

DINÂMICA DO GELO MARINHO NA REGIÃO DA PENÍNSULA ANTÁRTICA A PARTIR DOS DADOS DO ERA5

Ynara Aguiar Castro

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil
ynarapoe@gmail.com

Douglas da Silva Lindemann

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil
douglasdasilva.lindemann@gmail.com

Mateus Dias Nunes

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil
nunes.mateusdias@gmail.com

André Becker Nunes

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil
beckernunes@gmail.com

Rose Ane Pereira de Freitas

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia, Pelotas, RS, Brasil
rosefreitas78@gmail.com

RESUMO

O gelo marinho (GM) desempenha um papel fundamental no equilíbrio climático, influenciando as interações oceano-atmosfera na Península Antártica. Este estudo analisa a variabilidade sazonal e interanual da extensão do GM nos mares de Amundsen-Bellingshausen (MAB) e de Weddell (MW) entre 1979 e 2020, utilizando dados da reanálise ERA5 e testes estatísticos de Mann-Kendall e de Pettitt. Os resultados indicam redução significativa da cobertura de GM no MAB durante o verão e o outono austrais (~20%), em contraste com um aumento moderado em agosto e setembro (~10%), o que indica intensificação da sazonalidade. No MW, observou-se uma leve recuperação do GM em fevereiro e março (~18%). Essas variações estão associadas a modos de variabilidade climática e à baixa pressão do Mar de Amundsen (ASL).

Palavras-chave: Extensão do gelo. Tendências sazonais. Variabilidade climática. Interação oceano-atmosfera.

SEA ICE DYNAMICS IN THE ANTARCTIC PENINSULA REGION BASED ON ERA5 DATA

ABSTRACT

Sea ice (SI) plays a fundamental role in the global climate balance by modulating ocean-atmosphere interactions over the Antarctic Peninsula. This study examines the seasonal and interannual variability of sea-ice extent in the Amundsen-Bellingshausen Seas (ABS) and the Weddell Sea (WS) from 1979 to 2020, using ERA5 reanalysis data and the Mann-Kendall and Pettitt statistical tests. The results indicate a statistically significant reduction in sea-ice cover in ABS during the austral summer and autumn (~20%), contrasting with a moderate increase in August and September (~10%), which suggests an intensification of sea-ice seasonality. In WS, a slight recovery of sea-ice extent is observed in February and March (~18%). These variations appear to be associated with modes of climate variability and the persistence of the Amundsen Sea Low (ASL).

Keywords: Sea ice extent. Seasonal trends. Climate variability. Ocean-atmosphere interaction.

INTRODUÇÃO

O gelo marinho (GM) antártico é um indicador crucial das mudanças climáticas, regulando os fluxos de calor e de matéria entre a atmosfera e o oceano (Hobbs *et al.*, 2016; Casagrande *et al.*, 2022). Sua dinâmica influencia a circulação oceânica global (Holland; Jenkins; Holland, 2010; Wang *et al.*, 2021) e sustenta o ecossistema local (Wang *et al.*, 2021). O GM antártico apresenta uma oscilação sazonal drástica: atinge seu máximo em setembro (cerca de 18 milhões de km²; Parkinson, 2014) e seu mínimo em fevereiro/março (cerca de 3,75 milhões de km²), de acordo com Cavalieri e Parkinson (2008). Esse ciclo assimétrico (crescimento lento e derretimento rápido) reflete complexas interações entre a radiação solar, a atmosfera, as correntes oceânicas e a temperatura da superfície do mar (TSM) (Turner *et al.*, 2017; Crosta *et al.*, 2022).

O monitoramento por satélite, iniciado na década de 1970, revelou tendências divergentes entre as regiões de alta latitude: o Ártico sofreu redução consistente (Comiso *et al.*, 2008; Serreze; Stroeve, 2015), enquanto a Antártica demonstrou expansão até 2014 (Parkinson; Cavalieri, 2012; Hobbs *et al.*, 2016), seguida por um declínio acentuado a partir de 2016, atingindo mínimos recordes (Turner *et al.*, 2017; Purich; Doddridge, 2023). Esse declínio acompanha o aquecimento acelerado na região da Península Antártica (PA) (Gorodetskaya *et al.*, 2023). No entanto, esse aquecimento não é generalizado; por isso, entender as variações setoriais é crucial, especialmente no Mar de Amundsen-Bellinghshausen (MAB), uma área de grande perda de gelo (Turner *et al.*, 2017; Vaughan *et al.*, 2003), e no Mar de Weddell (MW), que apresentou crescimento e, posteriormente, declínio (Parkinson, 2012; 2019). A rápida redução pós-2016 é atribuída à combinação de aquecimento oceânico, enfraquecimento dos ventos (Eayrs *et al.*, 2021) e padrões atmosféricos de grande escala, como o Modo Anular Sul (*Southern Annular Mode*, SAM) (Turner *et al.*, 2017).

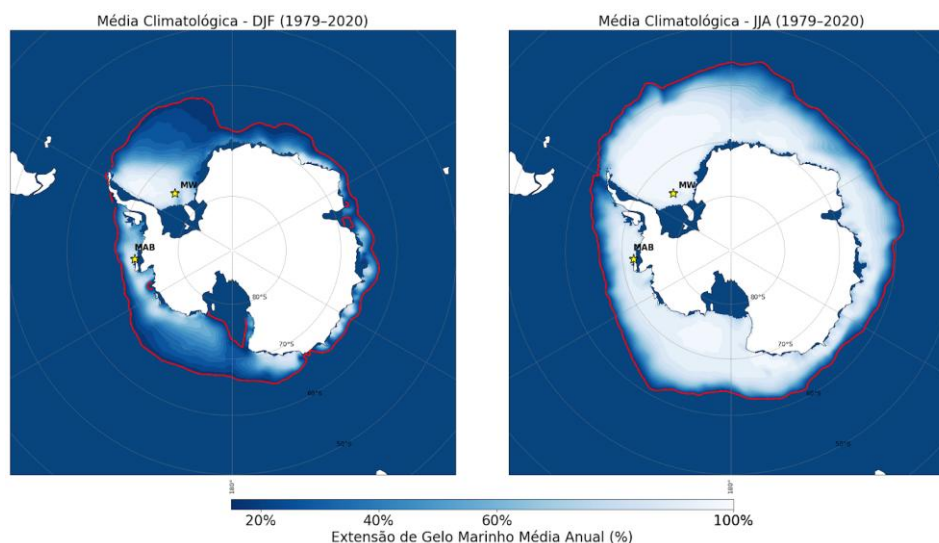
As variações interanuais e sazonais do GM e das temperaturas na PA estão associadas a modos de variabilidade climática de grande escala, como o SAM, o El Niño-Oscilação Sul (*El Niño-Southern Oscillation*, ENSO) e a Oscilação Decadal do Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation*, PDO), bem como a teleconexões tropicais-polares, nas quais anomalias atmosféricas originadas nos trópicos, estimuladas por variações na TSM, especialmente ligadas ao ENSO, propagam-se para altas latitudes por meio de ondas planetárias, modulando a circulação atmosférica e os campos de pressão na Antártica (Yuan; Kaplan; Cane, 2018). Esses mecanismos influenciam diretamente a intensidade e a posição da Baixa Pressão do Mar de Amundsen (*Amundsen Sea Low*, ASL), afetando a distribuição e a sazonalidade do GM na região (Li *et al.*, 2014; Raphael *et al.*, 2016; González; Fortuny, 2018; Wang *et al.*, 2022). O setor ocidental da PA, por exemplo, aquece rapidamente, em parte devido ao SAM positivo (Vaughan *et al.*, 2003 *apud* Ding; Steig, 2013). Compreender essas interações complexas (Turner *et al.*, 2009; Singh; Garuba; Rasch, 2018) é o objetivo central deste estudo: analisar a dinâmica do GM no MAB e no MW, utilizando longas séries temporais (ERA5) e testes estatísticos (Mann-Kendall e Pettitt), para caracterizar mecanismos de variabilidade e aprimorar as previsões ambientais no Hemisfério Sul.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

