

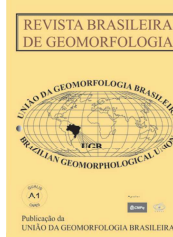


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 22, nº 1 (2021)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v22i1.1996>



### INFLUÊNCIA DAS FASES DO SAM NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO GELO MARINHO NA REGIÃO NORTE DA PENÍNSULA ANTÁRTICA

### INFLUENCE OF SAM PHASES ON THE SPATIAL DISTRIBUTION OF SEA ICE IN THE NORTH REGION OF THE ANTARCTIC PENINSULA

**Fernando Luis Hillebrand**

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0182-8526>  
E-mail: [fernando.hillebrand@rolante.ifrs.edu.br](mailto:fernando.hillebrand@rolante.ifrs.edu.br)*

**Ulisses Franz Bremer**

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0519-5807>  
E-mail: [ulissesbremer@gmail.com](mailto:ulissesbremer@gmail.com); [bremer@ufrgs.br](mailto:bremer@ufrgs.br)*

**Jorge Arigony-Neto**

*Instituto de Oceanografia, Universidade Federal do Rio Grande  
Av. Itália, 900, Rio Grande, Rio Grande do Sul. CEP: 96203-900. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4848-2064>  
E-mail: [jorgearigony@furg.br](mailto:jorgearigony@furg.br)*

**Cristiano Niederauer da Rosa**

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3693-4764>  
E-mail: [cristianonrd@gmail.com](mailto:cristianonrd@gmail.com)*

**Janisson Batista de Jesus**

*Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8372-5557>  
E-mail: [janisson.eng@gmail.com](mailto:janisson.eng@gmail.com)*

**Filipe Daros Idalino**

*Centro Polar e Climático, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5587-5208>  
E-mail: [filipe.daros.idalino@gmail.com](mailto:filipe.daros.idalino@gmail.com)*

**Marco Ivan Rodrigues Sampaio**

*Universidade de Cruz Alta  
Rodovia Municipal Jacob Della Mea, km 5,6, Cruz Alta, Rio Grande do Sul. CEP: 98020-290. Brasil  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2473-5269>  
E-mail: [marsampaio@unicruz.edu.br](mailto:marsampaio@unicruz.edu.br)*

## Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):  
05/09/2020

Aceito (Accepted):  
12/11/2020

### Palavras-chave:

Concentração do Gelo Marinho;  
Sensor Passivo; Variáveis Meteorológicas.

### Keywords:

Sea Ice Concentration; Passive  
Sensor; Weather Variables.

## Resumo:

O gelo marinho tem um papel importante no sistema climático global por meio da regulação do transporte e trocas de calor entre o oceano e a atmosfera, formação de massas d'água e circulação oceânica, e contribui também para o retorno da radiação solar incidente na superfície terrestre. Porém, as variáveis térmicas e mecânicas associadas às diferentes fases de *Southern Annular Mode* (SAM) podem afetar o equilíbrio do sistema oceano-atmosfera. Este trabalho tem por objetivo avaliar como as variáveis meteorológicas influenciam na concentração do gelo marinho na região oceânica situada a norte da Península Antártica durante as diferentes fases do SAM, entre os invernos austrais de 1979 e 2018. Para tal, foram consideradas as variáveis meteorológicas temperatura do ar a 2 m, temperatura da superfície do mar, pressão ao nível médio do mar, precipitação total, velocidade do vento, componente zonal do vento a 10 m e componente meridional do vento a 10 m. Foi constatado que, independentemente da fase do SAM, a temperatura

do ar a 2 m apresentou uma forte correlação negativa ( $R$  de -0,74 a -0,81) e a temperatura da superfície do mar uma moderada correlação negativa ( $R$  de -0,62 a -0,67). Também foi identificada uma tendência linear decrescente na área de gelo marinho, com a magnitude das anomalias da concentração do gelo marinho nas diferentes fases do SAM associadas à magnitude da concentração média histórica.

## Abstract:

Sea ice has an important function in the global climatic system by means of the regulation of the transportation and exchange of heat between ocean and atmosphere, the formation of water bodies and ocean circulation. It also contributes to solar radiation backscattering on the surface of the Earth. However, the thermal and mechanical variables associated with the different Southern Annular Mode (SAM) phases may affect the ocean-atmosphere system. The objective of the present study is to evaluate in what ways the weather variables influence the sea ice concentration in the ocean region located in the north side of the Antarctic Peninsula during the different SAM phases, between the austral winters of 1979 and 2018. For this purpose, weather variables such as air temperature at 2 m, sea surface temperature, mean sea level pressure, total precipitation, wind speed, zonal wind component at 10 m and meridional wind component at 10 m were considered. It was found that, independently of the SAM phase, the air temperature at 2 m showed a strong negative correlation ( $R$  from -0.74 to -0.81) and sea surface temperature presented a moderate negative correlation ( $R$  from -0.62 to -0.67). It was also possible to identify a decreasing linear trend in the sea ice area with the magnitude of anomalies of sea ice concentration in the different SAM phases associated with the magnitude of average historical concentration.

## 1. Introdução

Devido à sua alta sensibilidade às mudanças climáticas, a criosfera é um ambiente considerado como indicador natural das alterações meteorológicas. Desde o final do século XIX, a temperatura média combinada da superfície terrestre e oceânica aumentou aproximadamente  $0,85^{\circ}\text{C}$  (HARTMAN *et al.*, 2013). Como consequência disso, a extensão do gelo marinho no Ártico diminuiu  $5,2\%$  década<sup>-1</sup> (Li *et al.*, 2020), o que difere fortemente da Antártica, onde a área de gelo marinho vem aumentando desde 1985 a uma taxa estatisticamente significativa de  $1,9 \pm 1,3\%$  década<sup>-1</sup> (TURNER *et al.*, 2009).

O gelo marinho no entorno da Antártica desempenha um papel crucial na modulação de ecossistemas e do clima (ABRAM *et al.*, 2010), e a variabilidade sazonal e interanual afeta muitos níveis do ecossistema marinho antártico (DUCKLOW *et al.*, 2007; STAMMERJOHN *et al.*, 2008). Ao formar uma capa isolante de albedo elevado na superfície do oceano, o gelo marinho e sua cobertura de neve modulam sazonalmente as trocas de calor, gases e momento entre o oceano de alta latitude e a atmosfera, e também o radiativo, e propriedades termodinâmicas da superfície (MASSOM e STAMMERJOHN, 2010).

Estudos anteriores mostram que seu comportamento é fortemente influenciado tanto pela perda de massa com o derretimento das geleiras e plataformas de gelo (PRICE, HEYWOOD e NICHOLLS, 2008; JACOBS *et al.*, 2011; BINTANJA *et al.*, 2013) quanto pela variabilidade atmosférica, como a atuação do *Southern Annular Mode* (SAM) (THOMPSON e SOLOMON, 2002; ZHANG, 2007; GOOSSE *et al.*, 2009).

No Oceano Austral observa-se desde a década de 1980 uma tendência predominantemente positiva do índice SAM. O SAM é um modo de variabilidade na circulação atmosférica extratropical e das altas latitudes do Hemisfério Sul, que afeta as condições de tempo e clima de regiões remotas (THOMPSON e WALLACE, 2000; MARSHALL, 2003), agindo na diferença de Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) entre as latitudes 40° e 65°S (GONG e WANG, 1998). Conforme Meredith *et al.* (2017), dados coletados durante um evento SAM positivo muito forte, que também coincidiu com um forte evento La Niña, indicaram que anomalias de vento na Península Antártica Ocidental levaram a movimentos de gelo marinho para o sul, reduzindo as porcentagens de derretimento do gelo marinho e elevando a ocorrência de concentrações de água doce nas proximidades da costa. Porém, dentre os setores do Oceano Austral destaca-se o mar de Bellingshausen e a região oeste do mar de Weddell onde se apresentam correlações negativas significativas entre o aumento da extensão de gelo e a polaridade positiva do SAM (PEZZA *et al.*, 2012).

A região da Península Antártica (PA) é uma das mais sensíveis às variações do clima e tem apresentado significativa tendência de aquecimento da temperatura superficial (TURNER *et al.*, 2009). Nesta região o aumento no índice SAM induz um fluxo mais forte de ar relativamente quente de origem oceânica em sua direção pela face oeste, forçando-o a transpor a cadeia de montanhas e levando a um aquecimento acentuado na parte leste da península (MARSHALL *et al.*, 2006). Entre 2016 e 2017 foi constatada uma das menores extensões do gelo marinho no mar de Weddell, na Antártica. Este fato proporcionou o aquecimento do mar na região e ocasionou um retardo na formação do gelo nos invernos subsequentes (TURNER *et al.*, 2020). Além disso, essas alterações resultaram na desintegração das plataformas de gelo, desprendimentos frequentes de *icebergs*, mudanças no padrão de precipitação e redução do gelo marinho sazonal

em diversos setores da PA (ARIGONY-NETO *et al.*, 2014), bem como o recuo acentuado das frentes das geleiras (ROSA *et al.*, 2015; IDALINO *et al.*, 2018; GONÇALVES *et al.*, 2019).

