Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS NA RETRAÇÃO DO GELO MARINHO ANTÁRTICO DE 2000-2024

Influence of weather conditions on the retraction of Antarctic sea ice from 2000-2024

Influencia de las condiciones meteorológicas en la retracción del hielo marino antártico desde 2000-2024

Cecília dos Santos Tavares
Institute of Pure and Applied Sciences, Federal University of Itajubá (UNIFEI), Itabira, Brazil
ceciliatavaressantos@gmail.com

Ana Carolina Vasques Freitas
Institute of Pure and Applied Sciences, Federal University of Itajubá (UNIFEI), Itabira, Brazil
ana.freitas@unifei.edu.br

Luciana Bassi Marinho Pires
World Environmental Conservancy, Atlanta, USA
luciana.pires@worldenvironmentalconservancy.org

Camila Bertoletti Carpenedo
Federal University of Paraná (UFPR), Brazil
camila.carpenedo@ufpr.br

Resumo: O gelo marinho Antártico desempenha um importante papel na regularização do clima, influenciando a circulação atmosférica e oceânica. Esse estudo teve como objetivo analisar tendências na extensão do gelo marinho Antártico e verificar as condições meteorológicas associadas aos anos extremos de retração do mesmo no período de 2000 a 2024. Foram utilizados dados da reanálise do ERA5, de estações meteorológicas (Palmer, Dumont D'Urville, Davis e Neumayer III) e de extensão de gelo total e nos setores de Bell-Amundsen, Weddell, Índico e Pacífico. Os resultados mostraram que a extensão total do gelo no continente antártico apresenta, desde 2015, uma tendência de redução no verão de 40.000 km^2 por ano. Os setores do Mar de Weddell e Oceano Índico também apresentam tendências de redução no verão e inverno desde 2015, com magnitude de até 17.428, 32 km^2 por ano em Weddell no verão. Anomalias positivas de temperatura do ar, durante anos extremos de redução do gelo nesses dois setores, foram observadas em grande parte do continente, mas com maior magnitude no inverno, podendo resultar em menor formação de gelo no inverno e intensificação do

degelo no verão. Além disso, os padrões de vento em cada setor durante os anos extremos favorecem a vinda de massas de ar quentes que potencializam o degelo. Conclui-se que as condições meteorológicas, particularmente a temperatura do ar e a velocidade e direção do vento, podem influenciar na formação e retração do gelo marinho no verão e inverno na Antártica.
Palavras-chave: Correlação. Eventos extremos. Extensão de gelo marinho. Tendências. Padrões de vento.

Abstract: Antarctic sea ice plays an important role in regulating the climate, influencing atmospheric and oceanic circulation. The aim of this study was to analyze trends in the extent of Antarctic sea ice and to verify the meteorological conditions associated with extreme years of ice retreat between 2000 and 2024. We used data from the ERA5 reanalysis, meteorological stations (Palmer, Dumont D'Urville, Davis and Neumayer III) and total ice extent in the Bell-Amundsen, Weddell, Indian and Pacific sectors. The results showed that the total ice extent on the Antarctic continent has shown a summer reduction trend of 40,000 km2 per year since 2015. The Weddell Sea and Indian Ocean sectors have also shown summer and winter reduction trends since 2015, with a magnitude of up to 17,428, 32 km2 per year in Weddell in summer. Positive air temperature anomalies during extreme years of ice reduction in these two sectors have been observed over much of the continent, but with greater magnitude in winter, which may result in less ice formation in winter and intensified melting in summer. In addition, the wind patterns in each sector during the extreme years favor the arrival of warm air masses that enhance thawing. We conclude that weather conditions, particularly air temperature and wind speed and direction, can influence the formation and retreat of sea ice in summer and winter in Antarctica.
Keywords: Correlation. Extreme events. Sea ice extent. Trends. Wind patterns.

Resumen: El hielo marino antártico desempeña un papel importante la regulación del clima, influyendo en la circulación atmosférica y oceánica. El objetivo es analizar las tendencias de la extensión del hielo marino antártico y verificar las condiciones meteorológicas asociadas a los años extremos de retroceso del hielo entre 2000-2024. Se utilizaron datos del reanálisis ERA5, estaciones meteorológicas (Palmer, Dumont D'Urville, Davis y Neumayer III) y extensión total del hielo en los sectores Bell-Amundsen, Weddell, Índico y Pacífico. Los resultados mostraron que la extensión total de hielo en el continente antártico ha mostrado una tendencia de reducción en verano de 40.000 km2 por año desde 2015. Los sectores mar de Weddell y el océano Índico también han mostrado tendencias de reducción en verano e invierno desde 2015, con una magnitud de hasta 17.428, 32 km2 por año en Weddell en verano. En el continente se han observado anomalías positivas de la temperatura del aire durante los años extremos de reducción del hielo en estos dos sectores, con mayor magnitud en invierno, lo que puede dar lugar a una menor formación de hielo en invierno y a una intensificación del deshielo en verano. Los patrones de viento en cada sector durante los años extremos favorecen la llegada de masas de aire cálido que potencian el deshielo. Concluimos que las condiciones meteorológicas, la temperatura del aire y la velocidad y dirección del viento, pueden influir en la formación y retirada del hielo marino en verano e invierno en la Antártida.
Palabras clave: Correlación. Eventos extremos. Extensión del hielo marino. Tendencias. Patrones de viento.

Submetido em: 12/07/2024
Aceito para publicação em: 25/03/2025
Publicado em: 25/04/2025

1. INTRODUÇÃO

O aquecimento da Antártica Ocidental e as perdas contínuas da camada de cobertura de neve e gelo desde 1990, com a maior taxa de perda entre 2010 e 2019, têm sido motivo de grande preocupação ao redor do mundo (ONU, 2022). Estudos, com dados até 2018, apontam que os níveis de extensão de gelo marinho na Antártica, oriundos do congelamento da água superficial do mar na costa do continente, atingiram seus maiores valores (cerca de 12,8 x 10^6 km²) em 2014, e a partir disso ocorreram diminuições rápidas tanto no gelo marinho antártico quanto no ártico (Simões, 2004; Ludescher, Yuan e Bunde, 2018; Parkinson, 2019).

Particularmente, a Antártica Ocidental e a Península Antártica, localizadas entre as latitudes 65° e 70°S, são as regiões que vêm apresentando aquecimento acelerado (Jones, Gilbert e Marsh, 2022), de aproximadamente 3°C nos últimos 50 anos (ONU, 2022), quando comparado com a Antártica Oriental (Simões *et al.*, 2011).

A desintegração das plataformas de gelo na Península Antártica é intensificada pelos ventos de oeste, os quais levam o ar marítimo quente para a região leste da península, resultando no aumento da temperatura superficial do ar a noroeste do mar de Weddell (Hillebrand *et al.*, 2020). Além disso, a recente fase positiva, sem precedentes no último milênio, do índice do Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode* - SAM) têm induzido a um fluxo mais intenso dos ventos de oeste, contribuindo para o aquecimento observado na Península Antártica (Fogt e Marshall, 2020).

Gandra (2022) explica que o SAM, ou Oscilação Antártica, é o principal modo de variabilidade climática nas regiões de latitudes médias e altas do Hemisfério Sul, sendo associado a anomalias de pressão ao nível médio do mar zonalmente simétricas e de sinais opostos nas latitudes médias e altas. Sua fase positiva é responsável pelo resfriamento da Antártica e aquecimento da Península Antártica, com o fortalecimento dos ventos de oeste, e em sua fase negativa, ocorre o oposto.

Carpenedo *et al.* (2023) investigaram os modos de variabilidade da temperatura do ar na superfície entre a Península Antártica e a América do Sul durante o verão austral (1979-2020) e encontraram que o primeiro modo, que representa um aquecimento no norte

da Península Antártica e sul da América do Sul, está associado com a combinação de uma fase positiva/neutra do SAM com a ocorrência de eventos de La Niña.

A Antártica possui um ecossistema sensível, sendo que os efeitos das mudanças climáticas podem ser observados com maior facilidade (Brum, 2015). Assim, os impactos das atividades antrópicas na Antártica, tais como a redução da camada de ozônio, a poluição atmosférica e a desintegração do gelo continental, revelam a sensibilidade da região às mudanças climáticas (Sigmond e Fyfe, 2014).

As variações na cobertura de gelo marinho influenciam no albedo oceânico, assim como impactam os gradientes de pressão e temperatura do ar, sendo que o aumento da temperatura do ar implica na retração do gelo, especialmente na região da Península Antártica (Lindemann, 2012; Carpenedo, 2016). Portanto, o gelo marinho possui papel fundamental para a regulação do clima, ao inibir trocas de calor entre o oceano e a atmosfera, afetando a circulação atmosférica e oceânica (Stachelski, 2020).

Nesse sentido, Hillebrand *et al.* (2020) apontaram que a formação do gelo marinho na Antártica é influenciada pelas condições meteorológicas, como a temperatura do ar, a temperatura da superfície do mar (TSM), a pressão ao nível médio do mar, a precipitação, a velocidade e a direção do vento. Por exemplo, Hillebrand *et al.* (2021) encontraram que, independentemente da fase do SAM, a temperatura do ar e a TSM apresentaram forte correlação negativa com o gelo marinho ao norte da Península Antártica no inverno austral, entre 1979 e 2018.

