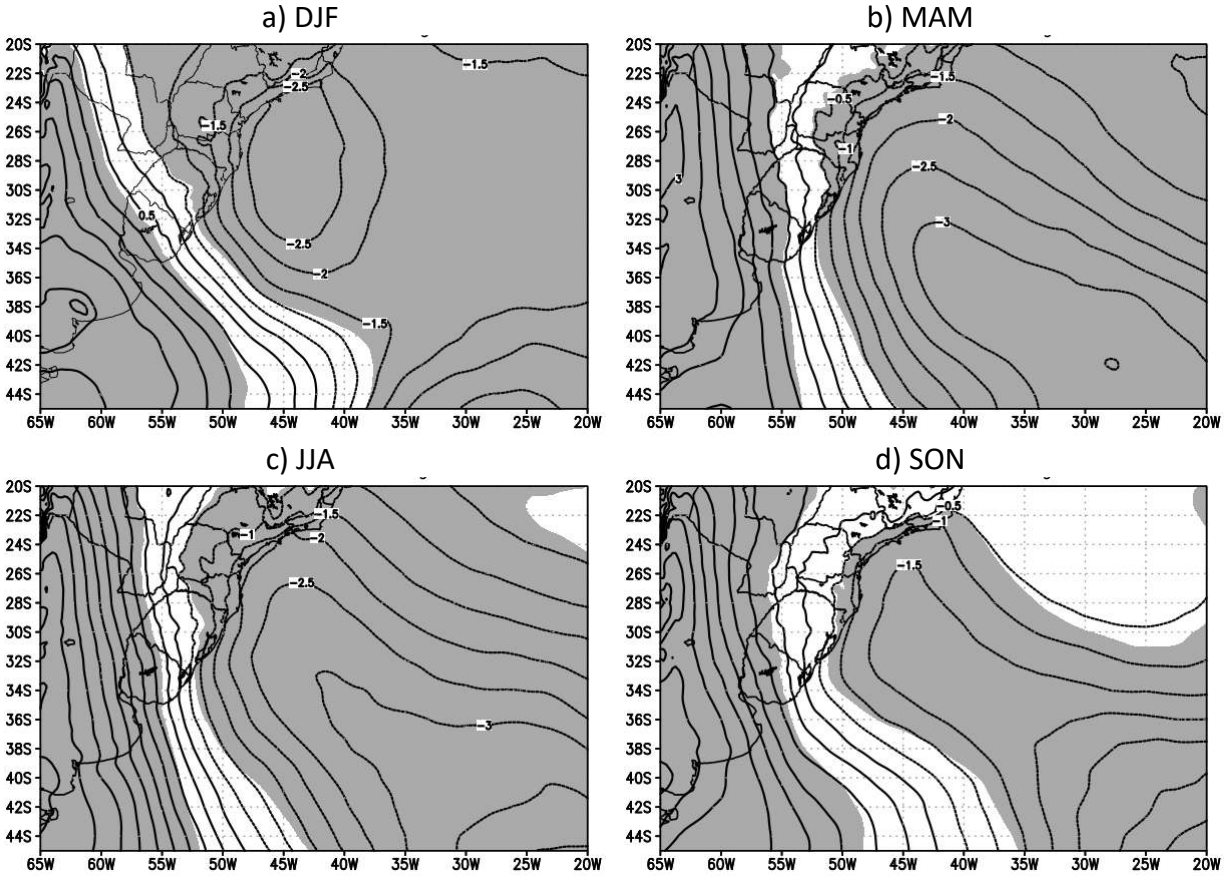
A partir da figura 4, é possível observar as diferenças no campo de pressão atmosférica entre o período médio com ressaca entre 2001 e 2020 e a climatologia do ERA5. Logo, tem-se anomalias negativas de pressão atmosférica ao longo das quatro estações sobre o Atlântico, indicando a atuação de sistemas de baixa pressão durante os eventos de ressaca na área Alfa. Essas anomalias são localizadas mais próximas à costa do Sul/Sudeste do Brasil durante o verão (figura 4a) e mais abrangentes no oceano nas demais estações, principalmente no outono e inverno (figuras 4b,4c).

Figura 3 – Campo médio da pressão ao nível médio do mar (hPa) e direção do vento a 10m durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 4 – Anomalia entre a pressão ao nível médio do mar (hPa) durante eventos de ressaca e a climatologia do ERA5. As áreas em cinza representam as anomalias com significância estatística de 95%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A figura 5 mostra o campo médio sazonal da altura significativa e direção de onda em eventos de ressaca, em que há um predomínio de ondas de sudoeste nas proximidades de 40° e 44° Sul forçadas pela presença de sistemas de baixas pressões. Por outro lado, em latitudes mais baixas, a direção média da onda é influenciada pela Anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS). No Litoral Sul do Brasil, é notável que o padrão climatológico de ondas que atingem o litoral do RS tenha uma direção predominante de sudeste durante o verão (figura 5a), sendo influenciadas pelos campos de pressão e ventos, mostrados na figura 3a. Além disso, a altura das ondas que chegam à costa durante eventos de ressaca em DJF são mais elevadas em relação ao padrão climatológico (não mostrado), variando entre 2 a 2,5 metros de altura (valores médios).