Hillebrand *et al.* (2020) apresentaram uma ampla revisão bibliográfica sobre as principais variáveis meteorológicas que afetam na formação do gelo marinho na Antártica e aponta para os seguintes fatores: Temperatura do ar a 2 metros da superfície (T2m), Temperatura da Superfície do Mar (TSM), Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM), Precipitação Total (PT), Velocidade do vento (Vel), componente zonal e meridional do vento a 10 metros (U10m e V10m, respectivamente). Deste modo, o objetivo desta pesquisa é avaliar quais destas variáveis meteorológicas tem maior influência na concentração do gelo marinho na região oceânica situada a norte da PA, durante as diferentes fases do SAM, entre os invernos austrais de 1979 e 2018.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Área de estudo

Para este estudo a região oceânica a norte da PA foi delimitada em setores conforme a convenção da *Commission for the Conservation of Antarctic Marine Living Resources* (CCAMLR), utilizando as seguintes denominações (Figura 1): *Antarctic Peninsula Bransfield Strait West* (APBSE), *Antarctic Peninsula Bransfield Strait East* (APBSW), *Antarctic Peninsula Drake Passage West* (APDPW) e *Antarctic Peninsula West* (APW). A CCAMLR estabelece as delimitações das regiões oceânicas que circundam o Continente Antártico (45° e 60°S aproximadamente) para o acompanhamento da evolução dos recursos vivos marinhos como populações de peixes, moluscos, crustáceos, aves e demais espécies de organismos vivos encontradas. Nesta região é importante acompanhar as mudanças das condições ambientais relacionadas ao gelo, uma vez que as algas e a biota associadas ao gelo marinho são importantes fontes de alimento nas fases juvenis do krill (*Euphausia* sp.), consumidor primário da cadeia alimentar (LOEB e SANTORA, 2015; KOHLBACH *et al.*, 2017; SCHAAFSMA *et al.*, 2017)

Devido à identificação de duas origens distintas no aporte de gelo marinho (mar de Bellingshausen nas regiões APDPW e APW, e mar de Weddell nas regiões APBSW e APBSE), as análises consideraram esta di-

visão. Podemos destacar que no Continente Antártico durante o verão e o outono austral, as maiores tendências positivas encontram-se no mar de Weddell e negativas nos mares de Amundsen e Bellingshausen, destacando este comportamento bipolar (HOLLAND, 2014). A

Figura 2 apresenta as divisões propostas do Oceano Austral para análises do gelo marinho na Antártica (PARKINSON, 2019; PARKINSON e CAVALIERI, 2012; ZWALLY *et al.*, 2002) que reforçam estas subdivisões das regiões oceânicas citadas.

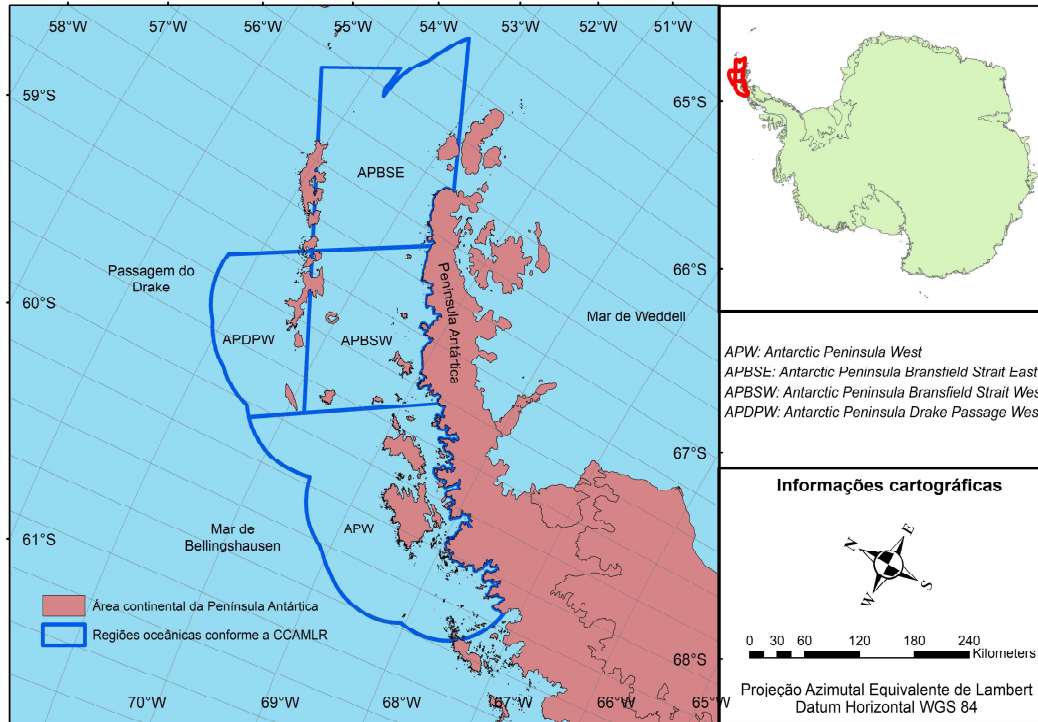


Figura 1 – Localização da região de estudo.

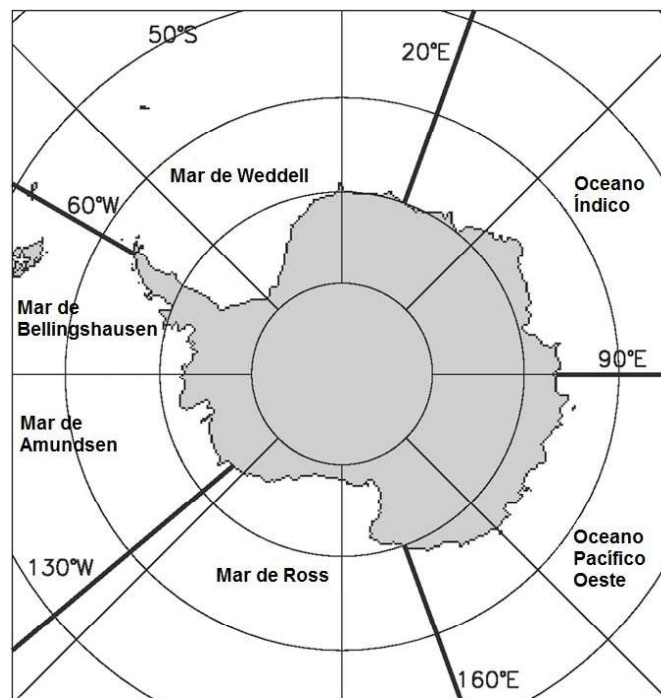


Figura 2 – Divisões do Oceano Austral para análises do gelo marinho na Antártica.

A caracterização geomorfológica da PA é destacada com uma cadeia de montanhas ininterruptas de elevação acentuada com uma média de 2.800 m de altitude, onde 62% das geleiras (282.330,22 km<sup>2</sup>) são de descarga, ou seja, drenam suas massas principalmente do platô coberto de gelo, ou campo de gelo ou calota de gelo, para o oceano ou para uma plataforma de gelo, tanto para o lado oeste e leste da PA (SILVA *et al.*, 2019). Este relevo acidentado forma uma barreira climática distinta, onde na região oeste e central encontramos um clima marítimo dominado pelo mar de Bellingshausen e a costa leste tem um clima continental dominado pelo mar de Weddell (MARTIN e PEEL, 1978).

## 2.2 Dados meteorológicos

Para avaliar a correlação das mudanças climáticas na distribuição espaço-temporal da concentração do gelo marinho na região de estudo, foram utilizados dados dos meses que compõem o inverno austral (junho, julho e agosto) dos parâmetros meteorológicos T2m, TSM, PT, PNMM, Vel, componentes eólicas U10m e V10m. Os valores mensais destas variáveis são provenientes do modelo de reanálise atmosférica *European Reanalysis Agency* (ERA5) obtidos por meio da extração dos valores dos *pixels* sobre a superfície (nível único) dos arquivos em formato *Network Common Data Form* (NetCDF) na resolução espacial nominal de 0,25° x 0,25°.