Neste estudo, foram analisadas duas regiões de grande relevância climática e oceanográfica na área marítima da PA, situada a cerca de 1.000 km do continente sul-americano e separada deste pelo Estreito de Drake (Figura 1). A primeira é o MAB, entre 125° O e 65° O, no setor oeste da península, banhado pelo Oceano Pacífico. Essa região apresenta dinâmica complexa do gelo marinho e registrou uma das reduções mais acentuadas de cobertura em comparação à relativa estabilidade observada em outras áreas da Antártica até meados da década de 2010 (Parkinson, 2019). A segunda é o MW, localizado entre 60° O e 20° L, no lado leste, banhado pelo Oceano Atlântico. O MW desempenha papel fundamental na formação de águas profundas, essenciais para a circulação termohalina global (Stewart, 2021), um sistema de circulação oceânica de larga escala controlado por contrastes de temperatura e salinidade, que promove o transporte entre hemisférios de massas de água e redistribui calor e propriedades físicas dos oceanos (Wang; Stone; Marotzke, 1999). Em ambas as regiões, considerou-se a latitude de 60° S como limite norte, abrangendo uma área representativa da PA e de suas águas circundantes.

Figura 1 - Médias climatológicas da extensão de gelo marinho na Antártica durante o verão (DJF) e o inverno (JJA) de 1979 a 2020. A escala indica a cobertura média (0-100%), a linha vermelha marca o limiar de 15% da concentração e os pontos amarelos destacam as regiões MW e MAB



Fonte: Os autores, 2025.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas médias mensais de cobertura de gelo marinho referentes aos últimos 42 anos (1979 a 2020), abrangendo as regiões MAB e MW. A escolha desse período permite uma análise robusta das tendências de longo prazo e das variações sazonais na extensão do gelo, além de cobrir um intervalo temporal significativo para a detecção de mudanças climáticas relevantes.

Os dados foram obtidos a partir da reanálise ERA5, desenvolvida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) (Hersbach *et al.*, 2020), no formato NetCDF. O ERA5 combina um vasto conjunto de observações atmosféricas, oceânicas e de superfície terrestre, incluindo medições de satélites, estações meteorológicas e boias oceânicas, com modelos numéricos avançados, permitindo a geração de um banco de dados globalmente consistente e fisicamente coerente. A assimilação contínua dessas observações garante maior precisão na reconstrução das condições ambientais ao longo das décadas, reduzindo as incertezas e proporcionando estimativas de alta confiabilidade. A reanálise ERA5 fornece cobertura global de variáveis atmosféricas em uma grade regular de latitude e longitude, com resolução horizontal de, aproximadamente, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (cerca de 31 km) e resolução temporal horária, com dados disponíveis principalmente desde 1979 até o presente, e versões estendidas retrospectivas disponíveis a partir de 1940. Seus dados são disponibilizados publicamente pelo *Copernicus Climate Change Service* (C3S) e podem ser acessados pelo *Climate Data Store* (CDS).

Para a análise dos dados, todos os cálculos estatísticos e a geração de gráficos foram realizados em ambiente computacional, utilizando *Python*, uma linguagem de programação de código aberto amplamente empregada na análise e visualização de dados. A escolha do *Python* deve-se à sua versatilidade, eficiência e disponibilidade de bibliotecas especializadas, como *Pandas*, *Numpy*, *Matplotlib* e *Cartopy*. Essas ferramentas permitiram a manipulação eficiente de grandes volumes de dados, a aplicação de métodos estatísticos avançados e a criação de gráficos informativos. Para a extração dos dados brutos, calculou-se uma média espacial dos valores de concentração de GM para cada mês do período estudado. Os valores foram organizados em uma série temporal mensal, totalizando 504 valores (42 anos \times 12 meses).

Esses valores foram convertidos em porcentagem, representando a cobertura de GM em relação à área total analisada. Uma análise exploratória inicial foi realizada por meio da geração de gráficos *boxplot*, que permitem visualizar a distribuição mensal da cobertura de GM ao longo dos meses e anos, identificando padrões sazonais, variações interanuais e possíveis *outliers*. Para uma análise mais detalhada das tendências temporais, os dados foram agrupados por décadas, considerando os

seguintes períodos: 1979-1989, 1990-1999, 2000-2009 e 2010-2020. Desta forma, a primeira e a última década registraram 11 anos de dados, e as demais, 10 anos de dados. Para cada década, foram calculadas as médias mensais de cobertura de GM, resultando em 12 valores (um por mês). Essa abordagem permitiu avaliar as mudanças na cobertura de GM em escalas temporais intermediárias, auxiliando na identificação de variações ao longo das décadas.

O teste de Mann-Kendall, adotando nível de significância estatística de 95%, foi aplicado às séries médias mensais de cobertura de gelo marinho nos setores dos mares de Amundsen-Bellingshausen (MAB) e de Weddell (MW), utilizando a biblioteca *mk_test*. Trata-se de um método estatístico não paramétrico amplamente empregado para identificar tendências monotônicas em séries temporais ambientais (Mann, 1945; Kendall, 1975 *apud* Xavier *et al.*, 2020). Apenas os meses que apresentaram tendências estatisticamente significativas foram posteriormente analisados por meio do teste de Pettitt, utilizado de forma complementar com o objetivo de identificar pontos de ruptura nas séries, ou seja, anos associados a mudanças abruptas na média da cobertura de gelo marinho (Pettitt, 1979). Ressalta-se que não foi realizada comparação entre diferentes testes de detecção de mudanças, uma vez que o foco do estudo foi a caracterização temporal das quebras associadas às tendências detectadas e sua interpretação climática, e não a avaliação comparativa do desempenho metodológico desses testes.