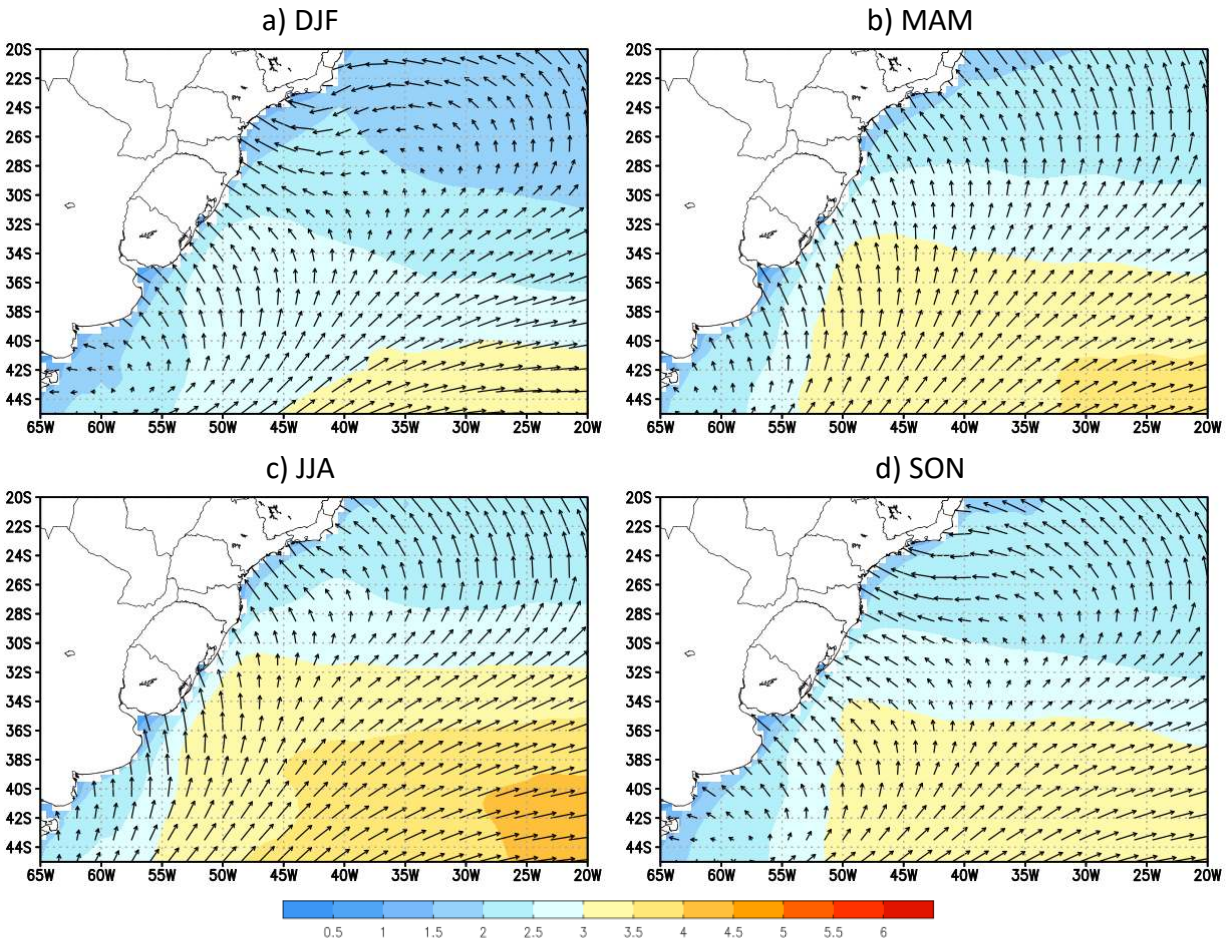
O comportamento do vento a 10 m, mostrado na figura 3b, influencia na altura da onda (figura 5b), durante eventos de ressaca no outono, assim como na direção da onda (quadrante sul), o que também favorece no acúmulo de água na costa da região. Ressalta-se

que as ondas que chegam a costa em MAM possuem a altura média em torno de 2,5 a 3,0 m durante eventos de ressaca. Esse padrão também é observado durante eventos de ressaca no inverno (figura 5c), onde é possível observar ondas de 3 a 3,5 metros muito próximas a costa. Assim como em MAM, nota-se a ocorrência de ressacas influenciada pelo vento de quadrante sul (associado à entrada da massa de ar polar na retaguarda do sistema frontal) e, devido ao transporte de Ekman, favorece ao empilhamento de água na costa (Machado *et al*., 2019). De acordo com Eguchi e Klumb-Oliveira (2023), as ondas de tempestade no litoral sul do Brasil (altura significativa a partir de 4,5 m) são caracterizadas por apresentarem direção recorrente de Sudoeste e período de pico entre 9 e 13 segundos. Além disso, a ocorrência de ondas de tempestade inicia seu aumento em abril e permanecem altas de maio até setembro.

Durante eventos de ressaca na primavera (SON), os ventos superficiais estão mais predominantes de sudeste na Zona Alfa (figura 5d), sendo que as ondas superficiais também são direcionadas para essa região de forma mais intensa, com altura das ondas variando em torno de 2,5 a 3 m e superando os 3m em áreas mais afastadas da costa.

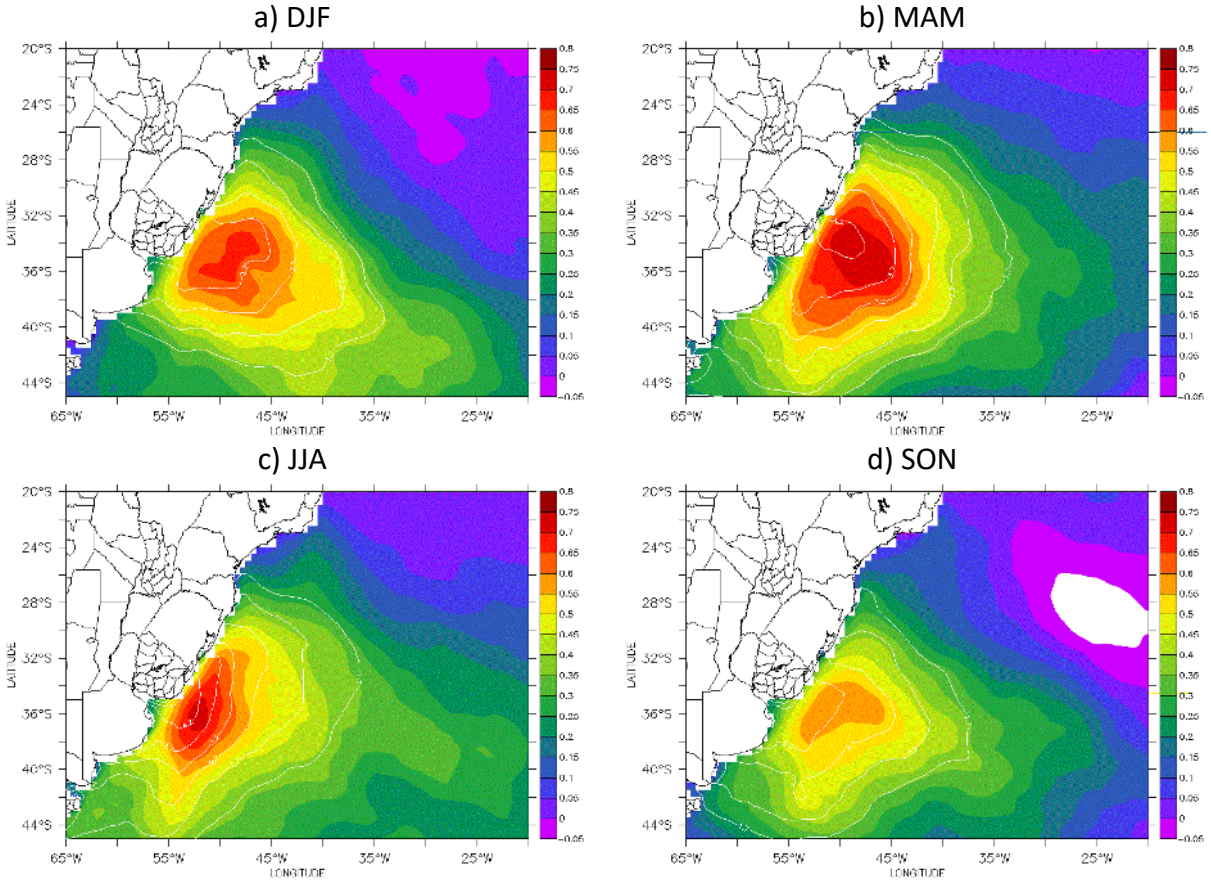
A figura 6 mostra as anomalias sazonais na altura significativa da onda durante eventos de ressaca. Nota-se que os maiores valores se aproximam de 1 metro acima da média, principalmente nas proximidades do Litoral do RS e do Uruguai. A maior abrangência dessas anomalias ocorre no período de outono (figura 6b), que é a estação que apresentou o maior número de eventos de ressaca nos vinte anos de estudo.