## 2.3 Dados da concentração de gelo marinho

A concentração do gelo marinho mensal foi obtida através do banco de dados *Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration* localizada no sítio da *National Snow & Ice Data Center* (NSIDC). Estas informações são provenientes dos sensores remotos passivos *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR), *Special Sensor Microwave Imager* (SSM/I) e *Special Sensor Microwave Imager/Sounder* (SSMIS) que utilizam o algoritmo *Climate Data Record* (CDR). Este algoritmo combina a estimativa da concentração de gelo marinho realizada por meio da temperatura de brilho em diferentes canais e polarizações de dois outros algoritmos (MEIER *et al.*, 2017): o algoritmo *NASA Team* (NT) (CAVALIERI *et al.*, 1984) e o algoritmo *Bootstrap* (BT) (COMISO, 1986). A resolução espacial nominal destes dados são 0,25° x 0,25°.

Informações referentes à concentração de gelo marinho são importantes para navegação, operações *offshore*, validação de modelos de gelo e assimilação de dados para modelos, e pesquisas climáticas. A concentração pode ser dada como uma relação pura (intervalo de 0–1), sendo 0 para água aberta ou 1 para gelo, como também expressa em porcentagem (0% a 100%), sendo expressa pela Equação 1 (KARVONEN, 2017). A Figura 3 ilustra visualmente as diferentes concentrações de gelo marinho.

$$C_i = \frac{A_{ice}}{A_{tot}} = 1 - \frac{A_{ow}}{A_{tot}} \quad (1)$$

sendo,  $C_i$  a concentração de gelo,  $A_{tot}$  a área total,  $A_{ice}$  a área da fração de gelo dentro da área total, e  $A_{ow}$  a área da fração de água aberta dentro da área total.

## 2.4 Análises estatísticas

Para realizar o coeficiente de correlação linear de Pearson ( $R$ ) entre os dados, foi previamente analisada a normalidade das variáveis por meio do teste Shapiro-Wilk. Este teste consiste em uma avaliação não paramétrica, ideal para avaliar diferentes distribuições e tamanhos das amostras (SHAPIRO e WILK, 1965). Para o  $R$  foi adotado o nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ) e a escala de interpretação considerou valores positivos e negativos, apresentando a seguinte forma: valores superiores a 0,9 indica uma correlação muito forte, 0,7 a 0,89 correlação forte, 0,5 a 0,69 correlação moderada, 0,3 a 0,49 correlação fraca e 0 a 0,29 correlação desprezível (WILKS, 2011).

O  $R$  entre a concentração do gelo marinho em relação às variáveis meteorológicas considerou dados do inverno austral entre 1979 e 2018 e foram separados considerando-se as diferentes fases de SAM: anos que apresentam o SAM positivo (1979, 1982, 1983, 1985, 1986, 1987, 1989, 1993, 1997, 1998, 1999, 2001, 2003, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2015, 2016 e 2017), e anos com o SAM negativo (1980, 1981, 1984, 1988, 1990, 1991, 1992, 1994, 1995, 1996, 2000, 2002, 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 e 2018). As indexações anuais dos valores de SAM foram obtidas no sítio eletrônico <https://legacy.bas.ac.uk/met/gjma/sam.html> através da metodologia de Marshall (2003) apresentadas na Figura 4.

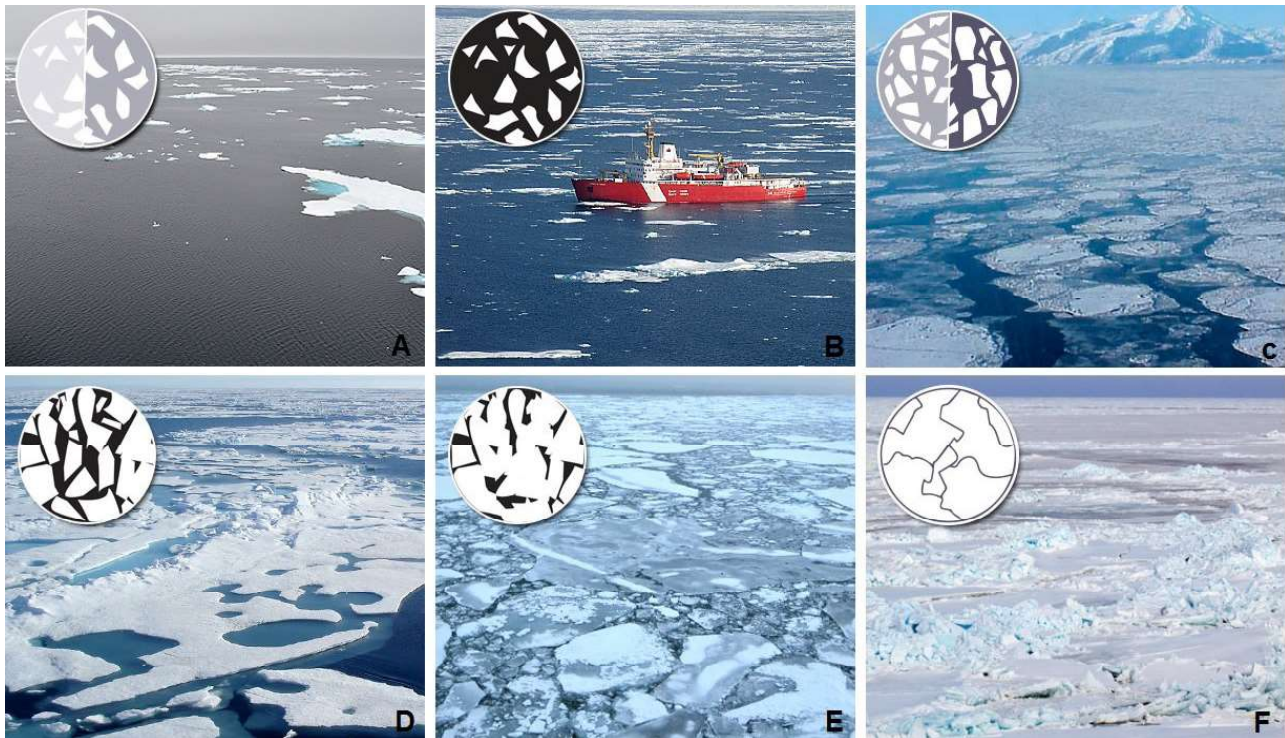


Figura 3 - Visualização das diferentes concentrações de gelo marinho: A) 10 a 20%, B) 30 a 40%, C) 50 a 60%, D) 70 a 80%, E) 90%, F) 100%. Fonte: University of Alaska Fairbanks (2017)

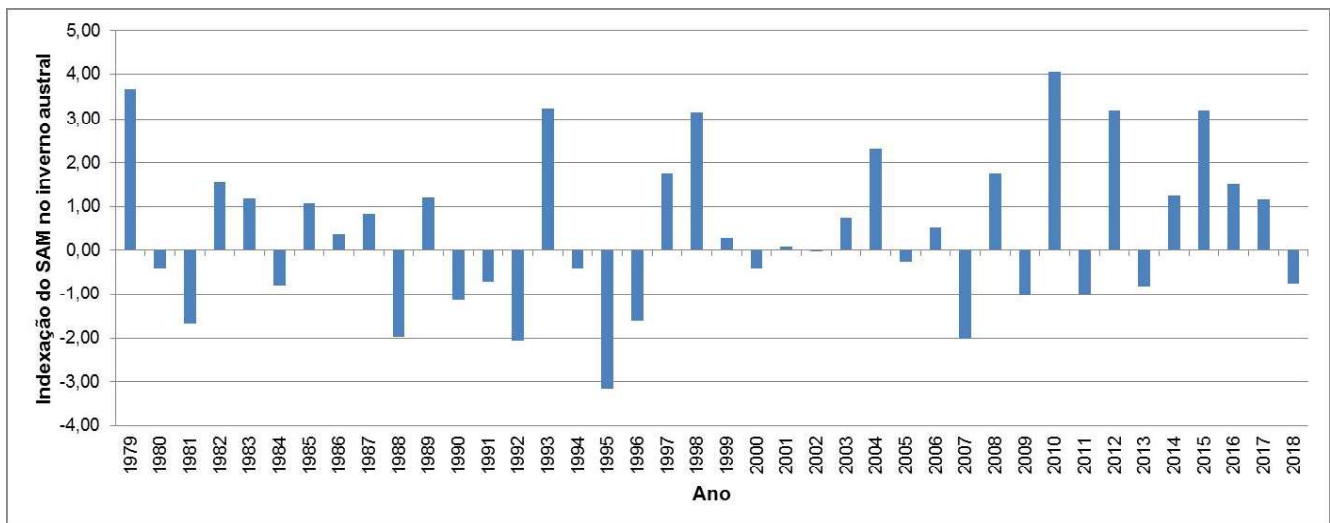


Figura 4 – Indexação das fases de SAM no inverno austral entre 1979 e 2018.