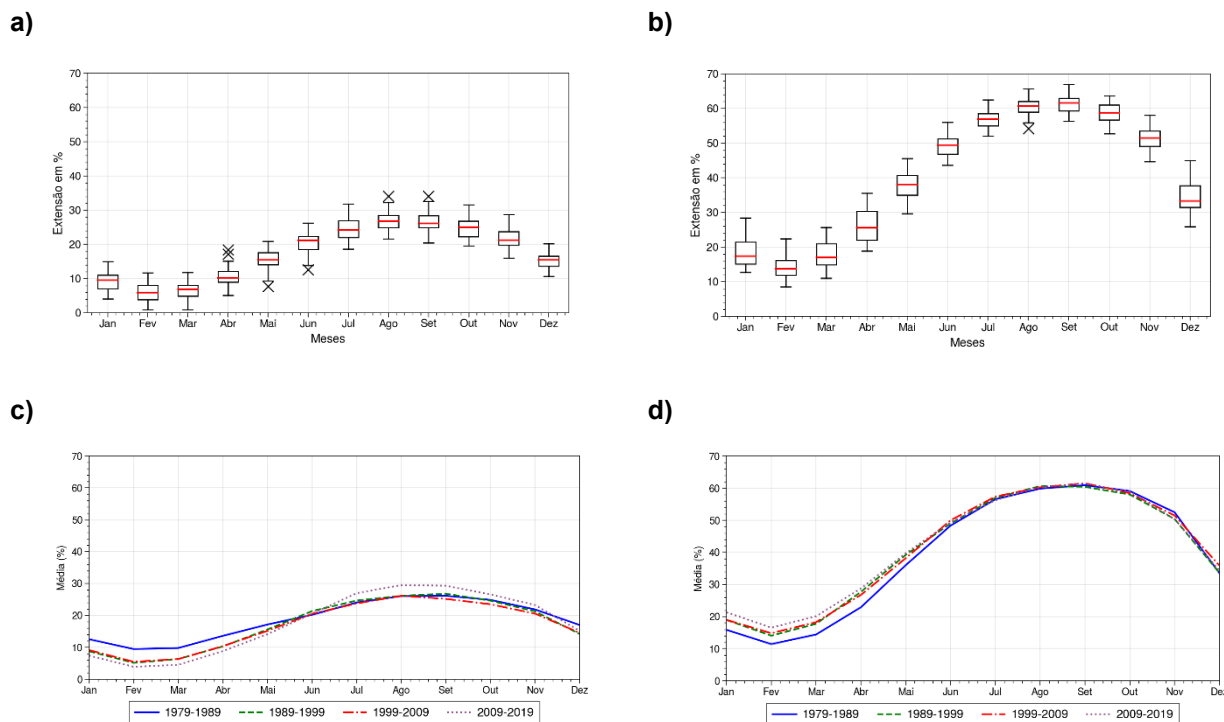
Após a identificação dos pontos de ruptura, as séries temporais foram divididas em dois períodos distintos, anteriores e posteriores à ruptura, permitindo a análise comparativa das médias mensais de cobertura de gelo marinho em cada intervalo. Os valores foram expressos em porcentagem em relação à área total analisada e, conforme a metodologia proposta por Parkinson (2014), apenas concentrações iguais ou superiores a 15% foram consideradas para a elaboração dos mapas espaciais. Esse critério assegura a inclusão apenas de áreas com presença significativa de gelo marinho, reduzindo a influência de valores residuais e possibilitando uma representação mais consistente dos padrões espaciais associados às diferentes fases da série temporal.

RESULTADOS

A análise da cobertura de gelo nos MAB e nos MW revela dinâmicas sazonais e tendências de longo prazo marcadamente distintas ao longo das últimas quatro décadas. Conforme justificado na metodologia, a abordagem separada para cada setor permite a clara identificação de comportamentos contrastantes, que são detalhados a seguir.

A Figura 2 ilustra as médias mensais da extensão do gelo marinho no período de 1979 a 2020, destacando as diferenças entre os setores analisados. Os gráficos (a) e (b) apresentam os valores médios mensais e sua variabilidade interanual, enquanto (c) e (d) comparam as médias mensais por décadas, permitindo a identificação de possíveis mudanças ao longo do tempo. O gráfico 2a mostra que, em MAB, a extensão do gelo marinho é menor no verão (dez-jan-fev), com medianas de 10-20%. A partir de abril, ocorre um aumento gradual até o pico entre agosto e setembro, com medianas de 20-30%. A presença de *outliers*, ou valores extremos em relação ao comportamento médio da série, entre abril e setembro indica alta variabilidade sazonal.

Figura 2 - Representa os valores médios mensais da cobertura do gelo marinho ao longo do período de 1979 a 2020: a) valores médios mensais no setor MAB; b) valores médios mensais no setor MW; c) e d) médias mensais por décadas (1979-1989, 1989-1999, 1999-2009, 2009-2019) nos setores MAB (c) e MW (d)



Fonte: Os autores, 2025.

No MW (Figura 2b), observa-se um padrão sazonal semelhante ao do MAB, porém com valores de extensão significativamente maiores, variando entre 20% e 30% no verão e atingindo cerca de 60% em agosto-setembro. Esse comportamento é consistente com observações por satélite, que indicam um período de congelamento superior a sete meses e um intervalo de derretimento inferior a cinco meses, mais intenso entre novembro e fevereiro (Eayrs; Faller; Holland, 2020). A variabilidade sazonal é mais pronunciada no MAB durante o outono e o inverno, enquanto, no MW, intensifica-se no verão e no outono. O derretimento mais crítico ocorre entre fevereiro e março no MAB e em fevereiro no MW, enquanto os máximos de extensão são registrados em agosto e setembro. Essa assimetria entre os períodos de ganho e perda de gelo não coincide exatamente com as estações atmosféricas definidas (Goosse *et al.*, 2023). Os *outliers* identificados refletem anomalias sazonais e climáticas ao longo de 1979-2020 no MAB; valores positivos ocorrem em abril, agosto e setembro, enquanto valores negativos predominam em maio e junho; no MW, apenas agosto apresenta um *outlier* negativo. Essas anomalias estão associadas a processos físicos, como o *feedback* gelo-albedo, variações na intensidade e posição dos ventos de oeste, e à atuação de modos de variabilidade climática, em especial o SAM, que favorece maior dispersão do gelo na primavera e acelera o derretimento, reduzindo sua extensão no outono e retardando a fase de expansão (Enomoto; Ohmura., 1990; Eayrs *et al.*, 2019 *apud* Goosse *et al.*, 2023).