Figura 5 – Campo médio da altura (m) e direção da onda durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 6 – Anomalia entre a altura significativa da onda (m) durante eventos de ressaca e a climatologia do ERA5. Os contornos representam as anomalias com significância estatística de 95%.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

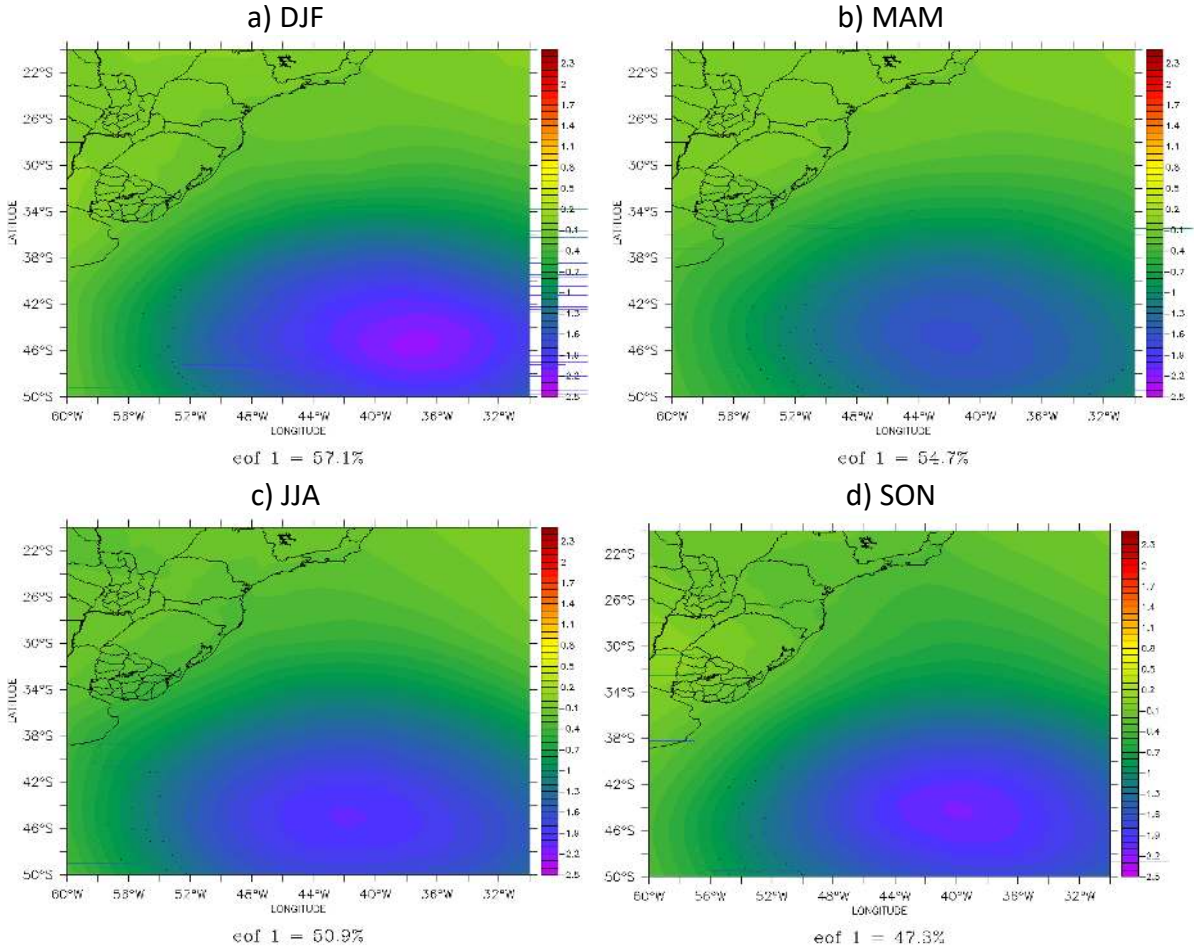
A partir dos eventos de ressaca entre 2001 e 2020, foi aplicado o método de EOF para encontrar os principais padrões espaciais em termos de pressão atmosférica e altura significativa de onda para a área de estudo (figuras 7 a 10). Ressalta-se que serão mostradas apenas as duas componentes principais que representam as maiores variâncias em cada estação do ano. Para a aplicação da EOF no espaço, foram considerados todos os dias com ressacas para o período estudado.

De acordo com a EOF 1 (figura7a), durante eventos de ressaca em DJF, percebe-se o padrão espacial da pressão ao nível médio do mar de maior importância, onde os menores valores se encontram no oceano, associados aos sistemas de baixa pressão afastados da região costeira. A EOF 2 em DJF (Figura 8a), mostra um padrão com centros de alta e baixa pressão sobre o oceano Atlântico. Destaca-se que a EOF 1 indica um padrão, com predomínios de sistemas mais amplos de baixa pressão atmosférica, enquanto que a EOF 2

indica um padrão mais caracterísitco de eventos de ressaca, onde o gradiente de pressão gerado, favorece ao predomínio de ventos de sul/sudeste. É importante registrar que os padrões de EOF encontrados neste estudo, considerando a climatologia sazonal (não mostrado) são coerentes com os padrões obtidos no estudo de Souza *et al*. (2022), em que os autores aplicaram a técnica de EOF para a série cliamatológica da pressão ao nível médio do mar através da reanálise CFSR.