Além do *R*, também foi elaborada a série temporal da área coberta por gelo marinho nas regiões de estudo compreendendo o mesmo período para o mês de setembro, além de mapas de anomalias (BOMBARDI e CARVALHO, 2017) da concentração de gelo marinho em diferentes fases de SAM. A avaliação da evolução do gelo marinho em séries temporais pode ser realizada por meio do cálculo da área ou da extensão (SHOKR e SINHA, 2015). A extensão de gelo é calculada pela

área integral do *pixel* da imagem de um sensor remoto considerando a concentração superior a um valor limiar (*threshold*), sendo normalmente  $\geq 15\%$  conforme NSIDC (STROEVE e MEIER, 2018; ZWALLY *et al.*, 2002). Já a área coberta por gelo marinho é definida pela multiplicação do percentual da concentração de gelo  $\geq 15\%$  com a área do *pixel* (COMISO e NISHIO, 2008). Neste processo os dois parâmetros supracitados foram obtidos apenas para o mês de setembro, período

no qual ocorre a extensão máxima de gelo marinho no ciclo anual.

A tendência na evolução da área e extensão (km<sup>2</sup> ano<sup>-1</sup>) de gelo marinho na região de estudo foi obtida por meio do modelo de regressão linear através de dados mensais de setembro entre 1979 e 2018. Para a análise estatística foi aplicada a Razão de Magnitude (*RM*) entre a inclinação da reta e o seu respectivo desvio-padrão ( $\sigma$ ), exposto na Equação 2, obtendo assim uma indicação estatística aproximada (TAYLOR, 1997; PARKINSON, 2019). Considerando o teste *t* bicaudal com 38 graus de liberdade (dois a menos em relação ao número total de anos analisado) ao nível de confiança de 95%, valores de *RM* superiores 2,024 apresentam significância estatística.

$$\sigma = b \sqrt{\frac{1}{N-2} \frac{1-R^2}{R^2}} \quad (2)$$

sendo, *b* é o declive da linha de tendência, (*N*-2) é o número de graus de liberdade, e *R*<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação da linha de tendência.

**Tabela 1: R entre a concentração do gelo marinho e as variáveis meteorológicas entre 1979 e 2018 para as regiões oceânicas APBSW e APBSE nas diferentes fases do SAM durante o inverno austral.**

SAM	T2m	TSM	PT	PNMM	Vel	U10m	V10m
Positivo	-0,77	-0,63	-0,12	-0,16	-0,23	-0,30	0,32
Negativo	-0,78	-0,62	-0,06	0,00	-0,11	-0,33	0,43

**Tabela 2: R entre a concentração do gelo marinho e as variáveis meteorológicas entre 1979 e 2018 para as regiões oceânicas APW e APDPW nas diferentes fases do SAM durante o inverno austral.**

SAM	T2m	TSM	PT	PNMM	Vel	U10m	V10m
Positivo	-0,81	-0,61	0,00	-0,07	-0,25	0,11	0,17
Negativo	-0,74	-0,67	0,04	0,04	-0,17	0,00	-0,04

As mudanças de temperatura na superfície mostram forte sazonalidade e complexidade, com aumento de temperatura média anual na PA, principalmente no setor oeste. Em alguns locais no setor oeste, o aquecimento médio anual é de 0,5°C década<sup>-1</sup>, e, além disso, a componente meridional do vento (V10m) apresenta maiores velocidades que o vento zonal (U10m) (CO-

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Correlação entre a concentração do gelo marinho e as variáveis meteorológicas no inverno austral

Ao avaliar o *R* entre a concentração do gelo marinho e as variáveis meteorológicas nas regiões oceânicas APBSW e APBSE (Tabela 1), observa-se que ambas as fases do SAM apresentaram a mesma escala de interpretação. A T2m apresentou uma forte correlação negativa, a TSM uma moderada correlação negativa, a componente eólica U10m uma fraca correlação negativa, a componente eólica V10m uma fraca correlação positiva e as variáveis meteorológicas PT, PNMM e Vel apresentaram correlações desprezíveis em relação à concentração do gelo marinho.

Para as regiões oceânicas APW e APDPW (Tabela 2) também foi detectado que todas as fases do SAM apresentaram a mesma escala de interpretação no *R*. A T2m apresentou uma forte correlação negativa, a TSM uma moderada correlação negativa, e as variáveis meteorológicas PT, PNMM, Vel, U10m e V10m apresentaram correlações desprezíveis com a concentração do gelo marinho.

MIN e JUSTINO, 2017). Este comportamento eólico poderá influenciar em maiores valores do *R* para V10m em relação a U10m na distribuição espacial da concentração do gelo marinho nas regiões oceânicas APBSW e APBSE. Stammerjohn *et al.* (2008) também constataram que a atmosfera na PA responde a variabilidade do *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) e do SAM,

umentando a força dos ventos meridionais para o período entre a primavera e o outono, contribuindo com um tardio avanço do gelo marinho e o recuo mais cedo, levando à diminuição da sazonalidade da extensão de gelo marinho.

A forte correlação negativa encontrada pela nossa pesquisa entre a T2m e a concentração do gelo marinho também foi relatada em outros trabalhos. No período de 1976 e 1995, Ferron *et al.* (2001) compararam a série temporal de dados da extensão do gelo marinho na longitude de 60°W e observaram que as variações de temperatura do ar influenciaram com retardo de um mês, apresentando um  $R = -0,70$  (ao nível de significância de 99%). Magalhães Neto *et al.* (2009) encontraram uma correlação negativa entre a extensão máxima de gelo marinho e o SAM ( $R = -0,40$  a  $-0,60$ ), com redução de 8 a 12% da extensão de gelo marinho entre 1979 e 2007 na PA.

Indicativos expressivos demonstram as alterações da T2m na PA. Ferron *et al.* (2001) constataram na região entre 1947 e 1995 que a tendência de elevação da temperatura no inverno ( $0,038^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ ) é superior se comparado com o verão ( $0,016^{\circ}\text{C ano}^{-1}$ ). Comportamento similar foi observado por Wanderley *et al.* (2016) em que os maiores acréscimos na temperatura máxima foram observados para os meses de maio e agosto, com um aumento de  $0,45$  e  $0,42^{\circ}\text{C década}^{-1}$ , respectivamente. Silva *et al.* (2019) também observaram que a região da Antártica que apresenta a maior tendência na amplitude entre a temperatura máxima ( $0,22 \pm 0,02^{\circ}\text{C década}^{-1}$ ) e mínima ( $-0,57 \pm 0,08^{\circ}\text{C década}^{-1}$ ) é a PA para a segunda metade do século XX.

Outros exemplos de impactos da elevação da T2m podem ser observados na frente da geleira Polar Club, localizada na Ilha Rei George, PA, por exemplo. Entre 1986 e 2011 houve um recuo progressivo da frente da geleira representando um incremento de 26,53% na área livre de gelo, acompanhado com uma tendência no aumento da T2m em  $0,04^{\circ}\text{C ano}^{-1}$  e alterações em outras condições climatológicas, dentre elas a precipitação (POELKING *et al.*, 2014). Esta tendência da elevação de T2m pode afetar na aceleração do processo de degelo em várias outras geleiras da PA, onde a descarga da água doce no oceano pode desempenhar um papel importante na redução dos fluxos de calor e instabilidade da salinidade, afetando consequentemente na circulação termohalina e formação do gelo marinho (STOMMEL, 1961). SILVA *et al.* (2020) apresentaram uma análise

espacial e temporal das mudanças encontradas nas geleiras da PA, encontrando uma redução de área em 1.339,68 km<sup>2</sup> entre 1991 e 2015, e uma retração de 8.741,41 km<sup>2</sup> na área das plataformas de gelo devido ao recuo frontal.

Apesar das variáveis meteorológicas PT, PNMM e Vel terem apresentado correlações desprezíveis em relação à concentração do gelo marinho na região de estudo, vários estudos apontam mudanças no padrão comportamental nos últimos anos. Na PA a PT mostrou tendência negativa para a maioria dos meses, evidenciando diminuição das chuvas sobre a região. No entanto, apenas o mês de agosto demonstrou decréscimo para a precipitação estatisticamente significativa, com uma redução de  $7,42 \text{ mm década}^{-1}$  (WANDERLEY *et al.*, 2016). Além disto, observa-se nesta região uma redução da PNMM a uma taxa anual de  $-0,19 \pm 0,03 \text{ hPa década}^{-1}$  e uma elevação de  $0,58 \pm 0,04 \text{ m.s}^{-1} \text{ década}^{-1}$  na velocidade do vento, atribuindo a maior parte da variabilidade dessas propriedades aos modos de variabilidade natural do planeta, em especial SAM e *Semi-Annual Oscillation* (SAO) (SILVA *et al.*, 2019).