Os gráficos 2c e 2d mostram a variação média decenal entre 1979 e 2020. Em MAB, a década de 1980 apresentou maiores extensões no verão e no outono (mínimo de 10%) e máximos de 25% no inverno e na primavera. Nas décadas seguintes, observou-se uma redução progressiva, com mínimos de 6% (1990) e 4% (2010), e máximos de 30%, sendo esta a década de maior amplitude sazonal. Em MW, os mínimos passaram de 12% na década de 1980 para 16% e 18% nas décadas seguintes, com máximos próximos de 60% (Figura 2d). Assim, enquanto MW mostra crescimento gradual dos valores mínimos, MAB apresenta declínio contínuo, indicando retração mais acentuada e maior sazonalidade na década

de 2010. De modo geral, MAB e MW exibem comportamentos opostos: nos anos 1980, MAB possuía maior extensão e MW menor; já em 2010, MAB reduziu no verão e no outono, enquanto MW aumentou nesses períodos. O cálculo das tendências (Tabela 1) reforça essas variações.

Tabela 1 - Tendência mensal do gelo marinho nos MAB e nos MW. A coluna “valor” apresenta as tendências detectadas, com asterisco (*) para significância estatística de 95% pelo teste de Mann-Kendall, indicando aumento (*increasing*) ou diminuição (*decreasing*). A coluna “ano” mostra os anos de rupturas nas séries temporais; os demais valores não foram estatisticamente significativos

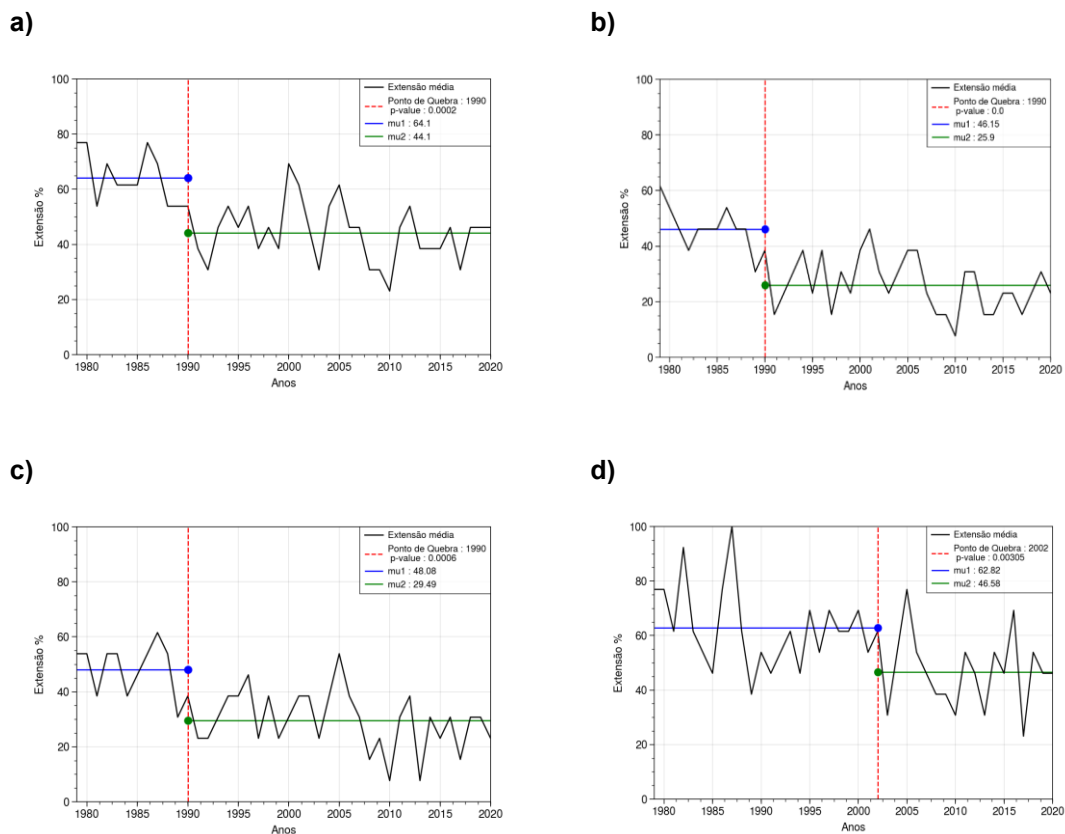
Mês	MAB		MW	
	VALOR	ANO	VALOR	ANO
Jan	-0.82*	1990	0.64	-
Fev	-0.85*	1990	0.59*	2000
Mar	-0.83*	1990	0.92*	1989
Abr	-0.76*	2002	0.07	-
Mai	-0.43	-	0.06	-
Jun	0.0	-	0.05	-
Jul	0.03	-	0.0	-
Ago	0.06*	2007	0.03	-
Set	0.07*	2008	0.05	-
Out	0.0	-	0.0	-
Nov	0.0	-	0.0	-
Dez	0.0	-	0.0	-

Fonte: Os autores, 2025.

Em MAB, janeiro, fevereiro e março (1990) e abril (2002) apresentaram tendência significativa de redução (Figura 2c), enquanto agosto (2007) e setembro (2008) registraram aumento. Esses resultados sugerem uma mudança de regime na década seguinte (2009-2019), com ampliação da extensão no inverno e no início da primavera. No MW, fevereiro (2000) e março (1989) revelaram tendências significativas de aumento, enquanto os demais meses permaneceram estáveis, sugerindo relativa constância interdecadal.

Após a identificação das tendências estatisticamente significativas pelo teste de Mann-Kendall, o teste de Pettitt foi aplicado de forma complementar para identificar os pontos de ruptura associados. Em MAB (Figura 3), janeiro, fevereiro e março indicaram ruptura em 1990, com redução aproximada de 20% na extensão média, de 65% para cerca de 45% (jan) e de 50% para 30% (fev-mar). Abril apresentou uma quebra em 2002, com uma diminuição de 16% na média.

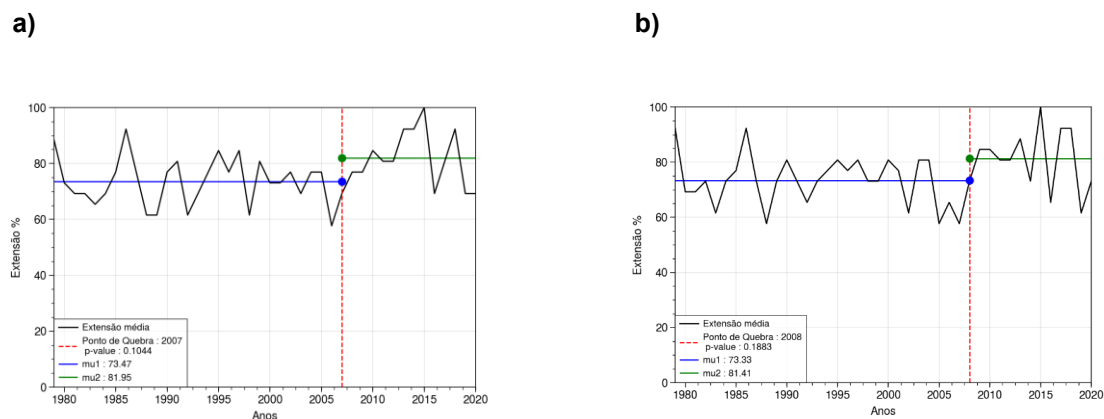
Figura 3 - Teste de Pettitt aplicado à série temporal de 42 anos da extensão do gelo marinho no MAB, com foco nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril, que apresentaram tendências de diminuição (*decreasing*). Os anos de 1990 e 2002 foram pontos de ruptura significativos na série



Fonte: Os autores, 2025.

