

O clima antártico e as quatro décadas de pesquisa no Programa Antártico Brasileiro

Cesar Amaral, Dafne Anjos, Anna Donato, Rodrigo Goldenberg-Barbosa e Leticia Eller

Laboratório de Radioecologia e Mudanças Globais, Núcleo de Genética Molecular Ambiental e Astrobiologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Resumo

A Antártica é uma peça-chave na dinâmica climática no planeta. Seu clima frio característico é responsável pela manutenção da temperatura, modulação de fenômenos climáticos globais, sustentação de ecossistemas e da biodiversidade dependente do gelo. Da mesma forma, a região é impactada de maneira expressiva pelas mudanças climáticas globais. Ao longo das últimas décadas, o Programa Antártico Brasileiro vem empregando esforços no estudo da região, com diversos módulos e instalações empregados na captação de dados climáticos, atmosféricos, biológicos, dentre outros. Neste trabalho, é caracterizado o clima antártico, sua importância no contexto global, os impactos das mudanças climáticas na Antártica e os esforços do Programa Antártico Brasileiro no estudo do clima polar.

Abstract

Antarctica plays a key role in the planet's climate dynamics. Its characteristic cold climate is responsible for maintaining temperatures, global climate modulation, sustaining ecosystems and ice-dependent biodiversity. Likewise, the region is significantly impacted by global climate change. Over the past few decades, the Brazilian Antarctic Program has been making efforts to study the region, with several modules and facilities used to collect climatic, atmospheric, and biological data, among others. This paper characterizes the Antarctic climate, its importance in the global context, the impacts of climate change on Antarctica, and the efforts of the Brazilian Antarctic Program to study the polar climate.

Palavras-chave: antártica, clima, PROANTAR.

Keywords: antarctica, climate, PROANTAR.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v6n1.47733](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v6n1.47733)

1 Introdução

1.1 Temperatura, precipitação e cobertura de gelo antártico

A Antártica é o continente mais ao sul do planeta, conhecida por suas condições naturais extremas, como clima mais frio, seco e de ventos mais intensos quando comparado aos demais continentes [1, 2]. É formada por uma porção continental de cerca de 14 milhões de quilômetros quadrados, cerca de 10% da superfície terrestre, uma cobertura de gelo continental, e por extensas plataformas de gelo que contornam aproximadamente 74% da costa antártica [3], formadas pelo congelamento do oceano ao seu redor durante o inverno [4]. O continente é cercado pelo Oceano

Austral, delimitado ao norte pela convergência antártica, ou zona frontal polar sul, onde o encontro de diferentes massas de ar quentes e frias (Frente Polar) leva a variações de temperatura da água em até 10°C entre poucos quilômetros de distância [5]. De modo similar, as condições climáticas na Antártica podem variar de modo amplo entre diferentes regiões: do frio intenso da porção leste, onde foi registrada a temperatura mais baixa do mundo (-89,28°C), à climas mais amenos da Península Antártica, região mais ao norte do continente, onde as máximas de temperatura registradas chegam a 17,58°C e 18,3°C [2]. Cerca de 95% do continente antártico é coberto por gelo, com uma espessura média de 2.700 metros [6–8]. Apesar da Antártica ser classificada

como um deserto polar, onde são poucos os episódios de precipitação sobre o continente, seja na forma líquida ou neve, a formação dessa cobertura ocorre principalmente durante esses eventos [9, 10]. Nevascas ocorrem na costa devido a atividades ciclônicas no Círculo Polar Antártico, enquanto neve fina é mais comum no interior do continente [10, 11].

O Modo Anular do Sul (SAM) desempenha um papel significativo na influência da temperatura e da extensão do gelo marinho na Antártica. O SAM representa o movimento norte-sul do cinturão de vento ocidental que circunda o continente e pode existir em uma fase positiva ou negativa. Em sua fase positiva, o SAM está associado a ventos oeste mais fortes e à redução da extensão do gelo marinho, levando a temperaturas mais quentes na Península Antártica e ao aumento do derretimento glacial. Por outro lado, a fase negativa do SAM está ligada a ventos de oeste mais fracos, temperaturas mais frias, maior precipitação e, por consequência, maior extensão do gelo marinho [12]. Massas de ar marítimas também podem chegar ao interior e causar rápidos e extremos eventos de precipitação [9, 11]. A intrusão dessas massas de ar estão frequentemente associadas a rios atmosféricos [10], correntes de vapor de água, que contribuem de modo substancial na precipitação sobre o continente, principalmente na porção leste da Antártica, mas também no derretimento da cobertura de gelo [13, 14].