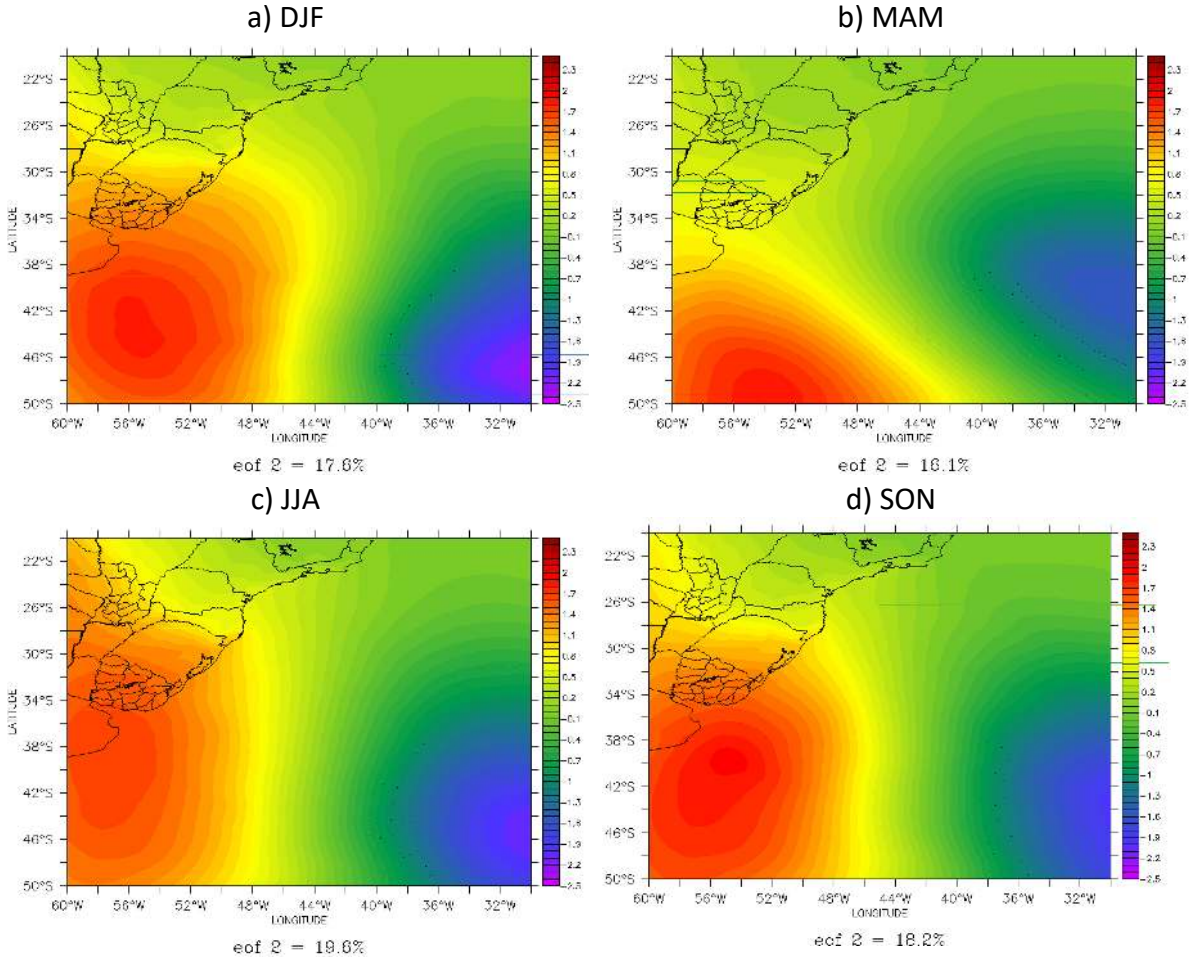
As EOF's 1 e 2, associadas a pressão ao nível médio do mar, seguem os padrões representados em DJF, para as demais estações (MAM, JJA e SON) respectivamente, com a primeira componente representando a maior parte da variância e sendo associadas aos ciclones extratropicais afastados do Litoral. Ressalta-se as diferenças na EOF 2, principalmente durante o outono e o inverno (figuras 8b e 8c), em que a disposição dos centros de altas e baixa pressão são característicos de eventos de ressaca, principalmente em MAM. É importante destacar que, ao comparar a EOF 1 durante ressacas para as quatro estações, com a climatololgia, foi possível observar que os ciclones extratropicais sobre o oceano se localizam mais a norte da posição climatológica (não mostrado).

Figura 7 – Padrões espaciais referentes a primeira EOF da pressão atmosférica ao nível médio do mar durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 8 – Padrões espaciais referentes a segunda EOF da pressão atmosférica ao nível médio do mar durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa.