Já agosto e setembro (Figura 4) indicaram rupturas positivas em 2007 e 2008, respectivamente, com aumento médio de cerca de 8%. Esse comportamento é coerente com a tendência de aumento do gelo no inverno, após o período de derretimento recorde no início da década de 1990.

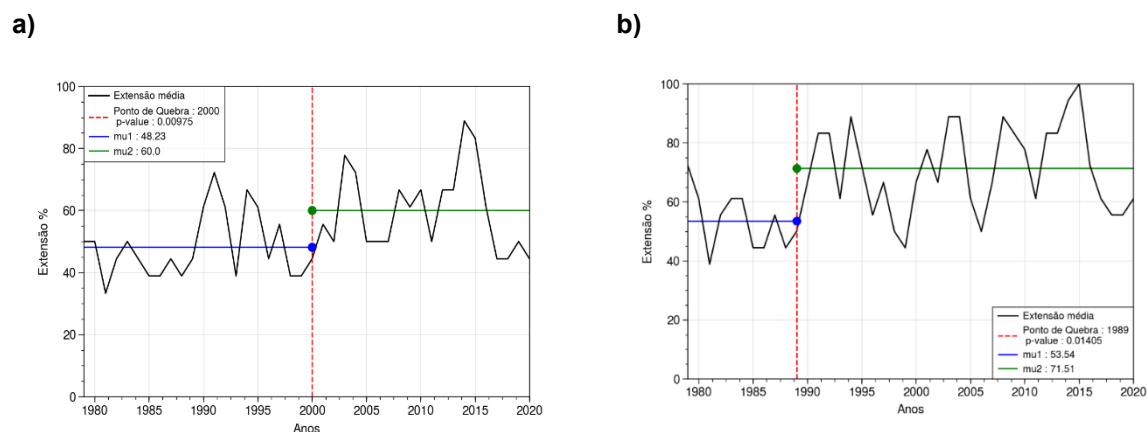
Figura 4 - Testes de Pettitt aplicados à série temporal de 42 anos da extensão do GM em MAB, com foco nos meses de agosto e setembro, que apresentaram tendências de aumento (*increasing*). Os anos de 2007 e 2008 foram apontados como pontos de ruptura significativos na série.



Fonte: Os autores (2025).

Em fevereiro e março (Figura 5), as quebras estruturais resultaram em aumento da extensão média do gelo marinho, de cerca de 48% para 60% em fevereiro e de aproximadamente 54% para 72% em março, sendo o aumento mais expressivo em março, mês de transição sazonal.

Figura 5 - Teste de Pettitt aplicado à série temporal de 42 anos da extensão do gelo marinho em MW, com foco nos meses de fevereiro e março, que apresentaram tendências de aumento (*increasing*). Os anos de 2000 e 1989 foram identificados como pontos de ruptura significativos na série.

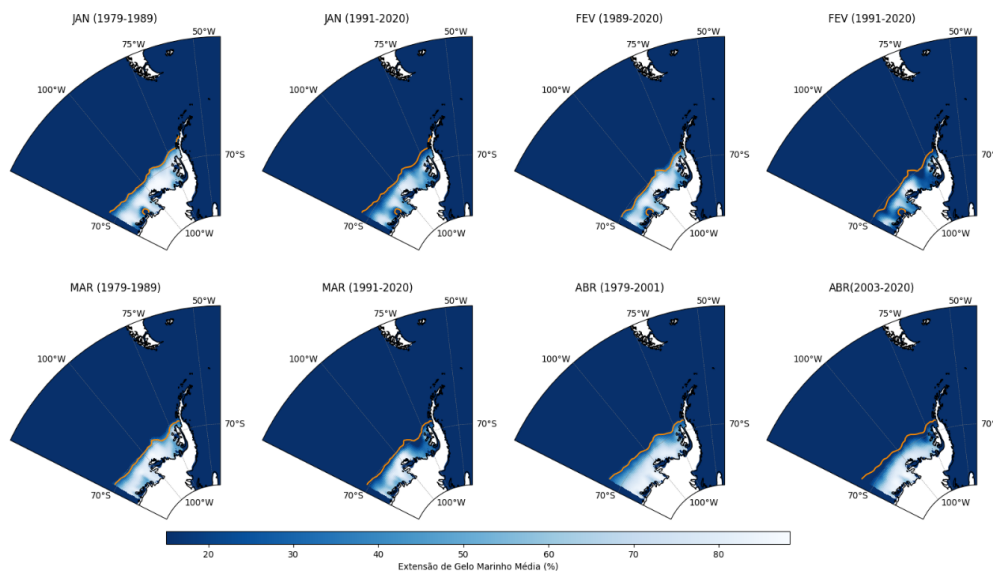


Fonte: Os autores (2025).

Apesar do aumento observado em fevereiro, ainda há anos em que os valores mínimos permanecem abaixo da média de 60%, enquanto, em março, os valores mínimos próximos de 50% apresentaram uma tendência gradual de aumento, voltando a reduzir por volta de 2018 e 2019.

A análise espacial (Figuras 6 a 8) reforça esses resultados. As quebras identificadas pelo teste de Pettitt nas séries temporais com tendências estatisticamente significativas servem como referência temporal para a interpretação dos padrões espaciais.

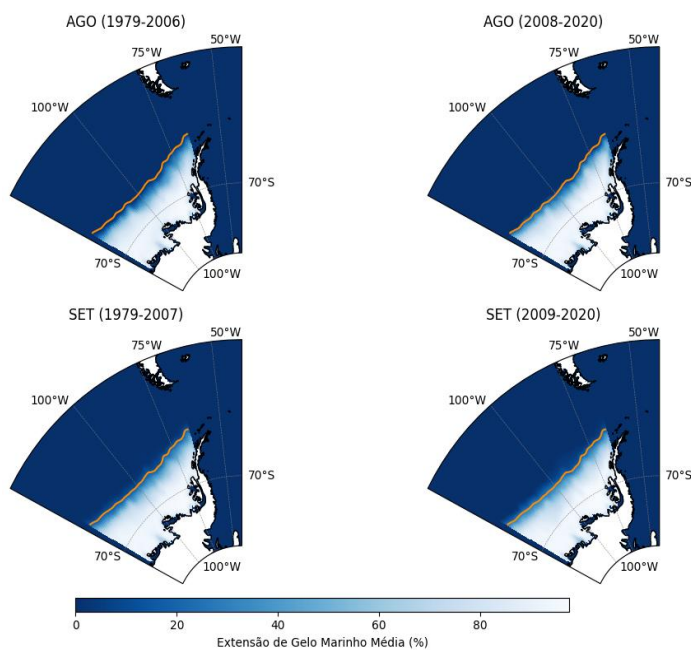
Figura 6 - Extensão do gelo marinho (%) antes e depois da quebra no setor MAB nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril. A linha laranja representa a climatologia da extensão máxima do gelo marinho



Fonte: Os autores (2025).