Assim, a hipótese deste estudo é que as condições meteorológicas supracitadas influenciam na formação e retração do gelo marinho, durante as estações de inverno e verão na Antártica. Nesse contexto, esse estudo teve por objetivo ampliar as pesquisas anteriores, que se propuseram a analisar essa influência, utilizando dados até o ano de 2024, nos períodos de inverno e verão.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

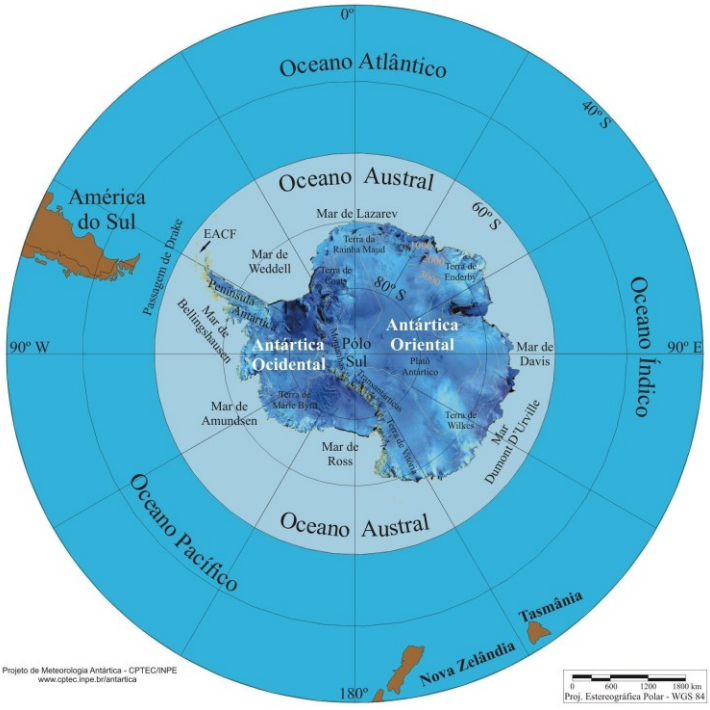
A Antártica foi o último continente a ser descoberto e se tornou uma reserva, protegida pela humanidade, destinada a estudos científicos (Lopes *et al.*, 2020). Considerando todas as ilhas e plataformas de gelo, a Antártica conta com uma área de cerca de 13.000.000 km²

(0,44% é área de solo descoberto), possui altitude média de 2.300 metros (parte do continente está a 2.555 metros abaixo do nível do mar), e sua cobertura de neve e gelo é de cerca de 4 km de espessura (Siqueira, 2023; Hammes, 2011).

O continente é dividido pela cadeia de Montanhas Transantárticas, responsável pela separação entre a Antártica Ocidental e a Antártica Oriental. A Antártica Oriental pode chegar a atingir cerca de 4.050 m de altitude, em função de seu substrato rochoso que está acima do nível do mar. Em contrapartida, o substrato rochoso da Antártica Ocidental se encontra abaixo do nível do mar, resultando em uma menor altitude (Junior, 2023; Hammes, 2011; Simões *et al.*, 2011).

A Figura 1 mostra as principais divisões geográficas do continente, bem como a categorização da Antártica Ocidental e Oriental. O continente é circundado pelo Oceano Austral, que se conecta com os oceanos Atlântico, Índico e Pacífico. A corrente circumpolar Antártica, corre de oeste a leste e suas águas frias se encontram com as águas quentes do norte na região de Convergência Antártica, que é caracterizada pela concentração de nutrientes e abundância de plantas e animais marinhos (Simões *et al.*, 2011).

Figura 1 - Mapa da Antártica e sua divisão geográfica.

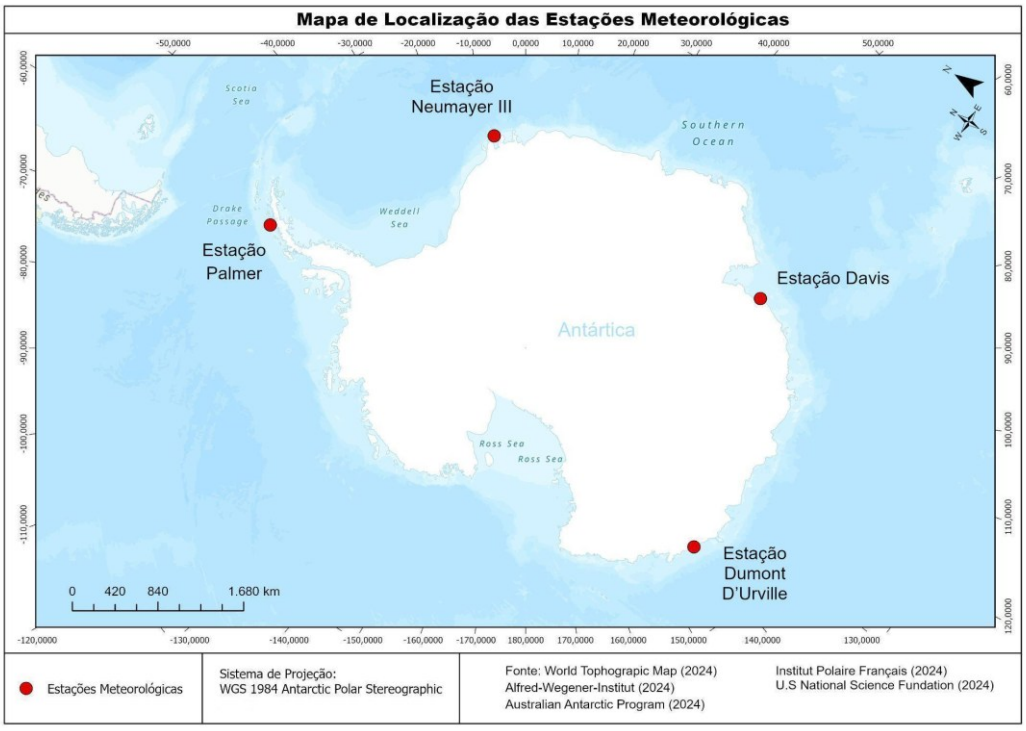


Fonte: Projeto de Meteorologia Antártica do CPTEC/INPE (2006).

A precipitação média em todo o continente é de 150 mm ao ano. Além disso, as temperaturas médias variam de -10°C na costa a -60°C nas partes mais altas. A mais baixa temperatura já registrada (-89,2°C) foi na estação russa Vostok em 1983 (Simões *et al.*, 2011; Hammes, 2011). O continente apresenta os intensos ventos catabáticos, responsáveis por transportar o ar frio do interior do continente para a costa por influência da gravidade (Lindemann, 2012).

Considerando as características citadas, a Figura 2 mostra o mapa da Antártica evidenciando as estações de monitoramento presentes no continente e, sinalizadas em vermelho, cujos dados foram utilizados neste estudo.

Figura 2 - Mapa da Antártica e localização das estações de monitoramento selecionadas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

2.2. Estações meteorológicas

Para identificar a influência entre os parâmetros meteorológicos com a extensão do gelo marinho foram selecionadas quatro estações, sendo elas: Palmer; Dumont D'Urville; Davis; e Neumayer III. Essas estações também foram utilizadas em outros estudos (Turner *et al.*, 2019; Turner *et al.*, 2021; Xin *et al.*, 2023). Complementando as análises, foram

selecionados quatro setores do Oceano Austral para analisar a extensão de gelo: Mar de Bellingshausen-Amundsen (Bell-Amundsen); Oceano Pacífico Oeste; Oceano Índico e Mar de Weddell. A seguir são descritas as particularidades das estações meteorológicas que foram utilizadas neste estudo.

2.2.1 Estação Palmer

A estação Palmer está localizada a sudoeste da Península Antártica, na Ilha Anvers (64°46’ S e 64°03’ W), com temperaturas que podem chegar a 2°C e -10°C no verão e inverno austral, respectivamente (*U. S. National Science Foundation,* [20--]).

2.2.2 Estação Dumont D’Urville

Foi inaugurada em 1956 na Ilha Petrel (66°40’ S e 140°01’ E), sendo localizada em território governado pela *French Southern and Antarctic Lands* (TAAF). Nessa estação, as temperaturas variam entre -1°C e -17°C no verão e inverno, respectivamente (*Institut Polaire Français*, 2023).

2.2.3 Estação Davis

É uma estação meteorológica australiana localizada na Costa Ingrid Christensen da Princesa Elizabeth Land (68°34’35” S e 77°58’08” E). As temperaturas registradas em Davis podem chegar a 13°C no verão e -40°C no inverno (*Australian Antarctic Program*, 2021).

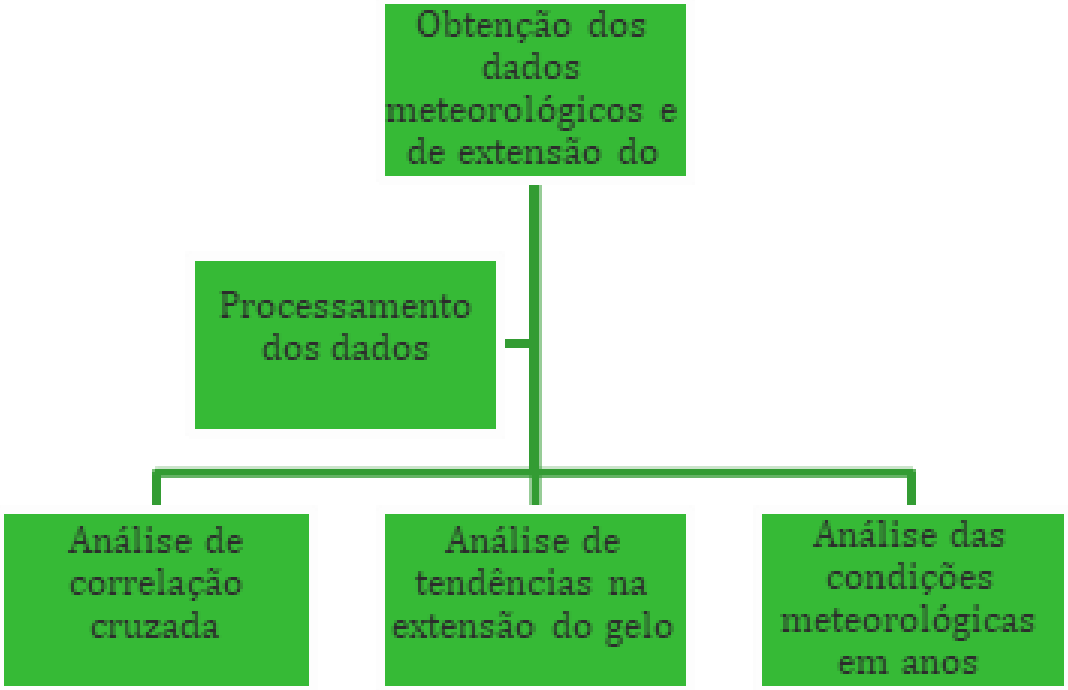
2.2.4 Estação Neumayer III

É uma estação de pesquisa alemã do Instituto Alfred-Wegener. Está localizada a 2.000 km do polo sul geográfico (70°37’ S e 08°22’ W) no setor Atlântico da Antártica. A estação iniciou sua operação em 1981 como centro de pesquisa alemã e já registrou a temperatura de -50,2°C em 2010 (*Alfred-Wegener-Institut*, 2022).

2.3. Dados e Métodos

O Figura 3 ilustra as etapas seguidas para a obtenção dos resultados deste estudo.