As plataformas de gelo marinho podem cobrir em seu período de maior extensão (setembro e outubro) aproximadamente 20 milhões de quilômetros quadrados do Oceano Austral, alcançando o paralelo 55°S [15, 16]. Sua formação auxilia na estruturação do ecossistema antártico, induzindo a circulação termohalina (circulação movida por diferenças na densidade de massas d'água, causada por variações na temperatura e salinidade) [15]. O gelo não incorpora íons de sal em sua estrutura cristalina, o que resulta na concentração dessas substâncias na fase líquida. Durante o crescimento do gelo, grande parte desse sal é expelida para a coluna d'água subjacente, aumentando sua densidade e provocando convecção termohalina [15]. Por outro lado, quando o gelo derrete, a entrada de água doce estabiliza e torna a camada de mistura mais rasa, promovendo o crescimento do fitoplâncton [15]. Discutiremos ao longo das

próximas seções a influência do clima antártico no equilíbrio climático mundial; como as mudanças globais afetam os processos físico-químicos e a biodiversidade antártica; e o papel da participação brasileira em estudos sobre o continente gelado.

2 O que faz o clima na Antártica ser tão importante?

O clima global é influenciado pela Antártica de diversas maneiras, sobretudo por sua extensa cobertura de gelo e pelos elementos retidos em suas camadas. A modulação do clima é influenciada pela intensa frente de circulação atmosférica na região e pela cobertura de gelo no continente, que reflete grande parte da luz solar, reduzindo a quantidade de calor absorvida pela Terra [17]. Além disso, as geleiras antárticas detêm 70% de toda a água doce do planeta, além de outros elementos acumulados nas camadas de gelo [17].

Em áreas profundas do oceano que circunda o continente, grandes quantidades de CO₂ são depositadas por processos bióticos, atuando como um importante sumidouro de CO₂ da atmosfera [17–19]. Nesses oceanos Antárticos também se formam uma integração com a circulação termohalina global, atuando como uma das principais regiões de formação de águas profundas que movem os grandes volumes de água pelos oceanos do planeta. Esse processo é essencial para a redistribuição do calor e a regulação do clima global [20].

O resfriamento do oceano que envolve o continente tem um impacto direto nas correntes marítimas, especialmente no Hemisfério Sul. Isso ocorre devido ao encontro das águas quentes com as do Oceano Austral, resultando no transporte de águas mais frias para latitudes menores, enquanto as águas quentes se resfriam ao se aproximarem do continente. Esse ambiente gelado, formado pela Frente Polar, exerce influência significativa na evolução e distribuição de diversas espécies que se limitam a essa região [21] ou dela dependem, cuja principal fonte de alimentação é o Krill Antártico (*Euphausia superba*) [22]. Esses organismos influenciam ou são responsáveis por processos de distribuição de nutrientes ao longo de rotas migratórias e a regulação biológica de CO₂, por meio da produção de pelotas fecais e



Figura 1: A nova Estação Antártica Comandante Ferraz, inaugurada em 2020.

da exportação de carbono particulado para águas mais profundas por parte de organismos relacionados às plataformas de gelo [23].

Ao integrar a rede de influências do continente antártico ao clima global, destaca-se também o vórtice polar antártico. Esse fenômeno atmosférico é caracterizado por uma intensa circulação de ventos de alta altitude que circula a Antártica, especialmente no inverno, formando uma barreira que mantém o ar extremamente frio confinado sobre a região. Esse sistema se desenvolve devido ao forte contraste térmico entre o interior gelado da Antártica e as regiões mais quentes das latitudes médias, aliado aos efeitos da rotação da Terra [24]. Além de seu papel na manutenção do frio antártico, o vórtice polar exerce influência significativa sobre a circulação atmosférica global. Sua estabilidade e força ajudam a definir os padrões dos ventos em grande escala, contribuindo para a formação de correntes de jato e impactando a distribuição das tempestades e das precipitações em partes do Hemisfério Sul [25,26].

Desse modo, o clima Antártico se demonstra uma peça-chave na dinâmica climática do planeta [27]. Assim, qualquer desestabilização dos serviços ecossistêmicos prestados pela Antártica (ex: circulação atmosférica, balanço da criosfera e ciclagem de nutrientes), podem ter efeito sobre todo o globo [27].