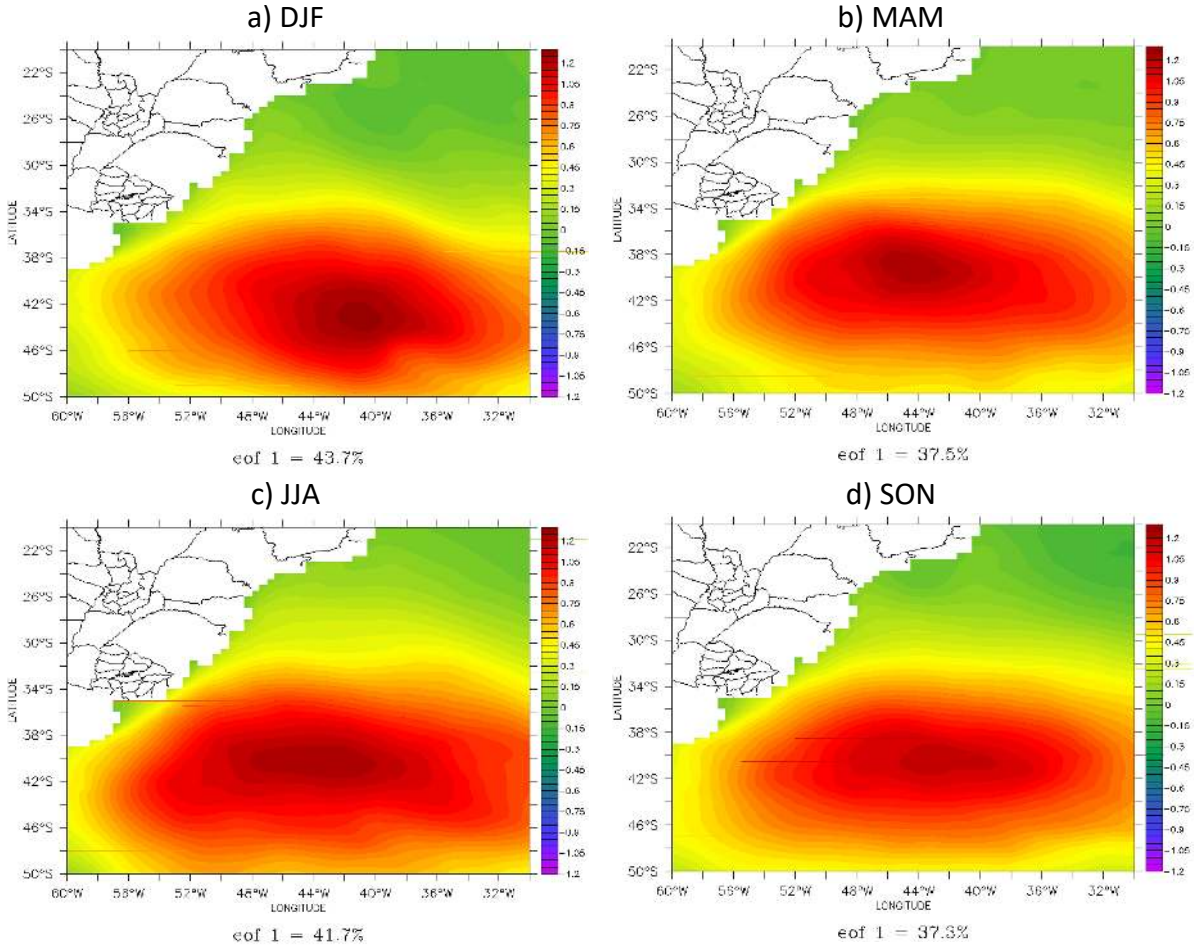


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os padrões espaciais associados a altura de onda em eventos de ressaca são mostrados nas figura 9 e 10. É possível observar que as EOF's 1 e 2 estão em concordância com os resultados mostrados para a pressão atmosférica (figuras 7 e 8), em que a primeira componente apresenta a maior variância para cada estação do ano, estando associada a influência da atmosfera pelos padrões de larga escala. Por outro lado, a EOF 2 representa o padrão de ondas característicos de ressacas, com as anomalias associadas a altura de ondas próximas do litoral sul do Brasil, principalmente no outono e no inverno (figuras 10b e 10c), que é o período em que mais ocorre o fenômeno de ressaca, como foi mostrado neste estudo. Esse padrão sazonal de EOF 2 é observado em estudos anteriores quando são feitas análises sinóticas de eventos de ressacas, indicando a formação da pista de ventos em função do gradiente de pressão observado (Saraiva *et al*., 2003; Parise *et al*., 2009; Machado *et al*., 2019; Sondermann *et al*., 2023).

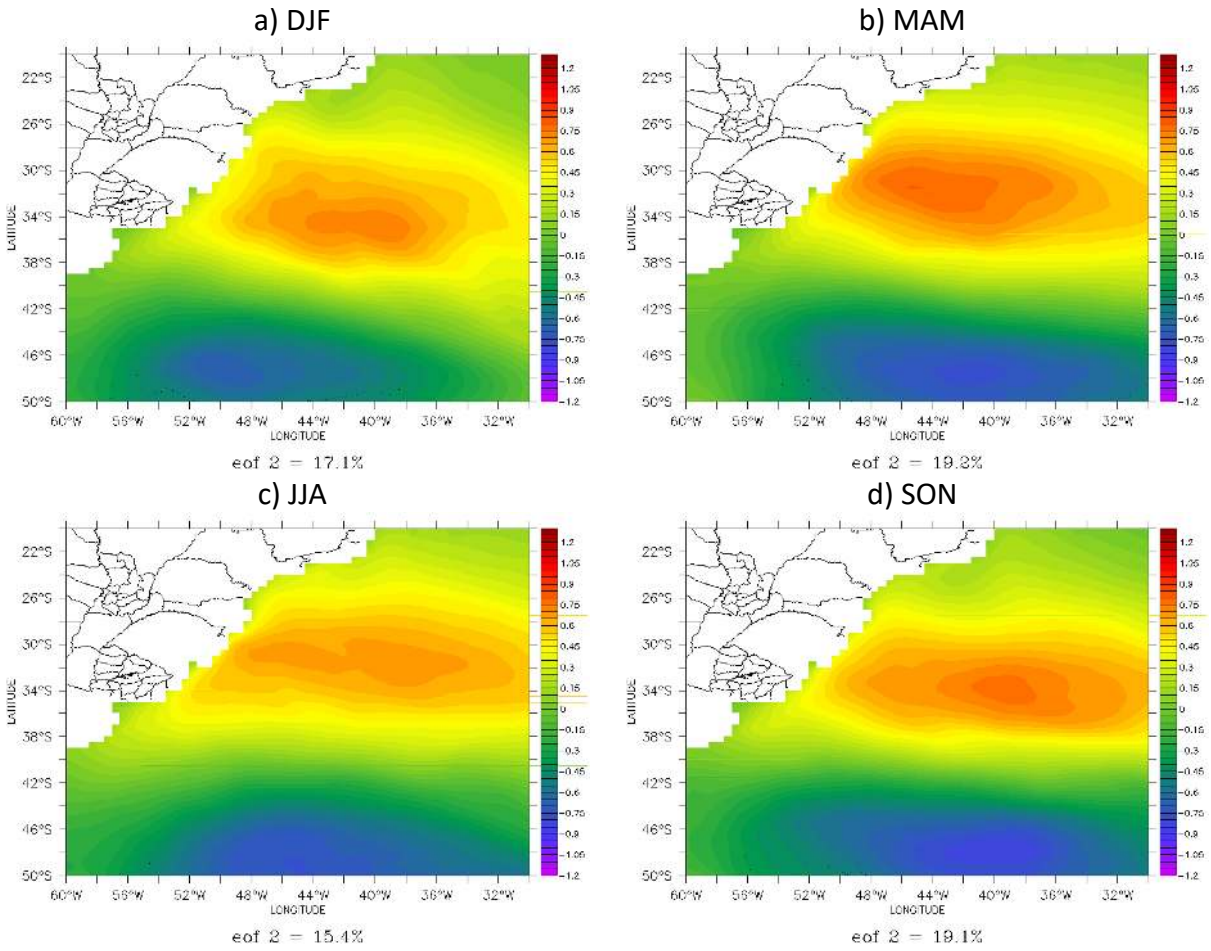
Ressalta-se que os resultados apresentados das EOF's envolvem todos os dias com avisos de ressaca, mostrando uma caracterísitica principal dos eventos associados a ciclones extratropicais mais afastados da costa e um padrão de ondas geradas com caracterisitcas de Swell (ondas de período longo) (não mostrado). Entretanto, dependendo da abordagem, o padrão espacial poderia apresentar um resultado diferente deste estudo, caso fosse escolhido apenas o primeiro dia do evento de ressaca.

Figura 9 – Padrões espaciais referentes a primeira EOF da altura de onda durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 10 – Padrões espaciais referentes a segunda EOF da altura de onda durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa.