Figura 3 - Ilustração das etapas seguidas para o desenvolvimento do estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Nessa pesquisa foram utilizados dados da plataforma Meteomanz (http://www.meteomanz.com/). Este é um banco de dados meteorológicos abastecido por estações meteorológicas através de códigos numéricos - SYNOP (*Surface Synoptic Observations*) e dados binários - BUFR (*Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*) da Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization* - WMO). Ademais, o site possibilita o acesso aos dados de modelos de previsão global do GFS (*Global Forecast System*) e ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*).

A simplicidade do acesso ao Meteomanz faz com que seja possível selecionar a data do intervalo de dados, a estação meteorológica em questão e/ou coordenadas para obter dados climatológicos. Assim, esta plataforma foi utilizada para o levantamento dos dados das estações selecionadas (Palmer, Dumont D'urville, Davis e Neumayer III). O período de janeiro de 2000 a fevereiro de 2024, foi escolhido para esse estudo, devido a disponibilidade de uma série histórica homogênea para as quatro estações de monitoramento consideradas.

A análise da extensão do gelo da Antártica foi realizada utilizando os dados obtidos do NSIDC (*National Snow and Ice Data Center)*, da Universidade do Colorado em Boulder. Por

meio do satélite Nimbus-7, através de micro-ondas passivos, SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*), SSM/I (*Special Sensor Microwave/Imager*) e SSMIS (*Special Sensor Microwave Imager/Sounder*), o NSDIC possibilita a obtenção de dados diários, mensais e anuais de extensão do gelo marinho.

Assim, os dados mensais de janeiro de 2000 a fevereiro de 2024 foram obtidos considerando toda a Antártica e para quatro setores disponíveis, mencionados anteriormente (Mar de Bell-Amundsen, Mar de Weddell, Oceano Índico e Pacífico Oeste - Figura 1), sendo os mesmos já estudados por outros autores (Carpenedo *et al.*, 2022; Vasconcellos *et al*., 2022; Manakulam *et al*., 2025). Após isso, foram calculadas as médias para o período do verão (DJF - Dezembro, Janeiro e Fevereiro) e inverno (JJA - Junho, Julho e Agosto) de cada ano. Da mesma forma foi feito com os dados obtidos a partir da plataforma do Meteomanz.

No caso dos dados de extensão do gelo, procedeu-se também a uma padronização, calculando-se as anomalias sazonais e, posteriormente, dividindo as mesmas em cada ano pelo desvio padrão da série, de modo a identificar os anos extremos de retração do gelo marinho como sendo aqueles que apresentassem pelo menos um desvio padrão para menos (valores abaixo de -1), ou seja, valores distantes da média.

Primeiramente, procedeu-se a uma análise de correlação entre os parâmetros meteorológicos (velocidade do vento, temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima e pressão atmosférica), obtidos para cada uma das estações, e os dados de extensão do gelo por setor e total. Após isso, foram analisadas as tendências na extensão do gelo marinho por meio da aplicação de três testes: *Mann-Kendall*, *Mann-Kendall* modificado e Pettitt. As tendências foram consideradas estatisticamente significativas quando o nível de significância de 95% foi atingido, o que corresponde a um p-valor menor ou igual a 0,05. Todos os testes foram realizados utilizando o software Rstudio.

O teste de *Mann-Kendall*, calculado a partir do valor da variável Z_{MK}, é um método não-paramétrico (não se assume que os dados sigam uma distribuição normal), indicado para verificar tendências de séries temporais (Santos, 2016). Contudo, quando os dados das séries temporais não são aleatórios e influenciados por autocorrelação, testes de *Mann-Kendall* modificados podem ser usados para detectar tendências.

Yue e Wang (2004) propuseram uma abordagem de correção da variância para lidar com a influência da autocorrelação; dessa forma, primeiramente, remove-se a componente de tendência dos dados originais e o tamanho efetivo da amostra é calculado usando o coeficiente de autocorrelação lag-1. Após isso, os dados gerados são testados com o teste de tendência de *Mann-Kendall,* e a magnitude da tendência pode ser calculada por meio da Curvatura de Sen (*Sen's slope*).

O teste de Pettitt realiza uma verificação se duas amostras (x_1,..., x_t e x_{t+1},...,x_N) são provenientes de uma mesma população e, assim, a estatística $U_{t,N}$ faz uma contagem do número de vezes que uma observação da primeira amostra é maior que uma observação da segunda amostra (Pettitt, 1979). Por meio desse teste é possível determinar o ponto de mudança ocorrida na série, no qual o valor de $|U_{t,N}|$ é máximo (U*) e está associado a um nível de significância.

Após a análise de tendência, foram feitos compostos com os anos extremos de retração do gelo marinho para identificar as condições meteorológicas associadas a esses períodos extremos, comparando os mesmos com a climatologia (Carpenedo e Ambrizzi, 2016; Carpenedo *et al.*, 2022). Os compostos foram feitos somente para os setores que apresentaram tendências significativas na extensão do gelo marinho. Para isso, foram utilizados os dados das estações (Figura 2) e da reanálise do ERA5 do ECMWF para temperatura do ar em 2 m e em 850 hPa utilizando a plataforma WRIT (*Web-based Reanalysis Intercomparison Tool*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

O *software* WRPLOT View foi utilizado para gerar os gráficos da rosa dos ventos com base nos dados de direção e velocidade do vento das estações de monitoramento. O programa permite visualizar a frequência, direção e classes de velocidades dos ventos através de gráficos e tabelas de distribuição.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Análise de correlação

Primeiramente, foi feita uma análise de correlação cruzada entre temperatura média, temperatura máxima, temperatura mínima, pressão atmosférica e velocidade do vento com

a extensão do gelo marinho por setor e total, de modo a verificar o grau de relação entre esses parâmetros e a extensão do gelo (Tabela 1).

Embora cada estação esteja localizada em um setor (Davis e Dumont no Oceano Índico, Neumayer III no Mar de Weddell e Palmer em Bell-Amundsen, conforme Figuras 1 e 2), as condições meteorológicas observadas nessas estações podem ter uma relação com a extensão do gelo em outros setores; por isso foi realizada a correlação cruzada.

Tabela 1 - Correlação cruzada entre a extensão do gelo em cada setor e total com as variáveis meteorológicas medidas nas estações no período de 2000-2024. Números em negrito são significativos ao nível de 95%.

Velocidade do Vento								
Estação/Setor	***Davis***		***Dumont***		***Neumayer III***		***Palmer***	
	JJA	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**
Bell-Amundsen	-0,30	-0,14	0,08	-0,08	0,04	0,26	0,38	-0,11
Oceano Índico	0,11	-0,01	**-0,47**	**-0,47**	0,32	**0,52**	0,36	**0,65**
Weddell	-0,03	-0,08	-0,40	-0,37	0,20	0,04	0,07	**0,46**
Pacífico Oeste	0,17	**-0,52**	**-0,50**	-0,26	-0,07	0,09	0,23	0,35
Total	0,05	-0,10	**-0,60**	**-0,44**	0,27	0,18	**0,47**	**0,56**
Temperatura média								
Estação/Setor	***Davis***		***Dumont***		***Neumayer III***		***Palmer***	
	JJA	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**
Bell-Amundsen	-0,28	-0,06	0,05	0,01	0,09	-0,02	**-0,57**	0,24
Oceano Índico	-0,10	-0,24	0,06	-0,13	-0,10	-0,30	**-0,53**	**-0,55**
Weddell	-0,11	0,19	-0,09	0,05	-0,37	-0,15	-0,08	**-0,62**
Pacífico Oeste	-0,06	0,05	-0,14	0,32	-0,09	-0,02	-0,12	**-0,50**
Total	-0,06	0,09	-0,02	0,02	-0,22	-0,23	**-0,56**	**-0,68**
Temperatura mínima								
Estação/Setor	***Davis***		***Dumont***		***Neumayer III***		***Palmer***	
	JJA	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**
Bell-Amundsen	-0,30	0,05	0,04	0,00	0,03	0,00	**-0,58**	0,24
Oceano Índico	-0,12	-0,19	0,04	-0,08	-0,09	-0,25	**-0,53**	**-0,56**
Weddell	-0,13	0,17	-0,11	0,13	-0,28	-0,16	-0,07	**-0,63**
Pacífico Oeste	-0,08	-0,04	-0,15	0,36	-0,08	0,01	-0,12	**-0,49**
Total	-0,10	0,11	-0,05	0,13	-0,19	-0,23	**-0,56**	**-0,69**
Temperatura máxima								
Estação/Setor	***Davis***		***Dumont***		***Neumayer III***		***Palmer***	
	JJA	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**	**JJA**	**DJF**
Bell-Amundsen	-0,24	-0,16	0,06	0,02	0,17	-0,06	**-0,55**	0,24
Oceano Índico	-0,08	-0,27	0,07	-0,18	-0,12	-0,35	**-0,53**	**-0,54**
Weddell	-0,09	0,20	-0,07	-0,06	**-0,46**	-0,14	-0,09	**-0,61**
Pacífico Oeste	-0,03	0,11	-0,14	0,19	-0,10	-0,07	-0,12	**-0,50**
Total	0,00	0,07	0,00	-0,14	-0,26	-0,22	**-0,56**	**-0,65**
Pressão atmosférica								
Estação/Setor	***Davis***		***Dumont***		***Neumayer III***		***Palmer***	
	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF	JJA	DJF
Bell-Amundsen	-0,09	0,01	-0,25	0,08	-0,20	0,08	-0,03	-0,19
Oceano Índico	-0,22	0,00	-0,09	0,09	-0,23	-0,09	0,01	0,09
Weddell	-0,33	0,07	-0,09	0,15	-0,39	0,01	-0,04	0,36
Pacífico Oeste	0,24	0,06	-0,18	0,07	0,17	-0,07	-0,02	0,14
Total	-0,11	0,09	-0,08	0,20	-0,24	0,03	-0,06	0,32

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Analisando a Tabela 1, em termos de correlações significativas ao nível de 95%, pode-se verificar que a velocidade do vento possui correlação com a extensão total do gelo nas estações de Dumont e Palmer no inverno e verão, sendo que em Dumont esta correlação é negativa, e em Palmer, positiva. A estação Dumont também apresenta, no verão e inverno, correlação negativa da velocidade do vento com a extensão do gelo no setor do Oceano Índico, onde a mesma se localiza (Figura 2).