### 3.2 Anomalias na distribuição espacial da concentração do gelo marinho em diferentes fases do SAM para o mês de setembro

Ao analisarmos o mapa demonstrando a média histórica entre 1979 e 2018 da concentração do gelo marinho para o mês de setembro (Figura 5), podemos observar que a região oceânica APW apresenta as maiores concentrações de gelo marinho, e exatamente nesta região a fase positiva do SAM apresenta menor influência na redução da concentração. Porém, nas regiões oceânicas APBSW e APDPW onde se apresentam as menores médias históricas da concentração de gelo marinho para o mês de setembro, se observa as maiores anomalias da concentração de gelo marinho em fases negativas do SAM.

Este comportamento observado nas anomalias da concentração de gelo marinho em relação às diferentes fases de SAM para a região oceânica da APW foi também relatada por Carpenedo e Ambrizzi (2016) no setor dos mares de Bellingshausen-Amundsen, onde nos eventos extremos de retração de gelo marinho há um aquecimento da TSM neste setor, o que resulta em aumento da T2m.



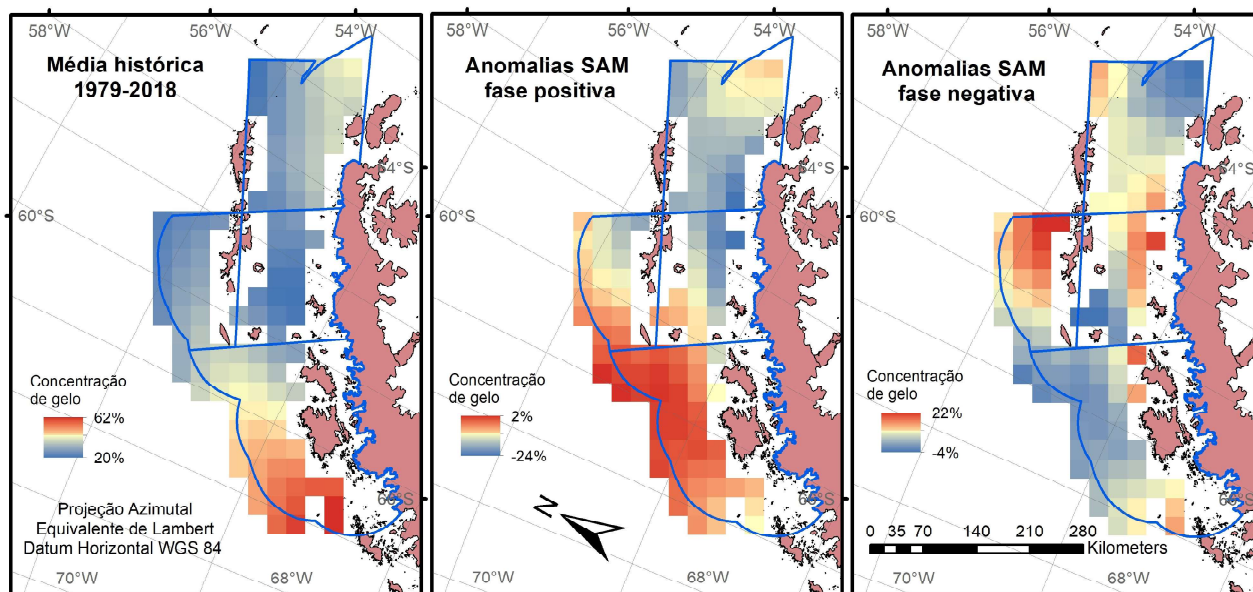


Figura 5 - Mapa demonstrando a média histórica entre 1979 e 2018 da concentração do gelo marinho e distribuição espacial das anomalias na concentração do gelo marinho em diferentes fases de SAM para o mês de setembro.

A região oceânica da APBSE não apresentou comportamentos extremos nas diferentes fases do SAM. Estes eventos mais extremos de retração (expansão) de gelo marinho no mar de Weddell, monitorados desde 1980 durante os meses de mínima e máxima extensão em fevereiro e setembro, respectivamente, contribuíram para um enfraquecimento da polaridade positiva (negativa) do SAM, passando para neutra. Essa relação é mais intensa no mês de setembro, por ser o período em que o gelo marinho mais impacta a circulação atmosférica de grande escala devido à sua posição em relação à zona baroclínica do Hemisfério Sul, localizada em torno de 60°S (KIDSTON *et al.*, 2011; CARPENEDO e SILVA, 2019).

O impacto das mudanças climáticas não é somente observado sobre o gelo marinho do Continente Antártico. Souza Júnior *et al.* (2016), com base em uma ampla revisão bibliográfica, destaca que esta acentuada redução na extensão do gelo marinho também é observada no Ártico, e que pode estar associada com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> (> 400 ppm), o que, conseqüentemente, contribui com a elevação da T2m, mudanças no balanço de energia, aumento das tempestades, mudanças na PT (menor duração, extensão e volume de neve), aumento da TSM nas bordas do gelo e mudanças na dinâmica oceânica.

### 3.3 Análise temporal da área e extensão do gelo marinho entre 1979 e 2018 para o mês de setembro

Analisando a evolução da área coberta por gelo marinho com concentração  $\geq 15\%$ , entre 1979 e 2018 para o mês de setembro, constatamos uma tendência linear negativa para a região de estudo, com uma taxa de  $-0,08 \pm 0,10 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  para os setores oceânicos APBSW e APBSE, e  $-0,07 \pm 0,12 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  para APDPW e APW (Figura 6).

Ao avaliarmos a evolução da extensão coberta por gelo marinho com concentração  $\geq 15\%$  também entre 1979 e 2018 para o mês de setembro (Figura 7), observamos novamente uma tendência linear negativa para as regiões APBSW e APBSE com uma taxa de  $-0,10 \pm 0,18 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$ . Porém, nas regiões oceânicas APDPW e APW observamos uma tendência linear positiva em  $0,13 \pm 0,19 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  na extensão do gelo marinho.

Em diversas regiões da Antártica, um mecanismo alternativo que contribui potencialmente para os aumentos observados no gelo marinho envolve o aumento da perda de massa do manto de gelo, causada pelo aquecimento do oceano e derretimento da plataforma de gelo subterrânea (BINTANJA *et al.*, 2013). A água derretida das plataformas de gelo tem uma densidade comparativamente baixa e, portanto, se acumula na camada superior do oceano (PRICE *et al.*, 2008), fa-

vorecendo a formação de gelo marinho. Além disso, a rejeição sazonal da água salgada da formação de gelo e os pulsos de água doce do derretimento das geleiras são fatores determinantes da quantidade de água doce do oceano superior e, em certas localizações costeiras da Antártica, a formação de água de fundo da Antártica, fria e densa, é um condutor crucial da circulação global do oceano (LUBIN e MASSOM, 2006).

As observações confirmam que as camadas superiores do oceano ficam mais frescas, estabilizando o oceano na base desta camada entre 100 a 200 m de profundidade (HELLMER, 2004; SWINGEDOUW *et al.*, 2008). Contudo, o setor dos mares de Bellingshausen e Amundsen tem apresentado um comportamento diferente. Enquanto que outros setores do Oceano Austral como o mar de Weddell, Oceano Índico, Oceano Pacífico Oeste e mar de Ross apresentam tendência crescente na extensão coberta por gelo marinho, o setor dos mares de Bellingshausen e Amundsen apresentam

tendência decrescente na extensão de gelo marinho desde 1979 (MARSON *et al.*, 2009; CAVALIERI e PARKINSON, 2008; PARKINSON, 2019), bem como um aumento contínuo no balanço de massa negativo (RIGNOT *et al.*, 2019). Os resultados obtidos na presente pesquisa confirmam as tendências e revelam que nas regiões oceânicas APDPW e APW, que integram o setor dos mares de Bellingshausen e Amundsen tem-se verificado uma tendência decrescente contínua na área de gelo marinho.

Apesar do comportamento oposto encontrado entre a área e extensão do gelo marinho nas regiões APDPW e APW, a análise estatística pelo teste *t* bicaudal detectou que todas as inclinações de reta em todas as regiões não apresentaram significância estatística ao nível de confiança de 95%. A Tabela 3 demonstra uma síntese das inclinações das retas das linhas de tendência com os respectivos desvios-padrões e a análise estatística pelo teste *t* bicaudal utilizando a *RM*.