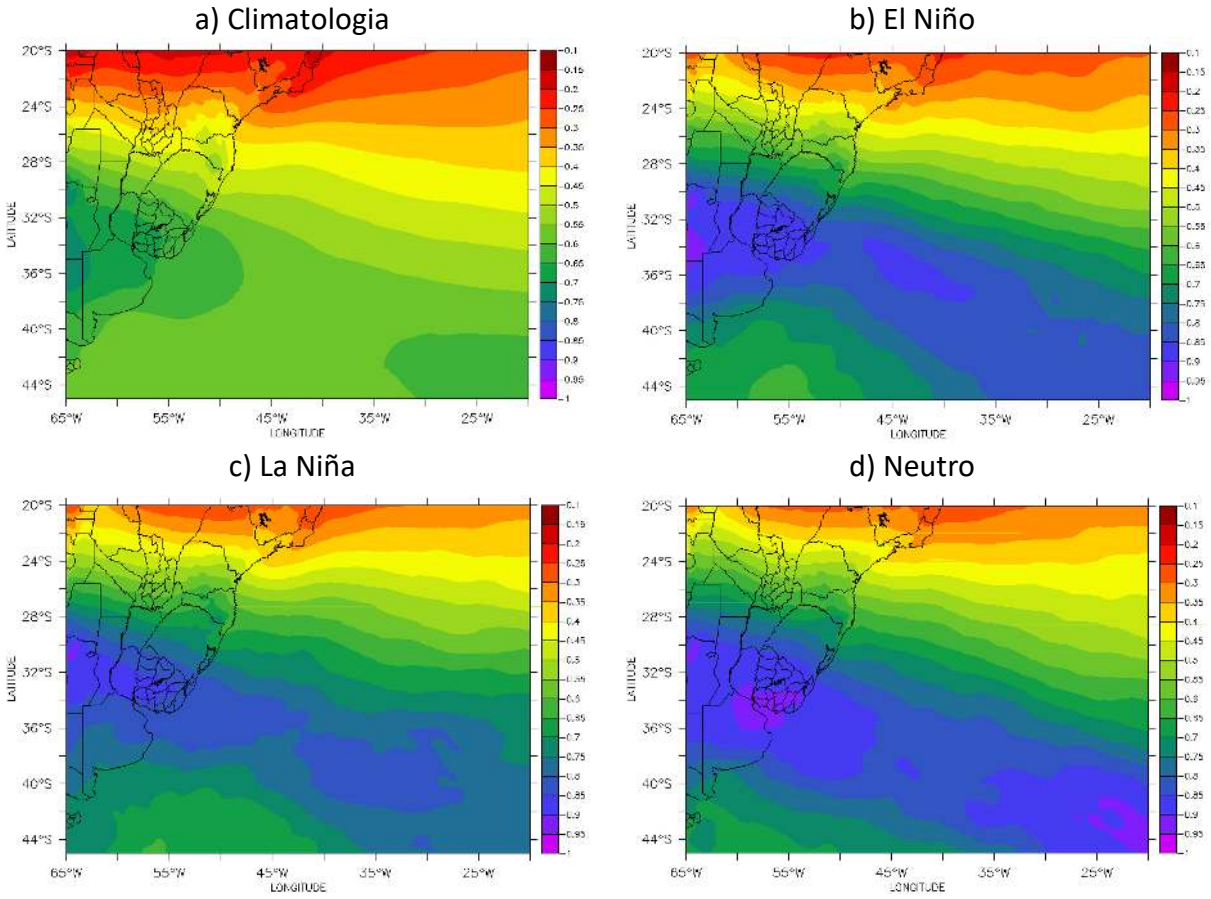


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Após analisar as características de pressão atmosférica e altura de onda em dias com ressaca na zona Alfa, foi calculado o grau de baroclinia da atmosfera durante a ocorrência desses eventos divididos de acordo com a fase do ENSO e em períodos de neutralidade. Além disso, foi feita uma comparação com a climatologia da IB a partir da reanálise ERA5, considerando todo o período estudado. Deste modo, a figura 11 mostra o resultado da IB em termos de média climatológica (figura 11a). Ressalta-se que os valores da IB são negativos no Hemisfério Sul, em função do parâmetro de Coriolis. Quanto maior for o valor da IB (em módulo), maior é o cisalhamento do vento horizontal com a altura na troposfera (diferença entre baixos e médios níveis). Neste cálculo da IB, o termo relacionado ao cisalhamento vertical do vento horizontal possui maior importância em relação ao termo da frequência de empuxo (estabilidade estática), a qual leva em conta o gradiente vertical da temperatura potencial. Mais detalhes sobre a aplicação desse método e suas diferentes abordagens,

podem ser obtidas em Simmonds e Lim (2009). Logo, tem-se para a climatologia, os maiores valores de IB entre 30° S e 45° S, localizados mais ao sul da zona Alfa. Esse padrão de IB vai ao encontro de estudos anteriores (Machado *et al*., 2020; Santos *et al*., 2023) na área de estudo. Quando se analisa a IB para os eventos de ressaca durante El Niño (figura 11b), La Niña (figura 11c) e neutralidade (figura 11d), nota-se valores mais negativos na região do Atlântico Sudoeste em todas as fases, indicando a região que apresenta o maior grau de baroclinia em cada fase do ENOS.

Figura 11 – Comparação entre a climatologia da Instabilidade Baroclínica e as fases do ENSO durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa (dia^{-1}).



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

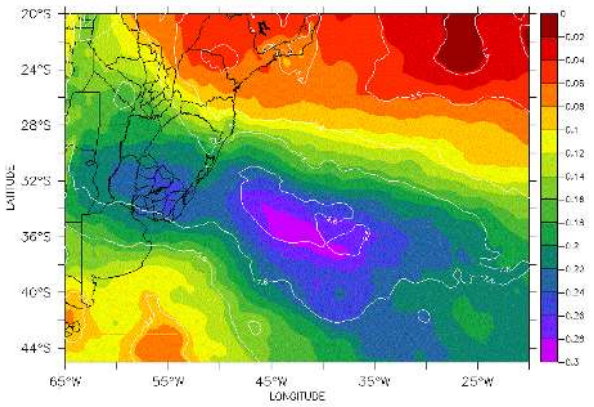
A figura 12 mostra as anomalias de IB em função das diferenças encontradas na figura 11, sendo que os contornos nas figuras mostram as anomalias estatisticamente significativas de 95%. Pelas anomalias, é possível observar os valores mais negativos (aumento da IB) para a fase positiva do ENOS (figura 12a) nas proximidades do Litoral do RS, indicando uma maior condição para a ocorrência de ciclones e passagens de sistemas

frontais mais intensos durante eventos com ressaca na área de estudo. Para o período com ressacas com La Niña (figura 12b), também nota-se um aumento da IB, porém com menores valores em relação ao período de El Niño. Ressalta-se que o número de ressacas durante a La Niña foi inferior a fase de El Niño (tabela 2). Para o período neutro (figura 12c), é possível observar os maiores valores de anomalias sobre o oceano, mais afastados da zona Alfa.