Com relação às temperaturas média, máxima e mínima, os padrões de correlação entre as estações e os setores são muito similares, com destaque para a estação Palmer, a qual apresenta correlação negativa com a extensão total do gelo no verão e inverno, indicando que, quanto maior a temperatura, menor é a extensão do gelo (Turner *et al.*, 2019; Turner *et al.*, 2021). Quando se analisa por setor, Palmer apresenta correlação negativa com a extensão do gelo em Bell-Amundsen e Índico no inverno e em todos os setores no verão, com exceção de Bell-Amundsen.

Além disso, a estação Neumayer III apresenta correlação negativa e significativa entre a temperatura máxima e a extensão do gelo no setor do Mar de Weddell no inverno. Por fim, destaca-se que não foram observadas correlações significativas entre a extensão do gelo e a pressão atmosférica; por isso, essa variável não foi considerada nas análises seguintes.

3.2. Análise de tendência

Foram realizadas as análises de tendência, primeiramente, considerando toda a extensão do gelo, no intervalo de 2000-2024, nos períodos de inverno e verão. De acordo com a Tabela 2, no verão, há uma tendência estatisticamente significativa, ao nível de 95%, de acordo com os testes de *Mann-Kendall* modificado (MMK) e de Pettitt (PT). Assim, a extensão total do gelo no continente antártico tende a sofrer uma redução no período do verão de 40.000 km^2 por ano, de acordo com a inclinação de Sen, sendo que o teste de Pettitt indica o ponto de mudança como sendo o ano de 2015.

Tabela 2 - Estatísticas da análise de tendências (*Mann-Kendall* – Z_{MK}, *Mann-Kendall* modificado – Z_{MMK} e Pettitt – U*) para a extensão total do gelo (x 10^6 km^2) no continente Antártico no intervalo de 2000-2024 nas duas estações do ano. Valores em negrito são significativos ao nível de 95%.

Intervalo	Z_{mk}	p-valor	Z_{mmK}	p-valor	U*	p-valor
Inverno: 2000-2024	-1,26	0,21	-1,71	0,09	90	0,07
Verão: 2000-2024	-1,81	0,07	-2,51	**0,01**	120	**0,005**

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Alguns estudos, como os de Ludescher, Yuan e Bunde (2018) e Parkinson (2019), analisaram as tendências de gelo marinho no Continente Antártico e Ártico, mostrando que o mesmo apresentou tendência crescente até 2014 e, a partir de 2015, iniciou-se um período de retração, especialmente no intervalo entre 2016 e 2017. Fatores como as anomalias recordes da TSM, transporte de água superficial quente e tendência positiva do SAM, que contribuíram para a abrupta diminuição do gelo marinho no final do ano de 2016, estão bem detalhados em Meehl *et al.* (2019).

Quando se aplica o teste de tendência considerando os setores do Mar de Weddell e Oceano Pacífico, verifica-se, na Tabela 3, que somente o setor de Weddell apresentou tendência significativa no verão (testes de *Mann-Kendall* modificado e Pettitt) e no inverno (teste de *Mann-Kendall* modificado). A retração do gelo no inverno em Weddell, de acordo com a inclinação de Sen, é de 13.009,58 km^2 por ano, e no verão de 17.428, 32 km^2 por ano, sendo que o teste de Pettitt indica o ponto de mudança no verão como sendo o ano de 2015, como observado anteriormente quando a extensão total do gelo foi analisada.

Segundo Massom *et al.* (2018), o gelo marinho antártico protege e estabiliza certos mantos de gelo e, portanto, a redução desse gelo marinho pode desencadear a desintegração desses mantos de gelo e resultar na elevação do nível do mar.

Tabela 3 - Análise de tendências (*Mann-Kendall* – Z_{MK}, *Mann-Kendall* modificado – Z_{MMK} e Pettitt – U*) para a extensão do gelo (km²) nos setores de Weddell e Pacífico Oeste no intervalo de 2000-2024 nas duas estações do ano. Valores em negrito são significativos ao nível de 95%.

Setor	Weddell						Pacífico					
Intervalo	Z_{mk}	p-valor	Z_{mmk}	p-valor	U*	p-valor	Z_{mk}	p-valor	Z_{mmk}	p-valor	U*	p-valor
Inverno: 2000-2024	-1,26	0,21	-2,42	**0,01**	67	0,31	0,00	1,00	0,00	1,00	57	0,52
Verão: 2000-2024	-1,51	0,13	-2,20	**0,03**	116	**0,007**	-0,12	0,90	-0,16	0,87	64	0,36

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Quando se considera os setores de Bell-Amundsen e Oceano Índico, verifica-se que somente o setor do Índico apresentou tendências significativas, conforme a Tabela 4, no período de inverno (testes de *Mann-Kendall* modificado e Pettitt) e verão (teste de *Mann-Kendall* modificado). A retração do gelo no inverno no Índico, de acordo com a inclinação de Sen, é de 10.075,19 km² por ano, e no verão de 4.505,71 km² por ano, sendo que o teste de Pettitt indica o ponto de mudança no inverno como sendo o ano de 2015.

Tabela 4 - Análise de tendências (*Mann-Kendall* – Z_{MK}, *Mann-Kendall* modificado – Z_{MMK} e Pettitt – U*) para a extensão do gelo (km²) nos setores de Bell-Amundsen e Índico no intervalo de 2000-2024 nas duas estações do ano. Valores em negrito são significativos ao nível de 95%.

Setor	Bell-Amundsen						Índico					
Intervalo	Z_{mk}	p-valor	Z_{mmk}	p-valor	U*	p-valor	Z_{mk}	p-valor	Z_{mmk}	p-valor	U*	p-valor
Inverno: 2000-2024	0,17	0,86	0,35	0,73	47	0,80	-1,51	0,13	-2,31	**0,02**	94	**0,05**
Verão: 2000-2024	0,12	0,90	0,22	0,83	44	0,89	-1,21	0,22	-2,18	**0,03**	79	0,15

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

3.3. Análise da direção e velocidade dos ventos

Para as análises seguintes foram considerados os anos extremos de retração de gelo aqueles que apresentaram pelo menos um desvio padrão para menos (valores abaixo de -1) nos setores com tendências significativas de retração do gelo. Assim, os setores do Mar de Weddell e do Oceano Índico foram considerados nos períodos de verão e inverno, além da

extensão total do gelo no verão, que apresentou tendência de redução significativa, conforme mencionado anteriormente.

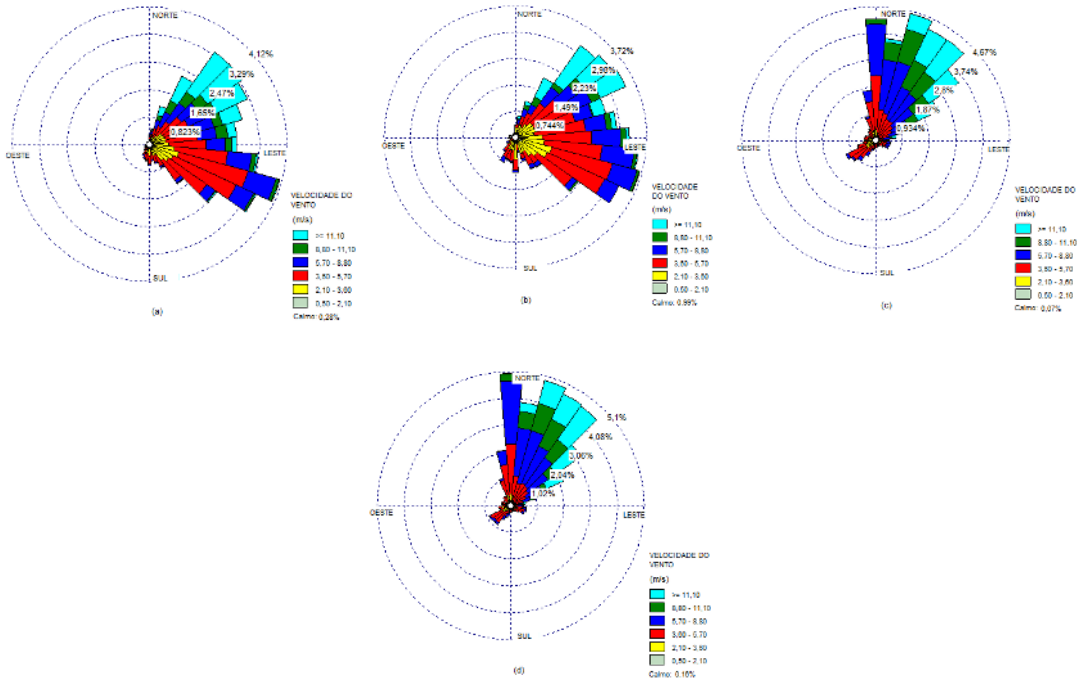
Além disso, a estação Dumont, localizada no setor do Oceano Índico, apresentou correlação significativa entre a extensão de gelo nesse setor e a velocidade do vento no inverno e verão; e a estação Palmer, localizada em Bell-Amundsen, apresentou correlação significativa entre a velocidade do vento no verão e a extensão de gelo no setor mais próximo a Bell-Amundsen, no Mar de Weddell, indicando como as condições meteorológicas observadas nas estações podem ter uma relação com a extensão do gelo em outros setores, conforme verificado na Tabela 1.

Deve-se ressaltar que, além da velocidade, a direção do vento também é um componente meteorológico importante, pois, como Palmer se localiza ao norte da Península Antártica, um fortalecimento dos ventos de oeste nessa estação pode favorecer divergência de gelo marinho em Weddell, devido ao transporte de Ekman (Parise, 2014) e, portanto, o aumento da sua extensão.

Dessa forma, foram consideradas na análise de direção e velocidade dos ventos, em anos extremos de retração do gelo marinho, as estações de Davis e Dumont no setor do Oceano Índico, e Palmer e Neumayer III no setor de Weddell. Assim, os anos extremos de retração do gelo nesses setores foram considerados nos compostos de direção e velocidade do vento utilizados na elaboração da rosa dos ventos. Os anos extremos de retração do gelo marinho no setor do Oceano Índico foram 2016, 2019 e 2023 para o inverno (JJA) e 2016/2017, 2017/2018, 2022/2023 e 2023/2024 para o verão (DJF). Já os anos extremos de retração do gelo no Mar de Weddell foram 2011, 2018, 2022 e 2023 para o inverno (JJA) e 2017/2018, 2018/2019, 2019/2020 e 2023/2024 para o verão (DJF).