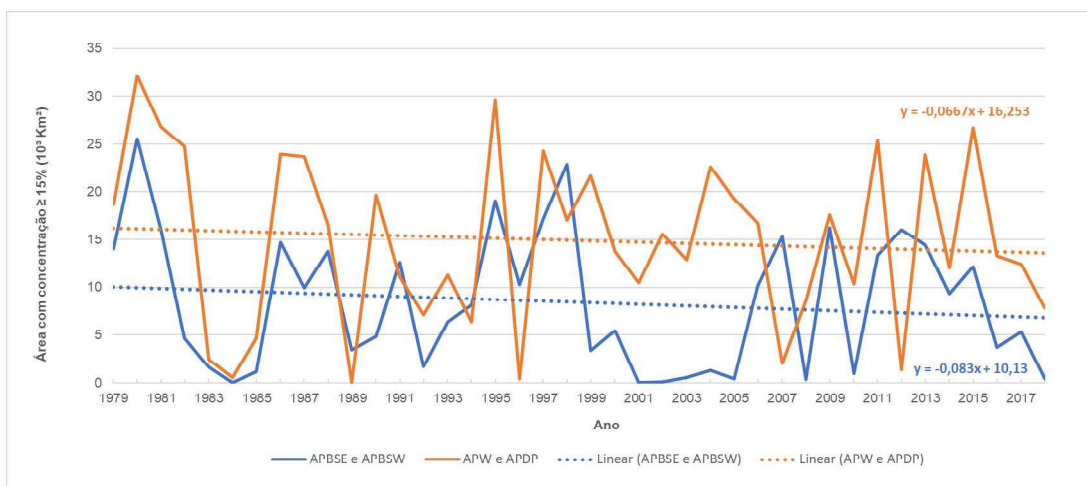


Figura 6 – Série temporal da área de gelo marinho com concentração  $\geq 15\%$  entre 1979 e 2018 para o mês de setembro.

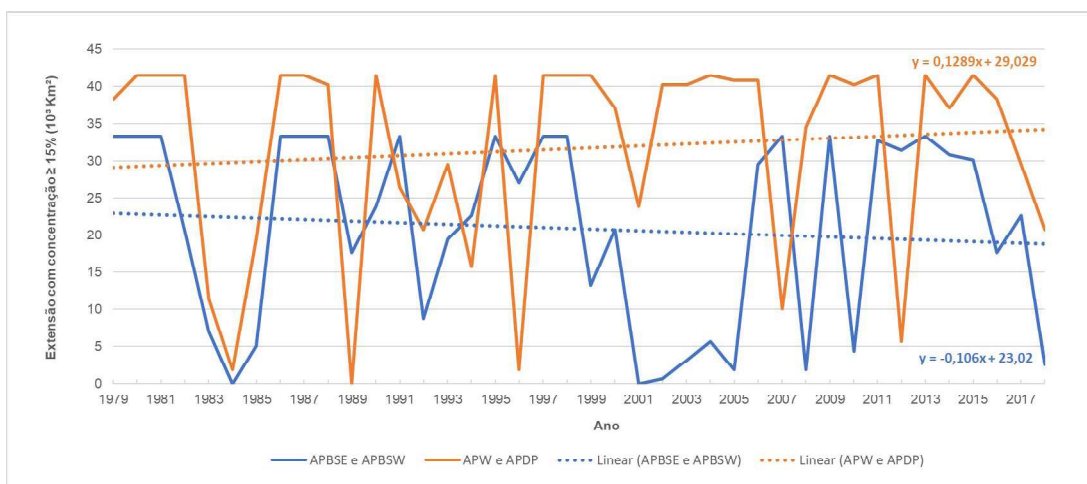


Figura 7 – Série temporal da extensão de gelo marinho com concentração  $\geq 15\%$  entre 1979 e 2018 para o mês de setembro.

**Tabela 3: Inclinações das retas das linhas de tendência com os respectivos desvios-padrões e a RM para análise estatística pelo teste t bicaudal com nível de confiança de 95%.**

Parâmetro	Regiões APBSW e APBSE		Regiões APDPW e APW	
	Inclinação (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> ano <sup>-1</sup> )	RM	Inclinação (10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup> ano <sup>-1</sup> )	RM
Área	-0,08 ± 0,10	0,83	-0,07 ± 0,12	0,53
Extensão	-0,10 ± 0,18	0,59	0,13 ± 0,19	0,67

A ocorrência predominante do SAM na fase positiva nos últimos anos está causando anomalias de baixa pressão atmosférica nos mares de Bellingshausen e Amundsen, fazendo com que este setor e o mar de Weddell fiquem sujeitos a ventos do quadrante norte (LEFEBVRE *et al.*, 2004). Isto possibilita a ocorrência do transporte de Ekman que consiste no impulsionamento da circulação oceânica pela transferência de *momentum* do vento (JAMES, 1989), resultando em fortes correntes meridionais que podem adensar o gelo marinho próximo ao Continente Antártico (cerca de 65°S) e também pode aumentar a salinidade da superfície do mar de Weddell, desestabilizando a coluna de água que poderá influenciar na formação de uma camada menos espessa de gelo marinho (LEFEBVRE e GOOSSE, 2005). Estes aspectos podem explicar a tendência na redução da área de gelo marinho na região de estudo.

#### 4. Conclusões

A pesquisa identificou que independente da fase do SAM (positiva ou negativa), as correlações encontradas entre as variáveis meteorológicas T2m, TSM, PNMM, PT, Vel, U10m e V10m, e a concentração do gelo marinho para o inverno austral entre 1979 e 2018 não apresentaram alteração na escala interpretativa. Destacamos que T2m apresentou uma forte correlação negativa (*R* entre -0,74 a -0,81) e a TSM uma moderada correlação negativa (*R* entre -0,62 a -0,67) na distribuição espacial do gelo marinho.

Ao analisar as anomalias da concentração do gelo marinho para o mês de setembro entre 1979 e 2018, observamos que a região oceânica APW apresenta as maiores concentrações de gelo marinho, e exatamente nesta região a fase positiva do SAM apresentou uma menor influência na redução da concentração. Já nas regiões oceânicas APBSW e APDPW, onde se apresentam

as menores médias históricas da concentração de gelo marinho, foram visualizados os maiores incrementos da concentração na fase negativa do SAM. Quanto as implicações resultantes desse processo, ainda não há resultados conclusivos sobre a real influência do comportamento do gelo marinho nessa região do Oceano Austral sobre o continente. O aumento do balanço de massa negativo das geleiras na região pode ser um elo entre a baixa concentração de gelo marinho de superfície, seguida pela perturbação no equilíbrio da concentração de sal, o que pode explicar o comportamento diferente dessa região para os demais setores da Antártica.

Também destacamos que a área coberta por gelo marinho com concentração  $\geq 15\%$  entre 1979 e 2018 para o mês de setembro apresentou tendência linear negativa com uma taxa de  $-0,08 \pm 0,10 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  para os setores oceânicos APBSW e APBSE, e  $-0,07 \pm 0,12 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  para APDPW e APW. Porém, ao analisarmos a extensão de gelo marinho com concentração  $\geq 15\%$  observamos uma tendência linear negativa para as regiões APBSW e APBSE com uma taxa de  $-0,10 \pm 0,18 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  e uma tendência linear positiva em  $0,13 \pm 0,19 \times 10^3 \text{ km}^2 \text{ ano}^{-1}$  para APDPW e APW. Apesar da extensão do gelo marinho ter apresentado comportamentos opostos, as linhas de tendência não apresentaram significância estatística ao nível de confiança de 95% por meio da *RM*.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) pelo afastamento para qualificação *stricto sensu* do primeiro autor e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior–Brasil (CAPES) pelo fomento financeiro.