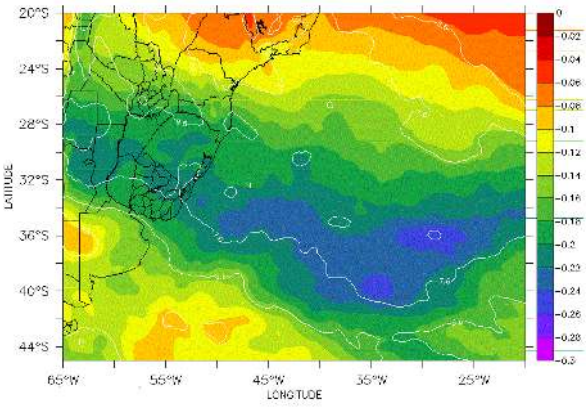
De um modo geral, as anomalias de IB mostram maiores condições para formação de ciclones e sistemas frontais mais intensos, durante os períodos de El Niño e Neutro, quando comparados com a fase da La Niña em períodos com ressaca. Durante períodos de El Niño, observa-se uma intensificação do jato subtropical em função da intensificação da célula de Hadley, favorecendo a um aumento do transporte de momento em direção aos polos na alta troposfera (Chen *et al*., 1996; Grimm *et al*., 1998; Grimm e Ambrizzi, 2009). Reboita *et al*. (2015), destaca que, para o Hemisfério Sul, não há muitas diferenças no total de ciclogêneses em anos de El Niño, quando comparado a anos neutros e de La Niña, porém ocorre uma mudança na região de preferência de ocorrência destes sistemas, de modo que, em anos de El Niño, há aumento da ocorrência de ciclones entre 30° e 60° S. Machado *et al*. (2020) destacam que a IB se mostrou mais intensa para períodos de El Niño na área de estudo, principalmente durante a primavera e o verão.

Figura 12 – Anomalia entre a climatologia da Instabilidade Baroclínica (dia^{-1}) e as fases do ENSO durante eventos de ressaca entre 2001 e 2020 ocorridos na área Alfa. Os contornos representam as anomalias com significância estatística de 95%.

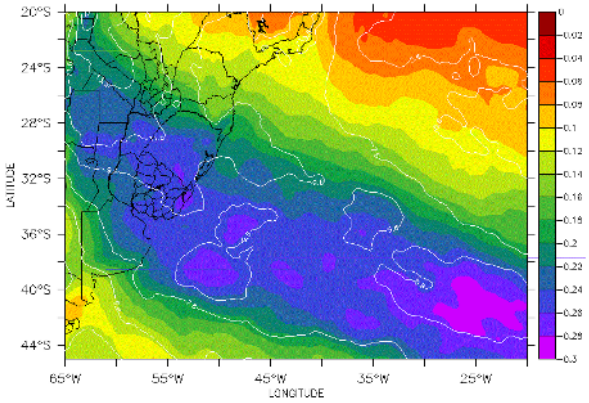
a) El Niño - Cli



b) La Niña - Cli



c) Neutro - Cli



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo abordou a temática sobre ressacas no litoral sul do Brasil, em termos sazonais e sua variabilidade, a partir de informações diárias obtidas dos Avisos de Mau Tempo da Marinha do Brasil e de reanálises provenientes do ERA5. É importante destacar que este artigo se diferencia dos demais, em função da utilização dos Avisos de Mau Tempo como dados observados para um período prolongado (20 anos). Ressalta-se que outros artigos abordam as ressacas a partir de outras abordagens, como notícias na mídia ou por métodos associados a alturas de onda. Desta forma, este artigo pode validar, em parte, os avisos de ressaca da Marinha e caracterizou os padrões de pressão atmosférica e de altura significativa de onda durante dias com ressaca no Litoral Sul do Brasil.

Entre os anos de 2001 e 2020 foram observados 433 eventos de ressaca na área de estuda (área Alfa da Marinha), sendo que a maior parte deles ocorreu entre o outono e o

inverno, corroborando com estudos anteriores que empregaram diferentes metodologias. Além disso, em termos de variabilidade climática ao ENSO, notou-se a maior ocorrência desses eventos durante a fase neutra e de El Niño.

O padrão sazonal de ressacas a partir de pressão atmosférica ao nível médio do mar e vento 10 metros mostrou, para o verão e a primavera, um cavado na parte continental do sul do Brasil e uma alta pressão com centro no litoral entre a Argentina e o Uruguai, favorecendo a predominância de ventos e ondas de direção sudeste. Para o outono e inverno (período em que há maior ocorrência de ressacas) foi possível observar uma alta pressão mais ao centro da Argentina e um cavado na altura do litoral do RS, indicando a ocorrência de um maior gradiente de pressão e, consequentemente, maior intensidade dos ventos do quadrante sul e ondulação mais elevada de sudeste na zona Alfa.

A partir do cálculo das EOF's 1 e 2 para a pressão atmosférica, notou-se para a primeira componente principal, o predomínio do sistema de baixa pressão mais afastado da costa para as quatro estações, indicando o principal sistema meteorológico causador de ressacas. O padrão da EOF 2 mostrou a condição de ressaca causada pelo gradiente de pressão atmosférica na área de estudo, favorecendo a atuação de ventos do quadrante sul. Ressalta-se que as EOF's da altura significativa de onda, estiveram de acordo com as EOF's de pressão atmosférica.

Por fim, calculou-se o potencial baroclínico da atmosfera através do método de Eady Growth Rate, aplicado para a climatologia e durante eventos de ressaca em diferentes fases do ENSO. Ao comparar a instabilidade entre as fases do ENSO, notou-se os maiores valores durante o El Niño e a fase neutra e mais fraca na La Niña. Destaca-se que os máximos valores de IB no El Niño ocorreram mais próximos à costa do RS, enquanto que os máximos de IB na fase neutra ocorreram em regiões mais afastadas do litoral. Logo, esses resultados indicam a maior condição para formação de ciclones extratropicais e sistemas frontais mais intensos durante o El Niño na área de estudo durante de ressaca nesse período. Ressalta-se a condição de El Niño Muito forte entre 2015 e 2016, que mostrou o maior registro de ressacas durante a série histórica na zona Alfa.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento do projeto através dos Processos 406769/2021-4 e 406763/2022-4.

REFERÊNCIAS

BENAVENTE, Javier *et al.* Coastal flooding hazard related to storms and coastal evolution in Valdelagrana spit (Cadiz Bay Natural Park, SW Spain). **Continental Shelf Research**, v. 26, p. 1061–1076, 2006.

BITENCOURT, Daniel Pires; QUADRO, Mário Francisco Leal de; CALBETE, Nuri. Análise de dois casos de ressaca no litoral da região Sul no verão de 2002. **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Foz do Iguaçu, 3910-3917, 2002.

CAMPOS, Ricardo Martins; CAMARGO, Ricardo de; HARARI, Joseph. Caracterização de eventos extremos do nível do mar em Santos e sua correspondência com as reanálises do modelo do NCEP no sudoeste do Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 175-184. 2010.