O mesmo foi feito em relação à extensão total de gelo; porém, somente para o período de verão, o qual apresentou tendência significativa de retração do gelo marinho (Tabela 2); sendo que os anos extremos foram 2016, 2017, 2018, 2019, 2022 e 2023 (Meehl *et al.,* 2019 e Manakulam *et al.*, 2025). A Figura 3 mostra a rosa dos ventos para a estação Davis considerando a climatologia e os compostos dos anos extremos de redução na extensão do gelo no período de inverno e verão no setor do Oceano Índico.

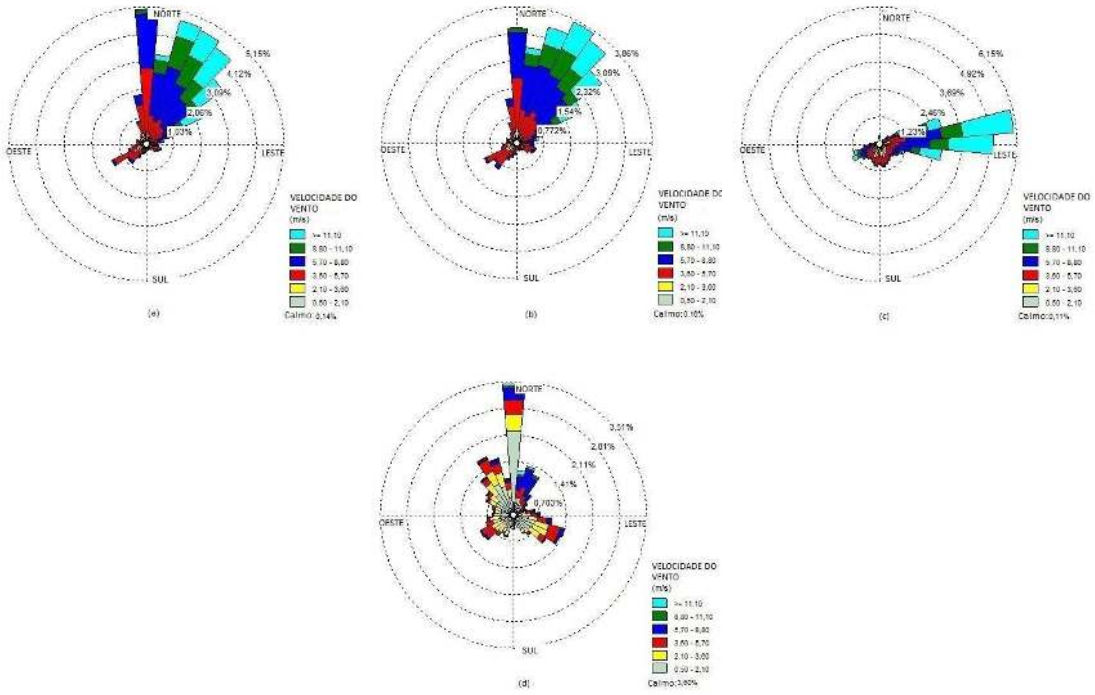
Figura 3 - Rosa dos ventos para a estação Davis, considerando a climatologia de 2000-2024 no inverno (a) e verão (c) e para os compostos dos anos extremos de retração do gelo no inverno (b) e verão (d) no setor do Oceano Índico.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A estação Davis (Figura 3), localizada na porção da Antártica Oriental, no setor do Oceano Índico (Figura 2), apresenta um padrão de ventos bem definido, com grande diferenciação entre o inverno e o verão. Há forte influência dos ventos de lés-sudeste (ESE) a nordeste (NE) no inverno e de norte (N) a nor-nordeste (NNE) no verão (Figuras 3a e 3c). Nos anos extremos, há aumento da frequência dos ventos de leste (E) no inverno (Figura 3b) e de norte (N) e nor-nordeste (NNE) no verão (Figura 3d), favorecendo a vinda de massas de ar mais quentes. Quando se considera a extensão total do gelo marinho no verão (Figura 4a), verifica-se uma intensificação maior desse padrão observado no setor do Índico (Figura 3d).

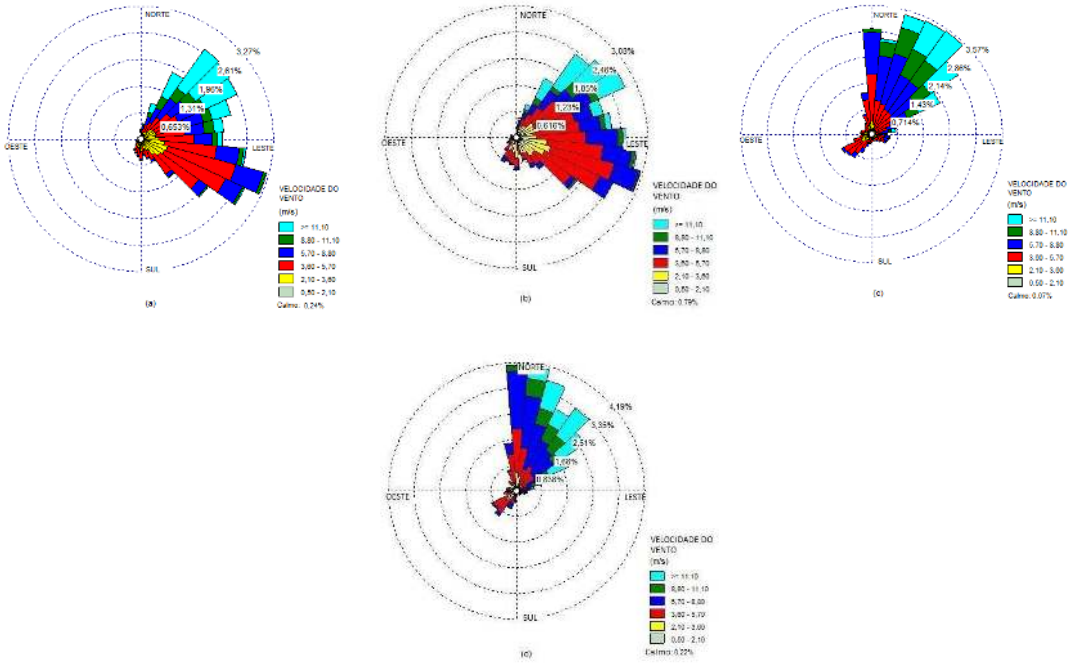
Figura 4 - Rosa dos ventos considerando os compostos dos anos extremos de retração na extensão total do gelo no verão para as estações (a) Davis, (b) Dumont, (c) Neumayer III e (d) Palmer.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A Figura 5 mostra a rosa dos ventos para a estação Dumont D'Urville considerando a climatologia e os compostos dos anos extremos de redução na extensão do gelo no período de inverno e verão no setor do Oceano Índico. A estação Dumont D'Urville também está localizada na porção da Antártica Oriental, no setor do Oceano Índico (Figura 2); porém, ao sul da estação Davis.

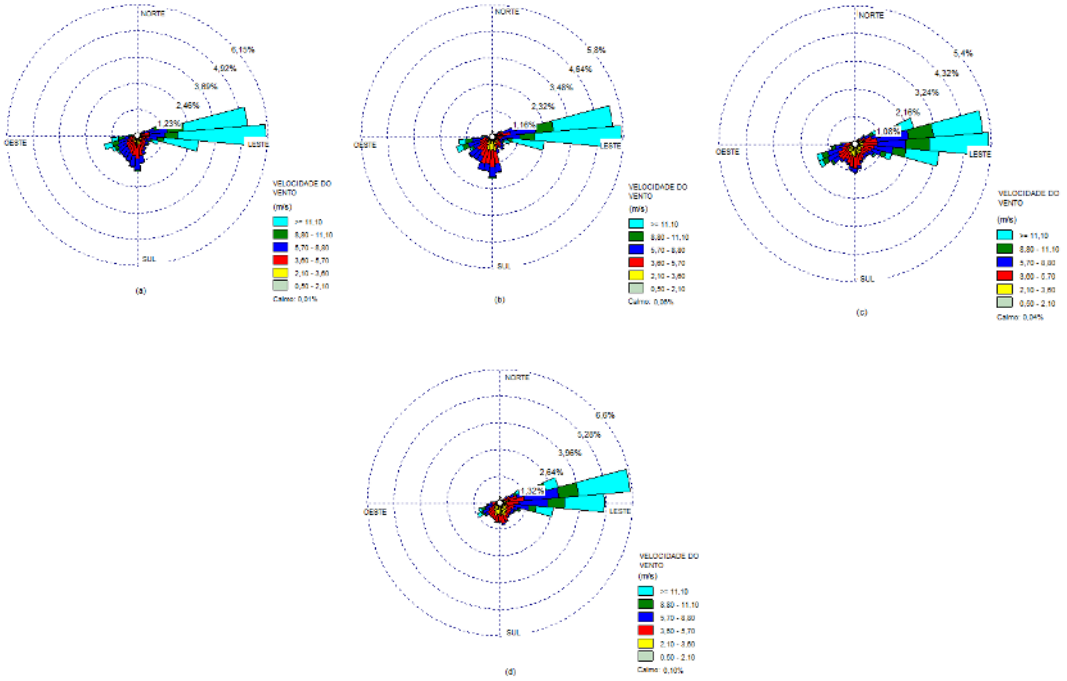
Figura 5 - Rosa dos ventos para a estação Dumont D'Urville, considerando a climatologia de 2000-2024 no inverno (a) e verão (c) e para os compostos dos anos extremos de retração do gelo no inverno (b) e verão (d) no setor do Oceano Índico.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Pode-se notar que o padrão de ventos em Dumont (Figura 5) é muito similar ao observado na estação Davis (Figura 3), porém apresentando menor frequência. Nos anos extremos, também se verifica aumento da frequência dos ventos de leste no inverno (Figura 5b) e de norte e nor-nordeste no verão (Figura 5d), favorecendo a vinda de massas de ar mais quentes que atravessam o continente antártico, o qual, no verão, terá uma temperatura mais elevada do que o oceano (Turner *et al.*, 2019; Turner *et al.*, 2021). Quando se considera a extensão total do gelo marinho, verifica-se um padrão muito similar ao observado na estação Davis (Figura 4a); porém, com menor frequência (Figura 4b). A Figura 6 mostra a rosa dos ventos para a estação Neumayer III considerando a climatologia e os compostos dos anos extremos de redução na extensão do gelo no período de inverno e verão no setor do Mar de Weddell.

Figura 6 - Rosa dos ventos para a estação Neumayer III, considerando a climatologia de 2000-2024 no inverno (a) e verão (c) e para os compostos dos anos extremos de retração de gelo no inverno (b) e verão (d) no setor do Mar de Weddell.