## Referências Bibliográficas

- ABRAM, N. J.; THOMAS, E. R.; MCCONNELL, J. R.; MULVANEY, R.; BRACEGIRDLE, T. J.; SIME, L. C.; ARISTARAIN, A. J. Ice core evidence for a 20th century decline of sea ice in the Bellingshausen Sea, Antarctica. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. D23101, p. 1–9, 2010. DOI: 10.1029/2010JD014644.
- ARIGONY-NETO, J.; SKVARCA, P.; MARINSEK, S.; BRAUN, M.; HUMBERT, A.; MENDES-JÚNIOR, C. W.; JAÑA, R. (2014). Monitoring Glacier Changes on the Antarctic Peninsula. In KARGEL, J. S.; LEONARD, G. J.; BISHOP, M. P.; KÄÄB, A.; RAUP, B. H. **Global Land Ice Measurements from Space**. Springer, Berlin: p. 717–741.
- BINTANJA, R.; VAN OLDENBORGH, 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, 2013. DOI: 10.1038/ngeo1767.
- BOMBARDI, R. J.; CARVALHO, L. M. V. Práticas simples em análises climatológicas: uma revisão em análises e comparações de dados com tendências. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 311–320, 2017. DOI: 10.1590/0102-77863230001.
- CARPENEDO, C. B.; AMBRIZZI, T. Células de Circulação Meridional Durante os Eventos Extremos de Gelo Marinho Antártico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 3, 251–261, 2016. DOI: 10.1590/0102-778631320150137.
- CARPENEDO, C. B.; SILVA, R. C. Influência de extremos de gelo marinho na polaridade do modo anular sul e impactos climáticos no Brasil. In XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada (SBGFA), 18., 2019, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 2019. p. 1–12. ISBN 978–85–7282–778–2.
- CAVALIERI, D. J.; GLOERSEN, P.; CAMPBELL, W. J. Determination of sea ice parameters with the Nimbus 7 SMMR. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 89, n. D4, p. 5355–5369, 1984. DOI: 10.1029/JD089iD04p05355.
- CAVALIERI, D. J.; PARKINSON, C. L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. C7, p. 1–19, 2008. DOI: 10.1029/2007JC004564.
- COMIN, A. N.; JUSTINO, F. Investigação Climatológica na Península Antártica e no Arquipélago das Shetland do Sul. **Anuário do Instituto de Geociências–UFRJ**, v. 40, n. 2, p. 74–81, 2017. DOI: 10.11137/2017\_2\_74\_81.
- COMISO, J. C. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 91, n. C1, p. 975–994, 1986. DOI: 10.1029/JC091iC01p00975.
- COMISO, J. C.; NISHIO, F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR–E, SSM/I, and SMMR data. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 113, n. C2, p. 1–22, 2008. DOI: 10.1029/2007jc004257.
- DUCKLOW, H. W.; BAKER, K.; MARTINSON, D. G.; QUETIN, L. B.; ROSS, R. M.; SMITH, R. C.; STAMMERJOHN, S. E.; VERNET, M.; FRASER, W. Marine pelagic ecosystems: The West Antarctic Peninsula. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 362, n. 1477, p. 67–94, 2007. DOI: 10.1098/rstb.2006.1955.
- FERRON, F. A.; SIMÕES, J. C.; AQUINO, F. E. Série temporal de temperatura atmosférica para a Ilha Rei George, Antártica. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 14, p. 25–32, 2001. DOI: 10.7154/RDG.2001.0014.0002.
- GONÇALVES, M. A.; ROSA, K. K.; VIEIRA, R.; SIMÕES, J. C. Variação de área das geleiras do campo de gelo Kraków, Ilha Rei George, Antártica, no período 1956–2017. **Caminhos de Geografia**, v. 20, n. 70, p. 55–71, 2019. DOI: 10.14393/RCG207042087.
- GONG, D.; WANG S. Antarctic oscillation: concept and applications. **Chinese Science Bulletin**, v. 43, p. 734–738, 1998. DOI: 10.1007/BF02898949.
- GOOSSE, H.; LEFEBVRE, W.; DE MONTETY, A.; CRESPI, E.; ORSI, A. H. Consistent past half-century trends in the atmosphere, the sea ice and the ocean at high southern latitudes. **Climate Dynamics**, v. 33, p. 999–1016, 2009. DOI: 10.1007/s00382-008-0500-9.
- HARTMANN, D. L.; KLEIN TANK, A. M. G.; RUSTICUCCI, M.; ALEXANDER, L. V.; BRÖNNIMANN, S.; CHARABI, Y. A. R.; DENTENER, F. J.; DLUGOKENCKY, E. J.; EASTERLING, D. R.; KAPLAN, A.; SODEN, B. J.; THORNE, P. W.; WILD, M.; ZHAI, P. (2013). Chapter 2 – Observations: Atmosphere and surface. In INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2013 – The Physical Science Basis**. Cambridge: University Press: p. 159–254.
- HELLMER, H. H. Impact of Antarctic ice shelf basal melting on sea ice and deep ocean properties. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 10, p. L10307, 2004. DOI: 10.1029/2004GL019506.
- HILLEBRAND, F. L.; ROSA, C. N. DA; JESUS, J. B. DE; BREMER, U. F. Influência Climática na Formação do Gelo

- Marinho da Antártica Registrada por meio do Sensoriamento Remoto. **Anuário do Instituto de Geociências–UFRJ**, v. 43, n. 1, p. 151–161, 2020. DOI: 10.11137/2020\_1\_151\_161.
- HOLLAND, P. R. The seasonality of Antarctic sea ice trends. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 12, p. 4230–4237, 2014. DOI: 10.1002/2014GL060172.
- IDALINO, F. D.; PERONDI, C.; ROSA, K. K. DA; SIMÕES, J. C. Uso de Imagens Sentinel–2 para Análises de Retração de Geleiras: Comparativo Entre Ambientes nas Latitudes 44°S e 62°S. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 3, p. 1101–1111, 2018. DOI: 10.26848/rbgf.v10.6.p1101-1111.
- JACOBS, S. S.; JENKINS, A.; GIULIVI, C. F.; DUTRIEUX, P. Stronger ocean circulation and increasing melting under Pine Island Glacier ice shelf. **Nature Geoscience**, n. 4, p. 519–523, 2011. DOI: 10.1038/ngeo1188.
- JAMES, I. N. The Antarctic drainage flow: implications for hemispheric flow on the Southern Hemisphere. **Antarctic Science**, v. 1, n. 3, p. 279–290, 1984. DOI: 10.1017/S0954102089000404.
- KARVONEN, J. Baltic sea ice concentration estimation using sentinel–1 SAR and AMSR–2 microwave radiometer data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 55, n. 5, p. 2871–2883, 2017. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2655567.
- KIDSTON, J.; TASCHETTO, A. S.; THOMPSON, D. W. J.; ENGLAND, M. H. The influence of Southern Hemisphere sea–ice extent on the latitude of the mid–latitude jet stream. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 15, p. 1–5, 2011. DOI: 10.1029/2011GL048056.
- KOHLBACH, D.; LANGE, B. A.; SCHAAFSMA, F. L.; DAVID, C.; VORTKAMP, M.; GRAEVE, M.; FRANEKER, J. A.; KRUMPEN, T.; FLORES, H. Ice algae–produced carbon is critical for overwintering of Antarctic krill *Euphausia superba*. **Frontiers in Marine Science**, v. 4, n. 310, p. 1–16, 2017. DOI: 10.3389/fmars.2017.00310.
- LEFEBVRE, W.; GOOSSE, H. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice–ocean system: the role of the thermal and mechanical forcing. **Ocean Science**, v. 1, n. 3, p. 145–157, 2005. DOI: 10.5194/os-1-145-2005.
- LEFEBVRE, W.; GOOSSE, H.; TIMMERMANN, R.; FICHEFET, T. Influence of the Southern Annular Mode on the sea ice–ocean system. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. C9, p. 1–12, 2004. DOI: 10.1029/2004JC002403.
- LI, Z.; ZHAO, J.; SU, J.; LI, C.; CHENG, B.; HUI, F.; YANG, Q.; SHI, L. Spatial and Temporal Variations in the Extent and Thickness of Arctic Landfast Ice. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 64, 2020. DOI: 10.3390/rs12010064.
- LOEB, V. J.; SANTORA, J. A. Climate variability and spatiotemporal dynamics of five Southern Ocean krill species. **Progress in Oceanography**, v. 134, p. 93–122, 2015. DOI: 10.1016/j.pocean.2015.01.002.
- LUBIN, D.; MASSOM, R. A. **Polar Remote Sensing Atmosphere and Oceans**, Berlin: Praxis/Springer-Verlag, 2006. 756 p.
- MAGALHÃES NETO, N. DE; EVANGELISTA, H.; FONSECA, K. T. Uso do geoprocessamento no estudo da variação do gelo marinho antártico: redefinindo setores. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE. 2009. p. 4003–4009. ISBN 978–85–17–00044–7.
- MARSHALL, G. J. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. **Journal of Climate**, v. 16, n. 24, p. 4134–4143, 2003. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)016<4134:TI TSAM>2.0.CO;2.
- MARSHALL, G. J.; ORR, A.; VAN LIPZIG, N. P.; KING, J. C. The impact of a changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula summer temperatures. **Journal of Climate**, v. 19, n. 20, p. 5388–5404, 2006. DOI: 10.1175/JCLI3844.1
- MARSON, J. M.; MATA, M. M.; GARCIA, C. A. E. Gelo marinho antártico: tendências de 1978 a 2006. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14., 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE. 2009. p. 6563–6570. ISBN 978–85–17–00044–7.
- MARTIN, P. J.; PEEL, D. A. The spatial distribution of 10 m temperatures in the Antarctic Peninsula. **Journal of Glaciology**, v. 20, n. 83, p. 311–317, 1978. DOI: 10.1017/S0022143000013861.
- MASSOM, R. A.; STAMMERJOHN, S. E. Antarctic sea ice change and variability - Physical and ecological implications. **Polar Science**, v. 4, n. 2, p. 149–186, 2010. DOI: 10.1016/j.polar.2010.05.001.
- MEIER, W. N.; FETTERER, F.; SAVOIE, M.; MALLORY, S.; DUERR, R.; STROEVE, J. **NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 3**. Boulder: National Snow and Ice Data Center, 2017. DOI: 10.7265/N59P2ZTG.
- MEREDITH, M. P.; STAMMERJOHN, S. E.; VENABLES, H. J.; DUCKLOW, H. W.; MARTINSON, D. G.; IANNUZZI, R. A.;