2.1 Efeitos das mudanças climáticas na Antártica

A Antártica é um dos continentes que mais vêm sofrendo com as consequências das mudanças cli-

máticas, principalmente com episódios de calor intenso que estão se tornando mais frequentes e intensos [28–31]. Essas ondas de calor podem gerar vários impactos ecológicos. O derretimento acelerado de gelo e neve causado pelo aumento da temperatura pode desestabilizar plataformas de gelo, cuja massa de água armazenada equivale a um aumento de aproximadamente 58m do nível do oceano global [6]. A perda da superfície nevada também reduz a capacidade de refletividade do gelo (albedo), fazendo com que mais radiação solar seja absorvida e acelerando ainda mais o processo de derretimento [32]. Além disso, o "carbono negro" (*black carbon*) originado das queimadas no Brasil e transportado para a Antártica por meio de correntes atmosféricas de longa distância [33], também possui o potencial de reduzir o albedo na Antártica.

O derretimento acelerado das geleiras adiciona grandes volumes de água doce ao oceano, reduzindo a salinidade e afetando a formação de Água de Fundo da Antártica, uma massa de água fria e densa essencial para a circulação global dos oceanos [34,35]. Isso pode enfraquecer a circulação termohalina, responsável por distribuir o calor pelo planeta, impactando padrões climáticos globais [36] e podendo até interferir no funcionamento da Corrente do Golfo, diminuindo sua intensidade e levando a um resfriamento das regiões da Europa Ocidental e outras áreas próximas, alterando padrões climáticos locais e globais [37–39].

Pinguins e outras espécies marinhas podem ser impactadas pela perda de gelo marinho, que é essencial para a reprodução e a busca por alimento [40]. Por exemplo, o pinguim-de-adélia (*Pygoscelis adeliae*) depende do gelo para acessar suas áreas de alimentação e mudanças em sua distribuição podem comprometer a sobrevivência da espécie [41]. Já o pinguim-imperador (*Aptenodytes forsteri*), que nidifica no gelo marinho, enfrenta riscos cada vez maiores à medida que esse habitat se torna instável [42]. O derretimento da neve e do gelo também pode alterar a estrutura das comunidades microbianas do solo, da água e do ar, afetando a composição e a dinâmica do fitoplâncton, base da cadeia alimentar marinha [43–46]. Assim como a diversidade de microrganismos presente na região, que é transportada através de suas conexões de massas

de ar e de água para outras regiões [47]. Além disso, a presença de mais água líquida e temperaturas mais amenas favorece o crescimento de musgos e líquens em áreas antes cobertas por gelo permanente, alterando a ecologia terrestre da região [48], e a floração de plantas vasculares nativas [49].

3 O PROANTAR e os estudos climáticos na Península Antártica e na Antártica Continental

O Tratado Antártico, assinado em 1959, determina o continente gelado como uma reserva natural dedicada unicamente à paz e à ciência, vetando qualquer reivindicação territorial, atividades exploratórias e militares até 2048, quando esses termos poderão ser revistos. Deste modo, o tratado estabelece como condição essencial aos países que almejam ser membros consultivos (ou seja, ter poder de veto e voto sobre as decisões acerca do continente) a realização de pesquisa científica substancial de qualidade na Antártica [50]. Para tanto, o Brasil mantém desde 1982 o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), sendo o programa científico mais duradouro ao longo da história do país. Através dele são desenvolvidos projetos de pesquisa de vários segmentos, os quais participam anualmente das Operações Antárticas (OPERANTAR). Dentre os diversos segmentos de pesquisa desenvolvidos, incluem-se estudos sobre a biodiversidade antártica, alta atmosfera, Oceano Austral, geologia e geofísica, ciências humanas, sociais e sobre o gelo e clima antártico, não apenas investigando os elementos locais, mas também a sua influência sobre o planeta [51, 52].