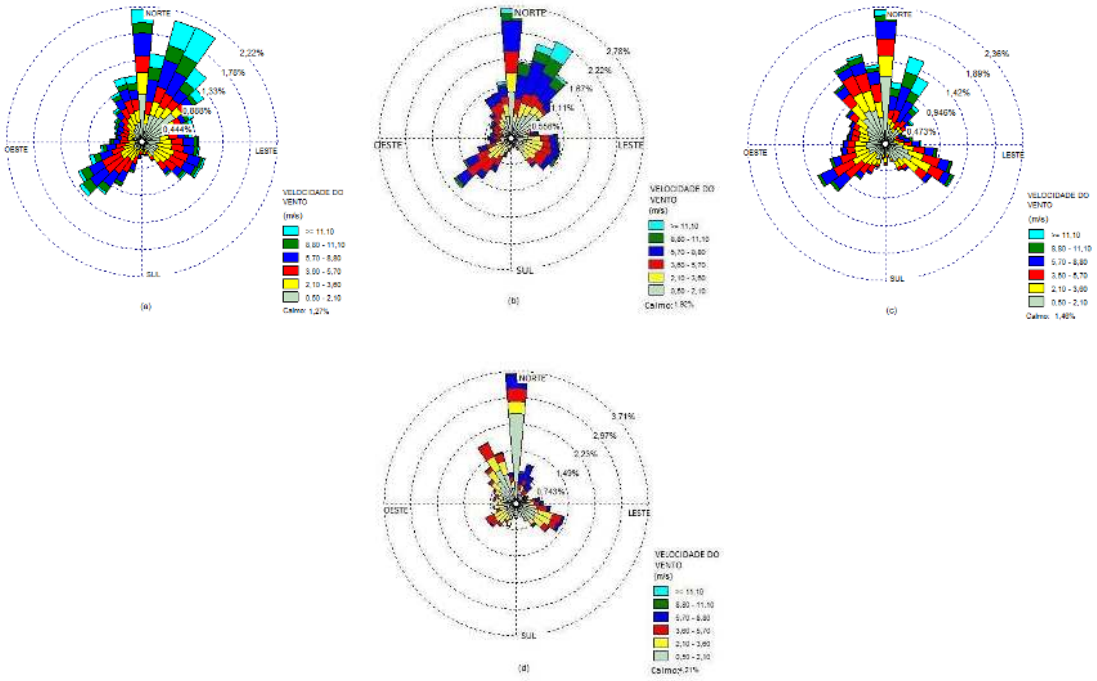


Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A estação Neumayer III, localizada na porção da Antártica Ocidental, no setor do Mar de Weddell (Figura 2), tem um padrão único, não se observando grandes diferenças entre inverno e verão (Figura 6). Seus ventos são predominantemente vindos do leste e lés-nordeste, com pequena frequência de ventos de sul, especialmente no inverno (Figura 6a), passando pelo continente. Konig-Langalo e Herber (1996) também constataram que em Neumayer a componente média do vento zonal é de leste durante todo o ano e os ventos catabáticos vindos do sul, ocorrem com uma frequência menor.

Nos anos extremos a frequência de ventos de leste e lés-nordeste diminui no inverno e aumenta no verão (Figura 6b e 6d). Quando se considera a extensão total do gelo marinho, também se verifica um padrão similar ao observado no verão para os anos extremos em Weddell (Figura 6d); porém, com menor frequência (Figura 4c). A Figura 7 mostra a rosa dos ventos para a estação Palmer considerando a climatologia e os compostos dos anos extremos de redução na extensão do gelo no período de inverno e verão no setor do Mar de Weddell.

Figura 7 - Rosa dos ventos para a estação Palmer, considerando a climatologia de 2000-2024 no inverno (a) e verão (c) e para os compostos dos anos extremos de retração de gelo no inverno (b) e verão (d) no setor do Mar de Weddell.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

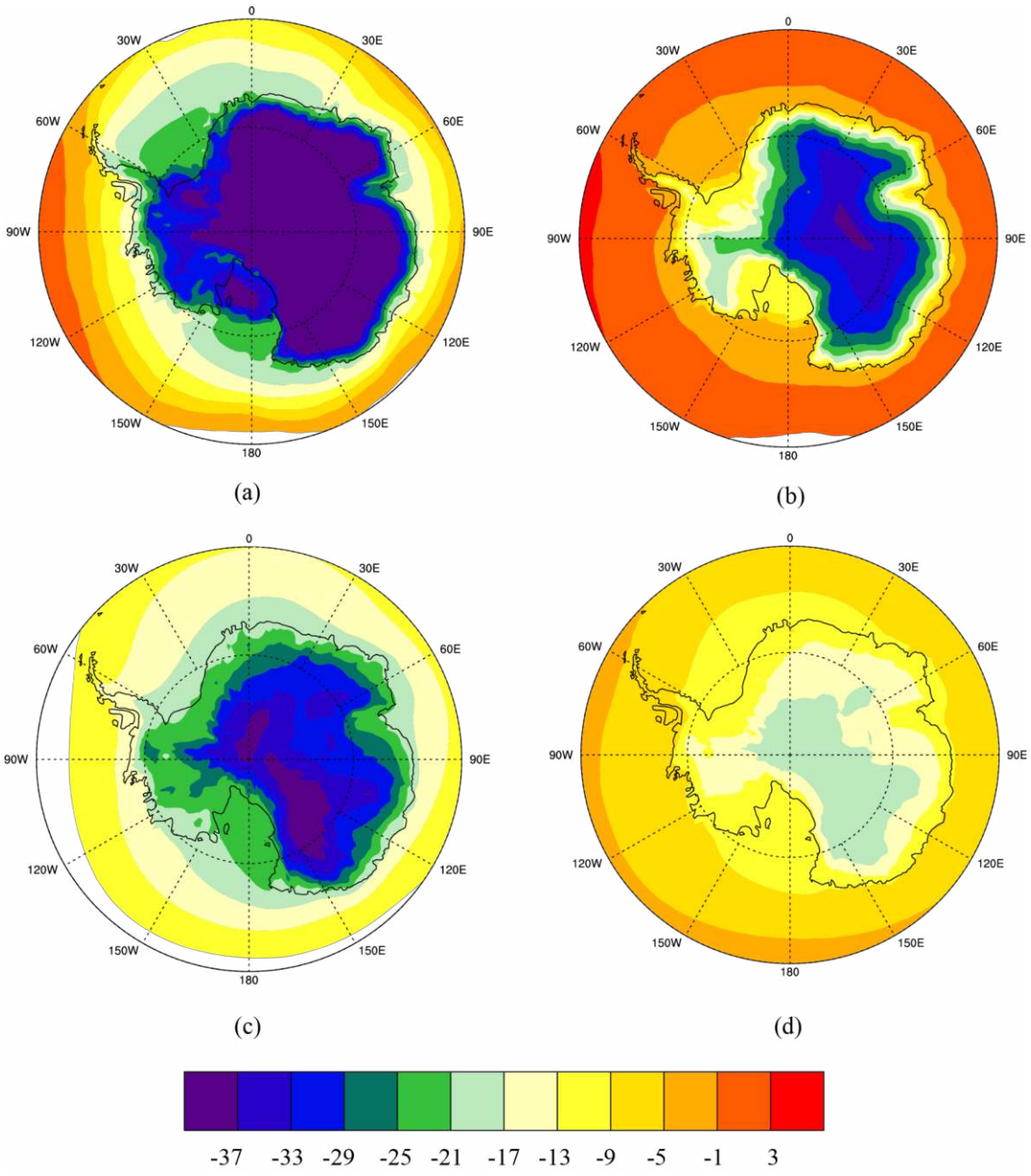
Pode-se notar que, na estação Palmer (Figura 7), os ventos são provenientes de várias direções diferentes, o que pode ser justificado pela localização da estação, já que a Península Antártica é o ponto mais setentrional da Antártica. Contudo, verifica-se que os ventos predominantes, de maior frequência, são provenientes das direções norte e nor-nordeste no inverno e norte no verão (Figuras 7a e 7c).

Quando se considera os anos extremos de redução na extensão do gelo no setor de Weddell, verifica-se um aumento da frequência dos ventos de norte a nordeste no inverno (Figura 7b), sendo que no verão os ventos de norte aumentam sua frequência e passam a ser totalmente predominantes (Figura 7d), trazendo, assim, para a região ventos relativamente mais quentes, favorecendo o degelo (Haumann, Notz e Schmidt, 2014; Turner *et al*., 2019). Quando se considera a extensão total do gelo marinho, verifica-se um padrão similar ao observado no verão para essa estação nos anos extremos em Weddell (Figura 7d); porém, com menor frequência (Figura 4d).

3.4. Influência da temperatura do ar

A Figura 8 mostra a climatologia para a temperatura do ar a 2 m (Figuras 8a e 8b) e em 850 hPa (Figuras 8c e 8b), no inverno e verão, para fins de comparação, visto que a altitude média do continente Antártico é de aproximadamente 2,3 km.

Figura 8 - Temperatura média do ar (°C) no período de 2000-2024 em 2 m para o inverno (a) e verão (b) e em 850 hPa para o inverno (c) e verão (d) com base nos dados da reanálise ERA5.