CANDELLA, Rogério Neder; SOUZA, Shirley Marques Lima de. Ondas oceânicas extremas na costa Sul-Sudeste brasileira geradas por ciclone com trajetória anormal em maio de 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 441-456, 2013.

CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque.; KOUSKY, Vernon Edgar. Frentes frias sobre o Brasil. *In:* CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque *et al*. (Org.), **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, Oficina de textos, p. 135-147, 2009.

CHEN, Biao; SMITH, Shawn; BROMVICH, David. Evolution of the Tropospheric Split Jet over the South Pacific Ocean during the 1986-89 ENSO Cycle. **Montly Weather Review**, v. 124, n. 8, p. 1711-1731, 1996.

EGUCHI, Branco Mateus Murata; KLUMB-OLIVEIRA, Leonardo Azevedo. Clima de ondas de tempestades na costa brasileira utilizando 41 anos de dados da reanálise ECMWF ERA5. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v.32, 2023.

GAN, Manoel Alonso; RAO, Vadlamudi Brahmananda. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GAN, Manoel Alonso; SELUCHI, Marcelo Enrique. Ciclones e ciclogênese. *In:* CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque *et al*. (Org.), **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo, Oficina de textos, p. 111-126, 2009.

GILL, Adrian. **Atmosfere-Ocean Dynamics**. New York: academic press 662, 1982.

GRIMM, Alice Marlene; FERRAZ, Simone; GOMES, Júlio. Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, v. 11, n. 11, p. 2863-2880, 1998.

GRIMM, Alice Marlene; AMBRIZZI, Tércio. Teleconnections into South America from the tropics and extratropics on interannual and intraseasonal timescales. In: **Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions**. Springer: Dordrecht, p. 159-191, 2009.

HERSBACH, Hans et al. The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, p. 1999-2049, 2020.

HOSKINS, Brian, VALDES, Paul. On the existence of storm tracks. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 47, p. 1854–1864, 1990.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico**, 2022. Disponível em https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html. Acesso em: 15/04/2024.

LINDZEN, Robert, FARRELL, Brian. A simple approximate result for maximum growth rate of baroclinic instabilities. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 37, p. 1648-1654, 1980.

MACHADO, Jeferson Prietsch *et al*. 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**, v. 34, p. 529-544, 2019.

MACHADO, Jeferson Prietsch; JUSTINO, Flávio; Souza, Caio Demétrio. Influence of El Niño-Southern Oscilattion on baroclinic instability and storm track in the Southern Hemisphere. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E93-E109, 2020.

MARONE, Eduardo; CAMARGO, Ricardo de. Marés Meteorológicas no Litoral do Estado do Paraná: O evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**, v. 8, p. 73-85, 1994.

MENDES, David *et al*. On Precursors of SouthAmerican Cyclogenesis. **Tellus**, v. 59A, p. 114-121, 2007.

MENDES, David *et al*. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans secto, p.r. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, p. 239–250, 2009.

NECCO, G. Comportamiento de vortices ciclonicos en el area Sudamericana durante el FGGE: Ciclogenesis. **Meteorologica**, v. 13, p. 7-19, 1982.

PACIOREK, Christopher *et al*. Multiple Indices of Northern Hemisphere Cyclone Activity, Winters 1949–99. **Journal of Climate**, v. 15, p. 1573–90, 2002.

PAMPUCH, Luana Albertani; AMBRIZZI, Tércio. Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte II: Monitoramento Mensal em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 105-110, 2016.

PANDOLFO, Cristina *et al*. Sistemas atmosféricos em Santa Catarina no período da maturação à colheita de videira Cabernet Sauvignon. **Agrometeoros**, v. 25(2), 2018.

PARISE, Cláudia Klose; CALLIARI, Lauro Júlio; KRUSCHE, Nisia. Extreme storm surges in the south of Brazil: atmospheric conditions and shore erosion. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, p. 175-188, 2009.

PEREIRA, Janini. **Influência do Gelo Marinho Antártico no Setor Austral e Sudoeste do Atlântico Sul**. Dissertação (Mestrado em Oceanografia), Universidade de São Paulo, Brasil, 2003.

PEREIRA, Heloisa Ramos; **Reboita, Michelle Simões**; AMBRIZZI, Tércio. Características da Atmosfera na Primavera Austral Durante o El Niño de 2015/2016. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 293-310, 2017.

POND, Stephen; PICKARD, George Lawson **Introductory Dynnamical Oceanography**. New York: Pergamon Press, 1983.

PREISENDORFER, Rudolph. **Principal component analyses in meteorology and oceanography**. Elsevier, New York, 425 p, 1988.

PUGH, David. **Tides, Surges and Mean Sea Level**. John Wiley & Sons: Chichester 472, 1987.

RAUPP, Carlos *et al*. Estudo de Caso de um Sistema Convectivo Ocorrido próximo à Costa Leste do Nordeste do Brasil**. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, 2004.

REBOITA, Michelle Simões *et al*. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, p.185-204, 2010.

REBOITA, Michelle Simões *et al*. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the southern hemisphere. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 7-8, p. 1929-1944, 2015.

SARAIVA, Jaci; BEDRAN, Carolina; CARNEIRO, Cristiane. Monitoring of storm surges on Cassino Beach, RS, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 323-331, 2003.

SATYAMURTY, Prakki; FERREIRA, Celeste da Conceição, GAN, Manoel Alonso. Cyclonic vortices over South America. **Tellus A**, v. 42, p. 194-201, 1990.

SIMMONDS, Ian; LIM, Eun-Pa. Biases in the calculation of Southern Hemisphere mean baroclinic eddy growth rate. **Geophysical Research Letters**, v. 36(1), p. 1-5, 2009.

SINCLAIR, Mark. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, p. 2239-2256, 1994.

SINCLAIR, Mark. A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 1601-1619, 1995.

SONDERMANN, Marcely *et al*. Atmospheric patterns favourable to storm surge events on the coast of São Paulo State, Brazil. **Natural Hazards**, v. 117, p. 93-111, 2023.

SOUZA, Danilo Couto de *et al*. A hybrid regional climate downscaling for the southern Brazil coastal region. **International Journal of Climatology**, v. 42(13), p. 6753-6770, 2022.

STEWART, Robert. **Introduction to physical oceanography**. Department of Oceanography. Texas A&M University, 2005.

TRUCCOLO, Eliane; FRANCO, Davide; SCHETTINI, Carlos Augusto. The low frequency sea level oscillations in the northern coast of Santa Catarina, Brazil. **Journal of Coastal Research**, SI 39, p. 547-552, 2006.

WILKS, Daniel. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. 2nd ed. Academic Press, 627 pp., 2006.