- LENG, M. J.; WESSEM, J. M.; REIJMER, C. H.; BARRAND, N. E. Changing distributions of sea ice melt and meteoric water west of the Antarctic Peninsula. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 139, p. 40–57, 2017. DOI: 10.1016/j.dsr2.2016.04.019.
- 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**, v. 116, n. 29, p. 14414–14423, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1906556116.
- PARKINSON, C. L.; CAVALIERI, D. J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010. **The Cryosphere**, v. 6, p. 871–880, 2012. DOI: 10.5194/tc-6-871-2012.
- PEZZA, A. B.; RASHID, H. A.; SIMMONDS, I. Climate links and recent extremes in antarctic sea ice, high–latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 57–73, 2012. DOI: 10.1007/s00382-011-1044-y.
- POELKING, E. L.; ANDRADE, A. M. D.; VIEIRA, G. B. T.; SCHAEFER, C. E. G.; FERNANDES FILHO, E. I. Variações da frente da geleira Polar Club, Península Potter (ilha Rei George, Antártica Marítima) entre 1986 e 2011. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 379–388, 2014. DOI: 10.1590/0102-778620120439.
- PRICE, M. R.; HEYWOOD, K. J.; NICHOLLS, K. W. Ice–shelf–ocean interactions at Fimbul Ice Shelf, Antarctica from oxygen isotope ratio measurements. **Ocean Science**, v. 4, p. 89–98, 2008. DOI: 10.5194/os-4-89-2008.
- RIGNOT, E.; MOUGINOT, J.; SCHEUCHL, B.; VAN DEN BROEKED, M.; J. VAN WESSEMD, M.; MORLIGHEMA, M. Four decades of Antarctic ice sheet mass balance from 1979–2017. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 116, n. 4, p. 1095–1103, 2019. DOI: 10.1073/pnas.1812883116.
- ROSA, K. K. DA; SARTORI, R. Z.; MENDES–JÚNIOR., C. W.; SIMÕES, J. C. Análise das mudanças ambientais da Geleira Viéville, Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica. **Pesquisas em Geociências**, v. 42, n. 1, p. 61–71, 2015. DOI: 10.22456/1807-806.78109.
- SCHAAFSMA, F. L.; KOHLBACH, D.; DAVID, C.; LANGE, B. A.; GRAEVE, M.; FLORES, H.; VAN FRANEKER, J. A. Spatio–temporal variability in the winter diet of larval and juvenile Antarctic krill, *Euphausia superba*, in ice–covered waters. **Marine Ecology Progress Series**, v. 580, p. 101–115, 2017. DOI: 10.3354/meps12309.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika Trust**, v. 52, n. 3/4, p. 591–609, 1965. DOI: 10.2307/2333709.
- SHOKR, M.; SINHA, N. **Sea ice: physics and remote sensing**. Washington: American Geophysical Union and John Wiley & Sons, 2015. 600p.
- SILVA, A. B.; ARIGONY-NETO, J.; BICCA, C. E. Caracterização geomorfológica das geleiras da Península Antártica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, n. 3, p. 509–523, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i3.1547.
- SILVA, A. B.; ARIGONY-NETO, J.; BRAUN, M. H.; ESPINOZA, J. M. A.; COSTI, J.; JANÃ, R. Spatial and temporal analysis of changes in the glaciers of the Antarctic Peninsula. **Global and Planetary Change**, v. 184, p. 103079, 2020. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.103079.
- SILVA, N.; WAINER, I.; TONELLI, M. Caracterização de mudanças climáticas na Antártica a partir da segunda metade do Século XX. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2091–2107, 2019. DOI: 10.26848/rbgf.v12.6.p2091-2107.
- SOUZA JUNIOR, E.; SIMÕES, J.; ROSA, K. K. Consequências das rápidas mudanças ambientais no Ártico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 4, p. 1137–1156, 2016. DOI: 10.26848/rbgf.v9.4.p1137-1156.
- STAMMERJOHN, S. E.; MARTINSON, D. G.; SMITH, R. C.; IANNUZZI, R. A. Sea ice in the western Antarctic Peninsula region: Spatio–temporal variability from ecological and climate change perspectives. **Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 55, n. 18–19, p. 2041–2058, 2008. DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.04.026.
- STOMMEL, H. Thermohaline convection with two stable regimes of flow. **Tellus**, v. 13, n. 2, p. 224–230, 1961. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1961.tb00079.x.
- STROEVE, J.; MEIER, W. N. **Sea Ice Trends and Climatologies from SMMR and SSM/I–SSMIS, Version 3**. National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. Boulder: NASA, 2018. DOI: 10.5067/IJ0T7HFHB9Y6.
- SWINGEDOUW, D.; FICHEFET, T.; HUYBRECHTS, P.; GOOSSE, H.; DRIESSCHAERT, E.; LOUTRE, M. F. Antarctic ice-sheet melting provides negative feedbacks on future climate warming. **Geophysical Research Letters**, v. 4, p. 89–98, 2008. DOI: 10.1029/2008GL034410.
- TAYLOR, J. R. **Least–squares fitting. Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**. Second ed. Sausalito: University Science Books, 1997. 327p.

- THOMPSON, D. W. J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, v. 296, n. 5569, p. 895–899, 2002. DOI: 10.1126/science.1069270.
- THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. **Journal Climate**, v. 13, n. 5, p. 1000–1016, 2000. DOI: 10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2.
- TURNER, J.; BINDSCHADLER, R. A.; CONVEY, P.; DI PRISCO, G.; FAHRBACH, E.; GUTT, J.; HODGSON, D. A.; MAYEWSKI, P. A.; SUMMERHAYES, C. P. **Antarctic Climate Change and the Environment**. Cambridge: Scientific Committee for Antarctic Research, 2009. 526p.
- TURNER, J.; GUARINO, M. V.; ARNATT, J.; JENA, B.; MARSHALL, G. J.; PHILLIPS, T.; BAJISH, C. C.; CLEM, K.; WANG, Z.; ANDERSSON, T.; MURPHY, E. J.; CAVANAGH, R. Recent Decrease of Summer Sea Ice in the Weddell Sea, Antarctica. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 11, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1029/2020GL087127.
- TURNER, J.; PHILLIPS, T.; MARSHALL, G. J.; HOSKING, J. S.; POPE, J. O.; BRACEGIRDLE, T. J.; DEB, P. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 13, p. 6868–6875, 2017. DOI: 10.1002/2017GL073656.
- UNIVERSITY OF ALASKA FAIRBANKS (UAF). **Common terms used in sea ice research**. 2017. Disponível em: <http://seaiceatlas.snap.uaf.edu/glossary>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- WANDERLEY, H. S.; JUSTINO, F. B.; SEDIYAMA, G. C. Tendência da Temperatura e Precipitação na Península Antártica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 114–121, 2016. DOI: 10.1590/0102-778631220140146.
- WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Third ed. Oxford: Academic press, 2011. 704p.
- ZHANG, J. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions. **Journal Climate**, v. 20, n. 11, p. 2515–2529, 2007. DOI: 10.1175/JCLI4136.1.
- ZWALLY, H. J.; COMISO, J. C.; PARKINSON, C. L.; CAVALIERI, D. J.; GLOERSEN, P. Variability of Antarctic sea ice 1979–1998. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. C5, p. 9–1–9–21, 2002. DOI: 10.1029/2000JC000733.