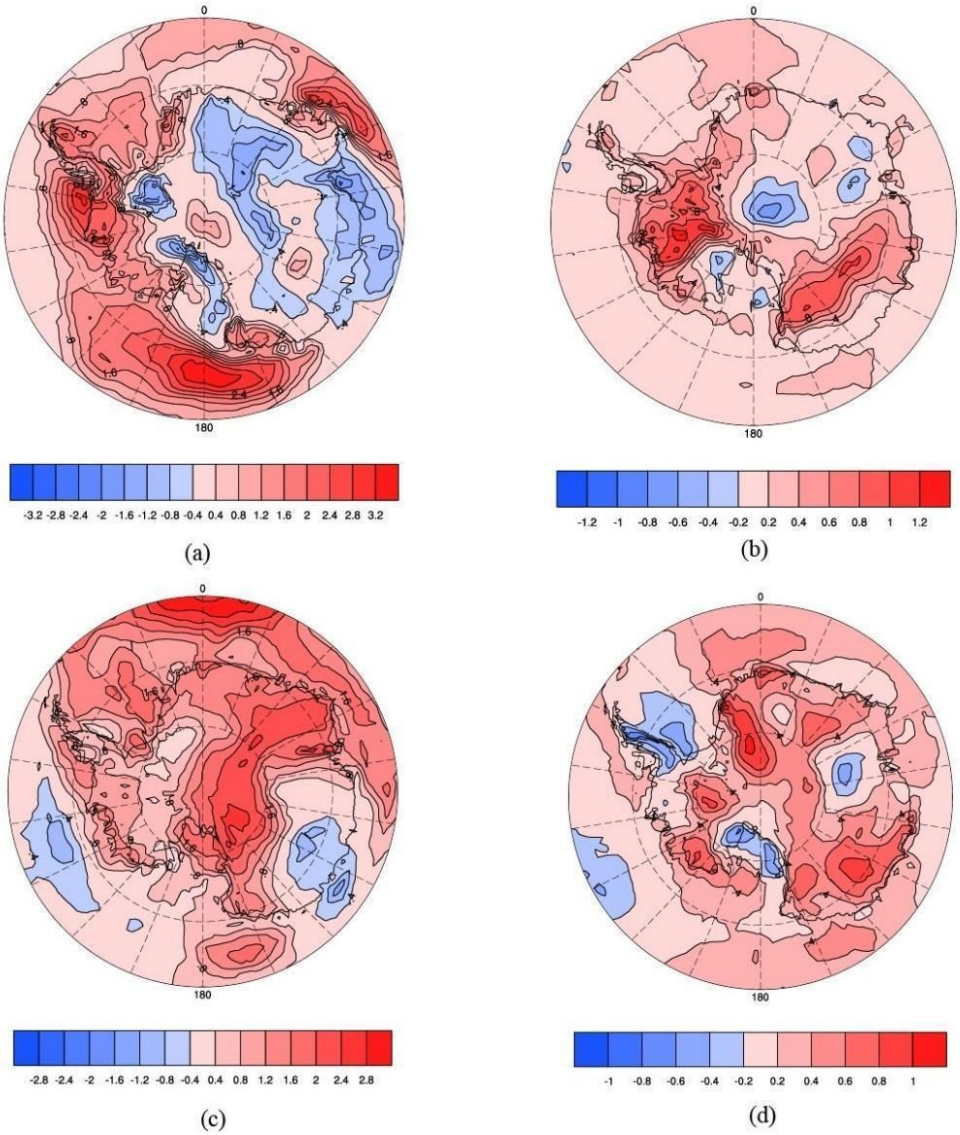
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Pode-se verificar que, no inverno, o continente sofre um grande resfriamento, principalmente na Antártica Oriental graças à sua elevada altitude, enquanto que na Antártica Ocidental, o continente não apresenta temperaturas tão baixas, especialmente no extremo oeste e na região da Península Antártica em 2m (Figura 8a), sendo que em 850 hPa, as temperaturas não são tão baixas (Figura 8c).

Durante o verão, o aumento da temperatura do ar no continente pode ser observado principalmente na Península Antártica e na costa ao redor do continente, preservando as baixas temperaturas na porção da Antártica Oriental, tanto em 2m (Figura 8b) quanto em 850 hPa (Figura 8d). Assim, as estações Dumont e Davis estão localizadas em uma região em que as temperaturas são mais baixas em relação às estações Palmer e Neumayer III.

A Figura 9 apresenta os compostos das anomalias de temperatura do ar em 2 m, visto que é o mais próximo da superfície, nos anos extremos de redução na extensão do gelo no setor do mar de Weddell e do Oceano Índico. Deve-se ressaltar que os compostos também foram feitos para a temperatura do ar ao nível de 850 hPa e os resultados foram similares, porém, as anomalias apresentaram magnitudes inferiores nesse nível de pressão atmosférica, uma vez que as variações de temperatura mais próximas da superfície influenciam mais fortemente na redução da extensão do gelo.

Figura 9 - Compostos das anomalias da temperatura do ar (°C) nos anos extremos para os setores do Índico no inverno (a) e verão (b) e Weddell no inverno (c) e verão (d) com base nos dados da reanálise ERA5.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No inverno, para os anos extremos no Oceano Índico (Figura 9a), são observadas anomalias positivas de temperatura de até 3,2°C em grande parte do continente, mas, especialmente na Península Antártica, porção do extremo nordeste e sul do continente. No verão (Figura 9b) as anomalias positivas de até 1,2°C abrangem praticamente todo o continente, mas, com menor intensidade.

No caso dos anos extremos no setor do mar de Weddell, pode-se notar anomalias positivas tanto no verão quanto no inverno, mas com maior magnitude no inverno, chegando

a 2,8 ºC (Figura 9c e 9d). O aumento da temperatura do ar, especialmente no inverno, pode resultar em menor formação de gelo, e, uma vez que o verão é o período de derretimento do gelo marinho, as anomalias positivas favorecem essa condição, intensificando o degelo. Ressalta-se que a Península Antártica apresenta anomalias positivas de temperatura do ar nos dois setores e nas duas estações do ano (chegando a 3,2ºC no Índico no inverno - Figura 9a) com exceção da porção ocidental do setor de Weddell e oriental do setor de Bell-Amundsen no verão, que apresenta fraca anomalia negativa de 0,6ºC (Figura 9d).

Anteriormente, verificou-se que a estação Palmer, localizada a sudoeste da Península Antártica, apresentou correlações negativas entre a temperatura média, máxima e mínima com a extensão do gelo em todos os setores no verão, com exceção de Bell-Amundsen, que apresentou correlação positiva não-significativa (Tabela 1). Isto pode estar associado a fraca anomalia negativa observada na Figura 9d. Contudo, como a Figura 9 foi baseada nos dados da reanálise ERA5, sugere-se que, em estudos futuros, seja realizada a validação destes dados por meio dos dados das estações meteorológicas e avaliada a correlação espacial entre a temperatura do ar e a retração do gelo marinho.

Por fim, observou-se, anteriormente, que a estação Neumayer III apresentou correlação negativa entre a temperatura máxima e a extensão de gelo em Weddell no inverno (Tabela 1), corroborando com a Figura 9c, que apresenta anomalia positiva na temperatura do ar na região onde se localiza esta estação (Figuras 2 e 9).

Assim, a hipótese deste estudo, de que as condições meteorológicas, particularmente a temperatura do ar e a velocidade e direção do vento, influenciam na formação e retração do gelo marinho, durante as estações de inverno e verão na Antártica, foi corroborada, por meio da análise de compostos com os anos extremos de retração do gelo marinho nos setores que apresentaram tendências significativas de redução em sua extensão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo teve como objetivo analisar tendências na extensão do gelo marinho Antártico e verificar as condições meteorológicas associadas aos anos extremos de retração do gelo no período de 2000 a 2024. Três testes de tendência foram aplicados e verificou-se que a extensão total do gelo no continente antártico apresenta, desde 2015, tendência de

redução no verão de 40.000 km^2 por ano. O setor do Mar de Weddell também apresenta, desde 2015, tendência de redução no verão (inverno) de 17.428, 32 (13.009,58) km^2 por ano; bem como o setor do Oceano Índico, com tendência de redução, desde 2015, de 10.075,19 (4.505,71) km^2 por ano no inverno (verão).

Os resultados mostraram que nos anos extremos de retração do gelo no Oceano Índico há aumento da frequência dos ventos de leste no inverno e de norte e nor-nordeste no verão, favorecendo a vinda de massas de ar mais quentes, potencializando o degelo. Já no setor do Mar de Weddell os anos extremos de retração do gelo estão associados a uma menor(maior) frequência de ventos de leste e lés-nordeste no inverno (verão) e uma maior frequência de ventos de norte (N) a nordeste (NE) no inverno e, especialmente no verão, trazendo, assim, para a região ventos relativamente mais quentes, também favorecendo o degelo. Quando se considera a extensão total do gelo marinho no verão verifica-se um padrão similar de vento ao que foi observado em cada setor, porém, com menor frequência.

Por fim, anomalias positivas de temperatura do ar foram verificadas nos anos extremos de retração do gelo no Oceano Índico e no Mar de Weddell, com maior magnitude no inverno em grande parte do continente, mas, especialmente na Península Antártica, o que pode resultar em menor formação de gelo no inverno e intensificação do degelo no verão.

Portanto, conclui-se que as condições meteorológicas, particularmente a temperatura do ar e a velocidade e direção do vento, podem influenciar significativamente na formação e retração do gelo marinho durante o verão e inverno na Antártica. Sugere-se que estudos futuros analisem outras variáveis meteorológicas e a correlação espacial da retração do gelo.

REFERÊNCIAS

ALFRED-WEGENER-INSTITUT. **Fleet + stations**. Neumayer Station III, [2022]. Disponível em: https://www.awi.de/en/fleet-stations/stations/neumayer-station-iii.html. Acesso em: 17 out. 2023.

AUSTRALIAN ANTARCTIC PROGRAM. **Antarctic operations**. Stations: Davis Research Station, [2021]. Disponível em: https://www.antarctica.gov.au/antarctic-operations/stations/davis/. Acesso em 17 out. 2023.

BRUM, A. C. **Antártica: Proteção no Direito Ambiental Internacional e Partipação Brasileira**. 2015. Monografia (Pós-Graduação em Direito) - Curso de Especialização em Direito Ambiental

Nacional e Internacional, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: http://hdl.handle.net/10183/143341. Acesso em: 15 nov. 2023.

CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Células de Circulação Meridional Durante os Eventos Extremos de Gelo Marinho Antártico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 251-261, Jul./Set. 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-778631320150137. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/DZSgStPhdVGvML3VMJFmwFQ/?lang=pt. Acesso em: 09 dez. 2023.

CARPENEDO, C. B. *et al*. Atmospheric circulation patterns associated with surface air temperature variability trends between the Antarctic Peninsula and South America. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 95, p. 1-14, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/0001-3765202320220591. Available from: https://www.scielo.br/j/aabc/a/PcH8674QxF9G8DXrvTGTKTr/?lang=en. Access in: 09 dec. 2023.

CARPENEDO, C. B. *et al.* The high-frequency variability of Antarctic sea ice and polar cold air incursions over Amazonia. **International Journal of Climatology**, p. 3397-3407, Nov. 2021. DOI: 10.1002/joc.7422. Available from: https://www.researchgate.net/publication/355593346_The_high-frequency_variability_of_Antarctic_sea_ice_and_polar_cold_air_incursions_over_Amazonia. Access in: 28 feb. 2025.

CPTEC/INPE. **Projeto de Meteorologia Antártica**. Mapa da Antártica, ilustrando suas principais regiões, [2006]. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/edicoes/2008/dez/apendice_b.shtml. Acesso em: 28 mar. 2024.

EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. **About us**. ECMWF: is the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, [20--]. Disponível em: https://www.ecmwf.int/en/about. Acesso em: 16 out. 2023.

FOGT, R. L.; MARSHALL, G. J. The Southern Annular Mode: Variability, trends, and climate impacts across the Southern Hemisphere. **Wiley Interdisciplinary Reviews**, v. 11, i. 4, May. 2020. DOI: https://doi.org/10.1002/wcc.652. Available from: https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcc.652. Access in: 09 dec. 2023.

GANDRA, M. M. S. **Análise de Ciclogêneses em Altas Latitudes Austrais e Influência na América do Sul.** 2020. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis, 2022. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2712. Acesso em: 10 jun. 2024.

HAMMES, D. F. **Análise e interpretação ambiental da química iônica de um testemunho do manto de gelo da Antártica Ocidental.** 2011. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/14831/1/Diss_Hammes.pdf. Acesso em: 09 dez. 2023.

HAUMANN, F. A.; NOTZ, D.; SCHMIDT, H. Anthropogenic influence on recent circulation-driven Antarctic sea ice changes. **Geophysical Research Letters**, v. 41, i. 23, p. 8429-8437, Dec. 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/2014GL061659. Available from: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2014GL061659. Access in: 21 mar. 2025.

HILLEBRAND, F. L. *et al*. Influência Climática na Formação do Gelo Marinho da Antártica Registrada por meio do Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, Porto Alegre, v. 43, n. 1, p. 151-161, Jan. 2020. DOI: DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_1_151_161. Disponível em: https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/download/34105/19077. Acesso em: 09 dez. 2023.

HILLEBRAND, F. L. *et al*. Influência das fases do SAM na distribuição espacial do gelo marinho na região norte da Península Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 187-201, Mar. 2021. DOI: http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1996. Disponível em: https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1996/386386532. Acesso em: 08 dez. 2023.

INSTITUT POLAIRE FRANÇAIS. **Antarctica**. Dumont d'Urville station: The Dumont d'Urville station, [2018]. Disponível em: https://institut-polaire.fr/en/antarctica/the-dumont-durville-ddu-station/. Acesso em 17 out. 2023.

JONES, A.; GILBERT, E.; MARSH, O. *t al*. **British Antarctic Survey**. Winter warming in Antarctica, [2022]. Disponível em: https://www.bas.ac.uk/data/our-data/publication/winter-warming-in-antarctica/. Acesso em: 15 nov. 2023.

JUNIOR, R. R. S. **Ultrapassando a Superficialidade do Mundo: Sensibilidades Ambientais em Meio à Imensidão Antártica (1910-1917).** 2023. Dissertação (Mestrado em História) - Setor de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2023. Disponível em: http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/3963. Acesso em: 09 dez. 2023.

LANGALO, G. K.; HERBER, A. **The Meteorological Data of the Neumayer Station (Antarctica) for 1992, 1993 and 1994.** 1996. ISSN 01 76 - 5027 on-line verison. Available from: https://epic.awi.de/id/eprint/26365/1/BerPolarforsch1996187.pdf. Access in: 24 jun. 2024

LINDEMANN, D. S. **Variações de Temperatura no Continente Antártico: Observações e Reanálises.** 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. Disponível em: https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/5f4fc437-34e5-4a4c-bf5b-6dcf4aa2e444/content. Acesso em: 08 dez. 2023.

LOPES, D. V. *et al*. Estudos geográficos sobre a Antártica: geopolítica, solos, relevo e clima. **Revista Ponto de Vista**, Viçosa, v. 1, n. 9, p. 2-16, 2020. Disponível em: https://shre.ink/MX3d. Acesso em: 08 dez. 2023.

LUDESCHER, J.; YUAN, N.; BUNDE, A. Detecting the statistical significance of the trends in the Antarctic sea ice extent: an indication for a turning point. **Climate Dynamics**, v. 53, p. 237-244. Dec. 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-018-4579-3. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-018-4579-3. Access in: 24 jun. 2024.

MANAKULAM, S. *et al*. Trends in Antarctic Sea Ice and Albedo: Impacts of Ocean-Atmospheric Processes. **International Journal of Climatology**, Feb. 2025. DOI: 10.1002/joc.8791. Available from: https://www.researchgate.net/publication/389250421_Trends_in_Antarctic_Sea_Ice_and_Albedo_Impacts_of_Ocean-Atmospheric_Processes. Access: 22 mar. 2025.

MASSOM, R. A. *et al*. Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell. **Nature**, v. 558, p. 383-389, Jun. 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41586-018-0212-1. Available from: https://www.nature.com/articles/s41586-018-0212-1. Access in: 20 jan. 2025.

MEEHL, G.A. *et al*. Sustained ocean changes contributed to sudden Antarctic sea ice retreat in late 2016. **Nature Communications** v. 10, n. 14, Jan. 2019. DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-018-07865-9. Available from: https://www.nature.com/articles/s41467-018-07865-9. Access in: 20 jan. 2025.

METEOMANZ.com. **METEOMANZ.com** [19--]. Disponível em: http://meteomanz.com/. Acesso em: 16 out. 2023.

NOAA - NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Products**. Global Forecast System (GFS), [20--]. Disponível em: https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast. Acesso em: 16 out. 2023.

NOAA - NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Plotting & Analysis**. Monthly/Seasonal Climate Composites, [20--]. Disponível em: https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl. Acesso em: 16 out. 2023.

NOAA - NATIONAL CENTERS FOR ENVIRONMENTAL INFORMATION. **Plotting & Analysis.** Web-based Reanalyses Intercomparison Tools - WRIT, [20--]. Disponível em: https://psl.noaa.gov/data/writ/. Acesso em: 16 jun. 2024.

NOAA - NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. **Data**. Sea Ice Index, Version. 3, [20--]. Disponível em: https://nsidc.org/data/g02135. Acesso em: 10 jun. 2024.

ONU - NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Centro de Imprensa**. Aumento de temperaturas na Antártica preocupa e pode ter efeitos em todo mundo, [2022]. Disponível em: https://shre.ink/MX3c. Acesso em: 29 out. 2023.

PARISE, C. K. **Sensitivity and Memory of the Current Mean Climate to Increased Antarctic Sea Ice: The Role of Sea Ice Dynamics. 2014.** Thesis (Doctor in Meteorology) - Graduate Course in Meteorology, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Disponível em: http://urlib.net/8JMKD3MGP3W/3HE9QFS. Acesso em: 19 jan. 2025.

PARKINSON, C. L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America - PNAS**, v. 116, n. 29, p. 14414-14423, Jul. 2019. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1906556116. Available from: https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1906556116. Access in: 24 jun. 2024.

PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126-135, 1979. DOI: https://doi.org/10.2307/2346729. Available from: Access in:https://www.jstor.org/stable/2346729?origin=crossref. 20 jan. 2025.

SANTOS, V. O. **Identificação e Análise de Tendências das Variáveis Hidrológicas e Mudanças no Uso e Ocupação das Terras no Alto Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Uberaba, em Minas Gerais**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/20535. Acesso em: 11 jun. 2024.

SIMÕES, J. C. Glossário da língua portuguesa da neve, do gelo e termos correlatos. **Pesquisa Antártica Brasileira**, Porto Algre, v. 4, p. 119-154, 2004. ISSN 0103-4049 versão on-line. Disponível em: https://www.ufrgs.br/inctcriosfera/arquivos/Glossario.pdf. Acesso em: 10 jul. 2024.

SIMÕES, J. *et al*. **Antártica e as Mudanças Globais**: um desafio para a humanidade. Edição 1. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/258564936_Antartica_e_as_Mudancas_Globais_um_desafio_para_a_humanidade. Acesso em: 16 nov. 2023.

SIGMOND, M.; FYFE, J. C. The Antarctic Sea Ice Response to the Ozone Hole in Climate Models. **Journal of Climate**, v. 27, i. 3, p. 1336-1342, Feb. 2014. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00590.1. Available from: Access in: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/27/3/jcli-d-13-00590.1.xml. 21 mar. 2025.

SIQUEIRA, R. G. **Aprendizado de Máquinas Aplicado ao Mapeamento Digital de Solos na Antártica: Modelagem e Predição Espacial de Classes e Atributos do Solo.** 2023. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023. Disponível em: https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/30918. Acesso em: 09 dez. 2023.

STACHELSKI, L. **Estudo da Variação do Gelo Marinho com Dados Observacionais e do Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre**. 2020. Relatório (Iniciação Científica) - Programa PIBIC, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Santa Maria, 2020. Disponível em: http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/01.25.19.59/doc/PIBIC%20-

%20Let%C3%ADcia%20Stachelski%20-%20Relat%C3%B3rio%20Final.pdf. Acesso em: 16 nov. 2023.

TURNER J. *et al*. Antarctic temperature variability and change from station data. **International Journal of Climatology**, v. 40, i. 6, p. 2986-3007, Oct. 2019. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.6378. Available from: https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.6378. Access in: 28 feb. 2025.

TURNER J. *et al*. Extreme Temperatures in the Antarctic. **Journal of Climate**, v. 34, p. 2653-2668, Apr. 2021. DOI: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0538.1. Available from: https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/34/7/JCLI-D-20-0538.1.xml. Access in: 28 fev. 2025.

U. S. NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. **Directorate for Geosciences (GEO)**. NSF Palmer Station, [20--]. Disponível em: https://www.nsf.gov/geo/opp/support/palmerst.jsp. Acesso em: 17 out. 2023.

VASCONCELLOS, F. C. *et al*. Combined performance of September's Weddell sea ice extent, Southern Annular Mode, and Atlantic SST anomalies over the South American temperature and precipitation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 94, p. 1-20, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/0001-3765202220210803. Available from: https://www.scielo.br/j/aabc/a/g3qbyMDhZqVdPZcVcLJYnyw/?lang=en. Access in: 28 feb. 2025.

LAKES SOFTWARE. **WRPLOT VIEW**. [2023]. Disponível em: https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/. Acesso em: 21 nov. 2023.

XIN, M. *et al*. A broadscale shift in antarctic temperature trends. **Climate Dynamics**, v. 61, p. 4623-4641, Ma. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00382-023-06825-4. Available from: https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06825-4. Access in: 28 feb. 2025.

YUE, S.; WANG, C. Y. The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. **Water Resources Management**, v. 18, p. 201-218, Jun. 2004. Available from: https://link.springer.com/article/10.1023/B:WARM.0000043140.61082.60. Access in: 17 jan. 2025.