No MAB, as reduções mais intensas após as quebras (1991-2020) ocorrem ao norte, próximas a 70° S entre 100° O e 75° O (Figura 6), enquanto os aumentos (2008-2020) concentram-se a oeste, entre 125° O e 100° O (Figura 7).

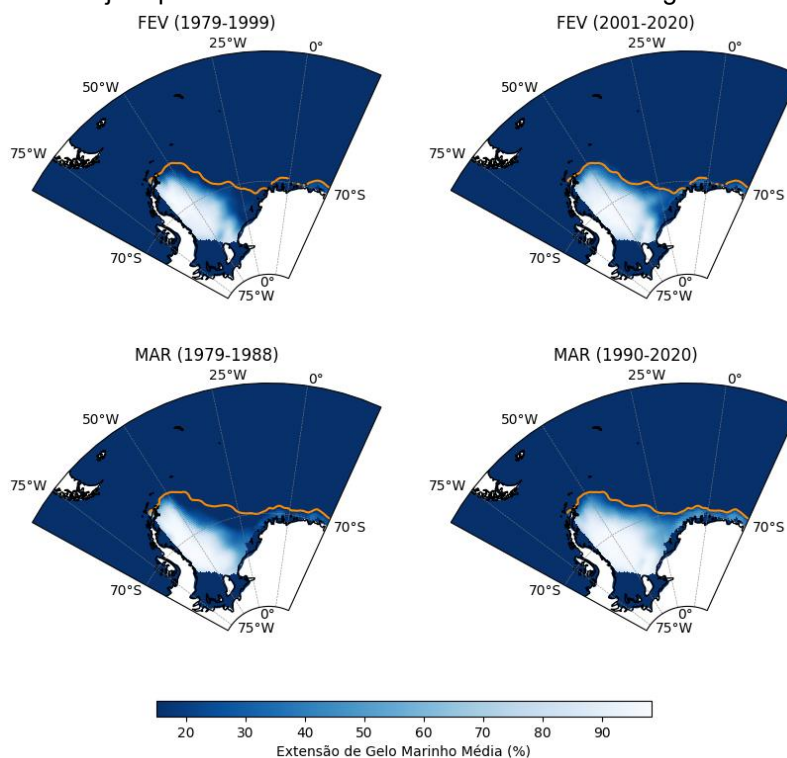
Figura 7 - Extensão do gelo marinho (%) antes e depois da quebra no setor MAB, em agosto e setembro. A linha laranja representa a média da extensão máxima do gelo observada no mês



Fonte: Os autores, 2025.

Já no MW, observou-se recuperação do gelo entre 27°O e 0° após 2000, indicando aumento da cobertura em direção a longitudes menores (Figura 8).

Figura 8 - Extensão do gelo marinho (%) antes e depois da quebra no setor MW, em fevereiro e março. A linha laranja representa a média da extensão máxima do gelo observada no mês



Fonte: Os autores, 2025.

Algumas hipóteses para os padrões observados incluem os seguintes mecanismos físicos e climáticos. O setor oeste da PA é intrinsecamente mais quente, influenciado por ventos e pela propagação de ondas de Rossby associadas à variabilidade do Pacífico equatorial (Jacobs e Comiso, 1997; Gurjão *et al.*, 2025). A redução recorde de 1991 em MAB foi atribuída a ventos de superfície e altas temperaturas na costa oeste da PA (Jacobs e Comiso, 1993), ligada ao aprofundamento da ASL e à transição para a fase negativa da PDO (Stammerjohn *et al.*, 2008; Meehl *et al.*, 2016). Eventos extremos, como o bloqueio atmosférico de 2001-2002, explicam o ponto de ruptura em abril de 2002 (Massom *et al.*, 2006).

Na década de 2010, a dinâmica tornou-se ainda mais complexa: embora com menor extensão no verão, MAB apresentou aumento no inverno, possivelmente favorecido pela liberação de água doce e fria decorrente do derretimento basal das plataformas de gelo, o que estimula a formação de gelo superficial (Bintanja *et al.*, 2013). Contudo, sucessivos recordes de baixa após 2015 estão relacionados ao *El Niño* 2015/2016 e à fase negativa do SAM, que induziram anomalias de TSM e aquecimento (Stuecker; Bitz; Armour, 2017; Yu *et al.*, 2022). Em contrapartida, o MW mostrou expansão até meados da década de 2010, seguida por uma forte redução a partir de 2015 (Turner *et al.*, 2022). O aumento no verão na porção sudoeste do MW é explicado pelo fortalecimento do Giro de Weddell e pela intensificação dos ventos de oeste, que resfriam a camada superficial e reduzem o fluxo de calor oceano-atmosfera, protegendo o gelo do derretimento (Kumar; Yadav; Mohan, 2021; Gurjão *et al.*, 2025).

De forma geral, conforme sintetizado na Tabela 2, as análises indicam que MAB apresenta retração significativa, com quebras associadas a padrões de aquecimento e circulação atmosférica anômala, enquanto MW demonstra comportamento mais resiliente e influenciado por mecanismos oceânicos de resfriamento e redistribuição do gelo. Essas diferenças refletem a natureza heterogênea da resposta do gelo marinho antártico às forças climáticas regionais e globais.

Tabela 2 - Síntese das tendências e dos pontos de ruptura da extensão do gelo marinho (%) em MAB e MW (1979-2020)

Região	Mês	Tendência	Ano da ruptura	Média antes (%)	Média após (%)	Variação
MAB	Janeiro	Redução	1990	64,1	44,1	- 20,0
MAB	Fevereiro	Redução	1990	46,15	25,9	- 19,25
MAB	Março	Redução	1990	48,08	29,49	- 18,59
MAB	Abril	Redução	2002	62,82	46,58	- 16,24
MAB	Agosto	Aumento	2007	73,47	81,95	8,48
MAB	Setembro	Aumento	2008	73,33	81,41	8,08
MW	Fevereiro	Aumento	2000	48,23	60,0	11,77
MW	Março	Aumento	1989	53,54	71,51	17,97

Fonte: Os autores, 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou a dinâmica do gelo marinho nos mares de MAB e MW em torno da PA, no período de 1979 a 2020. A análise revelou tendências distintas nos dois setores: enquanto o MAB apresentou um declínio significativo na cobertura de gelo, especialmente nos meses de verão e outono, o MW registrou uma leve recuperação nesse mesmo período sazonal.

O declínio acentuado da cobertura de gelo marinho no MAB ao longo das décadas, com uma redução de ~20% da área e do ponto de ruptura no início da década de 1990, está alinhado com o aumento das temperaturas e com mudanças na circulação atmosférica e oceânica, como a atuação da ASL e da PDO. Esses padrões podem justificar os derretimentos mais expressivos ao norte da região entre janeiro e março. Enquanto isso, os meses de agosto e setembro indicam tendências de aumento do GM, com um aumento de cerca de 10% e um ponto de ruptura no final da década de 2000.

Por outro lado, no MW, verificou-se uma leve recuperação na extensão do gelo marinho (~20%), possivelmente associada a padrões de vento e correntes oceânicas favoráveis, como o Giro de Weddell e a ASL.

Esses padrões contrastantes evidenciam a complexidade das interações entre a atmosfera, o oceano e a criosfera, além de reforçar a importância das teleconexões climáticas entre os modos de variabilidade.

As mudanças climáticas globais têm impactado significativamente a PA e os oceanos circundantes, e os desafios persistem para identificar com clareza a influência antrópica na variabilidade do gelo marinho na Antártica. Estudos futuros devem priorizar uma análise mais detalhada dos impactos de eventos anômalos na atmosfera, no oceano e nos modos de variabilidade climática, bem como das teleconexões entre esses sistemas, especialmente em escalas temporais mais refinadas, como mensais e anuais.

Essa abordagem é fundamental para aprofundar o entendimento das interações que regulam a dinâmica do gelo marinho na Antártica e de seus reflexos no clima global. A investigação desses processos em períodos mais curtos pode revelar padrões e mecanismos ainda pouco compreendidos, contribuindo para o aprimoramento das projeções climáticas e para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

A autora principal agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos vigente. Agradece igualmente ao Ministério da Educação (MEC) e ao Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE) pelo apoio fundamental concedido por meio do Programa de Educação Tutorial (PET), no qual a fase inicial desta pesquisa foi desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- BINTANJA, R.; VAN OLDENBORG, G. J.; DRIJFHOUT, S. S.; WOUTERS, B.; KATSMAN, C. A. Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion. **Nature Geoscience**, v. 6, p. 376–379, 31 mar. 2013. <https://doi.org/10.1038/ngeo1778>.
- CASAGRANDE, Fernanda; STACHELSKI, Letícia; SOUZA, Ronald Buss de. Assessment of Antarctic sea ice area and concentration in CMIP5 and CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, [S. l.], v. 43, n. 1, p. e7916, 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.7916>.
- CAVALIERI, D. J.; PARKINSON, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 113, n. C7, 2008. [10.1029/2007JC004558](https://doi.org/10.1029/2007JC004558)
- COMISO, Josefino C.; PARKINSON, Claire L.; GERSTEN, Robert; STOCK, Larry. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 1, 3 jan. 2008. [10.1029/2007GL031972](https://doi.org/10.1029/2007GL031972).
- CROSTA, X.; *et al.* Antarctic sea ice in the 21st century: Nature, changes and implications. **Journal of Climate**, v. 35, n. 22, p. 7095–7116, 2022. [10.1175/JCLI-D-21-0819.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0819.1).
- DING, Qinghua; STEIG, Eric J. Temperature Change on the Antarctic Peninsula Linked to the Tropical Pacific. **Journal of Climate**, v. 26, n. 20, p. 7570–7585, 1 out. 2013. [10.1175/JCLI-D-12-00729.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00729.1).
- EAYRS, Clare; LI, Xichen; RAPHAEL, Marilyn N.; HOLLAND, David M. Rapid decline in Antarctic sea ice in recent years hints at future change. **Nature Geoscience**, v. 14, p. 460–464, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00754-4>.
- EAYRS, C.; FALLER, D.; HOLLAND, D. M. Mechanisms driving the asymmetric seasonal cycle of Antarctic Sea Ice in the CESM Large Ensemble. **Annals of Glaciology**, [s. l.], v. 61, n. 82, p. 171–180, 2020. <https://doi.org/10.1017/aog.2020.26>.
- ENOMOTO, Hiroyuki; OHMURA, Atsumu. The influences of atmospheric half-yearly cycle on the sea ice extent in the Antarctic. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [s. l.], v. 95, n. C6, p. 9497–9511, 15 jun. 1990. <https://doi.org/10.1029/JC095iC06p09497>.
- GONZALEZ, Sergi; FORTUNY, D. How robust are the temperature trends on the Antarctic Peninsula? **Polar Research**, [S.l.], v. 37, p. 1-12, 5 out. 2018. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1514392>.
- GORODETSKAYA, I. V. *et al.* Record temperatures over the Antarctic Peninsula and surface melting in February 2022: a compound event with an intense atmospheric river. **npj Climate and Atmospheric Science**, [S. l.], v. 6, n. 202, 04 dez. 2023. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00529-6>.
- GOOSSE, Hugues *et al.* Modulation of the seasonal cycle of the Antarctic sea ice extent by sea ice processes and feedbacks with the ocean and the atmosphere. **The Cryosphere**, [s. l.], v. 17, p. 407–429, 31 jan. 2023. [10.5194/tc-17-407-2023](https://doi.org/10.5194/tc-17-407-2023).
- GURJÃO, Carlos Diego; PEZZI, Luciano Ponzi; PARISE, Claudia Klose; JUSTINO, Flávio Barbosa; CARPENEDO, Camila Bertoletti; SCHUMACHER, Vanúcia; COMIN, Alcimoni. Atmospheric Variability and Sea-Ice Changes in the Southern Hemisphere. **Atmosphere**, v. 16, n. 3, p. 284, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos16030284>.
- HERSBACH, Hans *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, [s. l.], v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 17 maio 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- HOBBS, William R. *et al.* A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings. **Global and Planetary Change**, v. 143, p. 228–250, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.06.008>.

- HOLLAND, Paul R.; JENKINS, Adrian; HOLLAND, David M. Ice and ocean processes in the Bellingshausen Sea, Antarctica. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, [S.l.], v. 115, p. C06019, 21 maio 2010. [10.1029/2008JC005219](https://doi.org/10.1029/2008JC005219).
- JACOBS, Stanley. S.; COMISO, Josefino. C. A recent sea-ice retreat west of the Antarctic Peninsula. **Geophysical Research Letters**, v. 20, n. 12, p. 1171–1174, 18 jun. 1993. [10.1029/93GL01200](https://doi.org/10.1029/93GL01200).
- KUMAR, Avinash; YADAV, Juhi; MOHAN, Rahul. Seasonal sea-ice variability and its trend in the Weddell Sea sector of West Antarctica. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 2, 2021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abdc88>.
- LI, Xichen; HOLLAND, David M.; GERBER, Edwin P.; YOO, Changhyun. Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice. **Nature**, v. 505, p. 538–542, 22 jan. 2014. <https://doi.org/10.1038/nature12873>.
- MASSOM, Robert A. *et al.* Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell. **Nature**, [S.l.], v. 558, p. 383–389, 2018. [10.1038/s41586-018-0193-7](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0193-7)
- MEEHL, Gerald A. *et al.* Antarctic sea-ice expansion between 2000 and 2014 driven by tropical Pacific decadal climate variability. **Nature Geoscience**, v. 9, p. 590–595, 2016. <https://doi.org/10.1038/ngeo2783>.
- 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**, v. 116, n. 29, p. 14414–14423, 1 jul. 2019. [10.1073/pnas.1906556116](https://doi.org/10.1073/pnas.1906556116).
- PARKINSON, C. L. Global sea ice coverage from satellite data: Annual cycle and 35-year trends. **Journal of Climate**, v. 27, n. 24, p. 9377–9382, 2014. [10.1175/JCLI-D-14-00369.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00369.1).
- PARKINSON, C. L.; CAVALIERI, D. J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. **The Cryosphere**, [S.l.], v. 6, p. 871–880, 15 ago. 2012. [10.5194/tc-6-871-2012](https://doi.org/10.5194/tc-6-871-2012).
- PARKINSON, C. L.; CAVALIERI, D. J. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, C07003, 2008. [10.1029/2007JC004558](https://doi.org/10.1029/2007JC004558).
- PARKINSON, Claire 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**, [S. l.], v. 116, n. 29, p. 14414–14423, 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906556116>.
- PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. **Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)**, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 126–135, 1979. DOI: <https://doi.org/10.2307/2346729>.
- PURICH, Ariaan; DODDRIDGE, Edward W. Record low Antarctic sea ice coverage indicates a new sea ice state. **Communications Earth & Environment**, v. 4, p. 314, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01650-5>.
- RAPHAEL, M. N.; MARSHALL, G. J.; TURNER, J.; FOGT, R. L.; SCHNEIDER, D.; DIXON, D. A.; HOSKING, J. S.; JONES, J. M.; HOBBS, W. R. The Amundsen Sea Low: Variability, change, and impact on Antarctic climate. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 1, p. 111–121, 2016. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00018.1>.
- SERREZE, Mark C.; STROEVE, Julianne. Arctic sea ice trends, variability and implications for seasonal ice forecasting. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 373, n. 2045, 2015. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0159>.
- SINGH, H. A.; GARUBA, O. A.; RASCH, P. J. How asymmetries between Arctic and Antarctic climate sensitivity are modified by the ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 21, p. 11.875–11.884, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018GL079023>.
- STAMMERJOHN, S. E.; MARTINSON, D. G.; SMITH, R. C.; YUAN, X.; RIND, D. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and Southern Annular Mode variability. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 113, n. C3, p. C03S90, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JC004269>.

- STEWART, Andrew L. Mesoscale, tidal, and seasonal/interannual drivers of the Weddell Sea overturning circulation. **Journal of Physical Oceanography**, Boston, v. 51, n. 12, p. 3695–3722, dez. 2021. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0320.1>.
- STUECKER, Malte F.; BITZ, Cecilia M.; ARMOUR, Kyle C. Conditions leading to the unprecedented low Antarctic sea ice extent during the 2016 austral spring season. **Geophysical Research Letters**, v. 44, 2017. <https://doi.org/10.1002/2017GL074691>.
- TURNER, J.; *et al.* Recent decrease of summer sea ice in the Weddell Sea, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v. 49, n. 14, 2022. [10.1029/2022GL098338](https://doi.org/10.1029/2022GL098338).
- TURNER, John *et al.* Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 12, p. 5861–5869, 20 jun. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017GL073656>.
- TURNER, John; COMISO, Josefino C.; MARSHALL, Gareth J.; LACHLAN-COPE, Tom A.; CINTURÃO, Tom; MAKSYM, Ted; MEREDITH, Michael P.; WANG, Zhaomin; ORR, André. Ozone depletion-induced non-annular atmospheric circulation change and its role in the recent increase of Antarctic sea ice extent. **Geophysical Research Letters**, 23 abr. 2009. <https://doi.org/10.1029/2009GL037524>.
- TURNER, John; PHILLIPS, Tony; MARSHALL, Gareth J.; HOSKING, J. Scott; POPE, James O.; BRACEGIRDLE, Thomas J.; DEB, Pranab. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. **Geophysical Research Letters**, 20 jun. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017GL073656>.
- VAUGHAN, D. G.; MARSHALL, G. J.; CONNOLLEY, W. M.; PARKINSON, C.; MULVANEY, R.; HODGSON, D. A.; KING, J. C.; PUDSEY, C. J.; TURNER, J. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. **Climate Change**, v. 60, n. 3, p. 243-274, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1026021217991>.
- WANG, Jinfei; YANG, Qinghua; YU, Lejiang; *et al.* A review on Antarctic sea ice change and its climate effects. **Haiyang Xuebao**, v. 43, n. 7, p. 11–22, 2021. [10.12284/hyxb2021151](https://doi.org/10.12284/hyxb2021151).
- WANG, Sai *et al.* On the drivers of temperature extremes on the Antarctic Peninsula during austral summer. **Climate Dynamics**, v. 59, p. 2275–2291, 3 mar. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06058-4>.
- WANG, Xiaoli; STONE, Peter H.; MAROTZKE, Jochem. Global Thermohaline Circulation. Part I: Sensitivity to Atmospheric Moisture Transport. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 71–82, 1 jan. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012)
- XAVIER Junior, Sílvio Fernando Alves; JALE, Jader da Silva; STOSIC, Tatijana; SANTOS, Carlos Antonio Costa dos; SINGH, Vijay P. Precipitation Trends Analysis by Mann-Kendall Test: A Case Study of Paraíba, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [s. l.], v. 35, n. 2, p. 187–196, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351013>.
- YU, Lejiang; ZHONG, Shiyuan; SUN, Bo. Synchronous Variation Patterns of Monthly Sea Ice Anomalies at the Arctic and Antarctic. **Journal of Climate**, v. 35, n. 8, p. 2823–2847, 1 mai. 2022. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0756.1>.
- YUAN, Xiaojun; KAPLAN, Michael R.; CANE, Mark A. The Interconnected Global Climate System — A Review of Tropical–Polar Teleconnections. **Journal of Climate**, [s. l.], v. 31, n. 15, p. 5765–5792, 1 ago. 2018. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0637.1>.

Recebido em: 28/10/2025

Aceito para publicação em: 12/02/2026