3.1 A Estação antártica Comandante Ferraz e os estudos climáticos brasileiros na Península Antártica

O Brasil mantém instalações no continente e na Península Antártica a fim de apoiar os projetos de pesquisa e fornecer dados obtidos sobre a região. Em 1984, dois anos após a criação do PROANTAR, foi inaugurada a Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) localizada na Ilha Rei George (62°05'S e 58°23'28"E) [50, 53]. Em 2012 a EACF foi destruída por um incêndio, e a



Figura 2: Módulo de Pesquisa Ipanema na Baía do Almirantado, Ilha Rei George, Antártica.

nova estação foi inaugurada em 2020 (Figura 1). Durante o período sem uma estação brasileira, as atividades de pesquisa ligadas ao PROANTAR tiveram como recurso o Módulos Antárticos Emergenciais (MAE), os navios de apoio Ary Rongel e Almirante Maximiano. Além do apoio nacional, a cooperação com outros países foi fundamental, ao permitir a continuação das atividades de pesquisas em suas instalações [54].

A nova estação conta com uma estrutura moderna, que abriga pesquisadores e militares durante o verão e o inverno antártico, e é composta não apenas de instalações de habitação, mas também de laboratórios equipados para atender a diferentes áreas de pesquisa [55]. Além do bloco de laboratórios internos à estação, ela conta com o apoio de módulos espalhados pela Baía do Almirantado, como o de meteorologia, de análises de baixa frequência (VLF), lavagem de sedimentos, abrigos e módulos de pesquisa avançados, como o módulo Ipanema (Figura 2).

No continente, os módulos Criosfera 1 e Criosfera 2 recebem e fornecem dados atmosféricos, de aerobiologia (estudo de partículas de origem biológica transportadas pelo ar) e geofísica. Em conjunto, as instalações na Península e no continente fornecem dados desde a Antártica marítima até pontos mais próximos ao Polo Sul, e permitem acompanhar e identificar eventos climáticos vindos do polo e que podem chegar dos trópicos até ele (ex: [56]).



Figura 3: Laboratório Avançado Criosfera 1, localizado próximo ao Polo Sul. Fonte: <https://www.criosfera1.com/>

3.2 O Laboratório Avançado *CRIOSFERA 1 e a conexão entre a Antártica Marítima e Continental*

O Laboratório Avançado Criosfera 1 (Figura 3) é um módulo científico brasileiro mais próximo ao Pólo Sul (84°S, 79°29'39"W), e foi inaugurado em 2012 para coletar e transmitir de forma autônoma dados meteorológicos, de dióxido de carbono (CO₂) e de particulados atmosféricos para análise de poluentes produzidos em outras regiões do planeta e detectados no continente antártico. O laboratório funciona como um ponto de conexão de uma rede de monitoramento de aerossóis que se estende desde o módulo Ipanema na Península Antártica e o Polo Sul, formando uma rede contínua que acompanha todo o trajeto percorrido pelas correntes de ar que conectam a Antártica Marítima e a Antártica Continental.

A Antártica Marítima e a Antártica Continental estão interligadas por processos atmosféricos, oceânicos e ecológicos que moldam a dinâmica ambiental do continente [57]. A Antártica Marítima, composta principalmente pelas Ilhas Shetlands do Sul e pela Península Antártica, é caracterizada por um clima mais ameno, forte influência oceânica e maior biodiversidade. Já a Antártica Continental, que abriga a vasta camada de gelo da Antártica Oriental e Ocidental, apresenta temperaturas extremamente baixas e condições ambientais hostis à vida, sendo dominada por desertos frios e geleiras espessas [58].

A Antártica Marítima e a Antártica Continental estão interligadas por processos atmosféricos, oceânicos e ecológicos que moldam a dinâmica ambiental do continente [57]. A Antártica Marítima, composta principalmente pelas Ilhas She-

tlands do Sul e pela Península Antártica, é caracterizada por um clima mais ameno, forte influência oceânica e maior biodiversidade. Já a Antártica Continental, que abriga a vasta camada de gelo da Antártica Oriental e Ocidental, apresenta temperaturas extremamente baixas e condições ambientais hostis à vida, sendo dominada por desertos frios e geleiras espessas [58].

A conexão entre essas duas regiões se dá, principalmente, através da circulação atmosférica e oceânica. As intensas correntes de ar, impulsionadas pelos ventos predominantes e pelos sistemas ciclônicos sobre o Oceano Austral, transportam umidade, aerossóis marinhos e até mesmo microrganismos do ambiente marítimo para o interior do continente [57, 59]. Em um estudo realizado no Criosfera 1, foi observado que microrganismos marinhos são transportados a longas distâncias através da troposfera (camada mais baixa que constitui a atmosfera terrestre, abaixo de 15 km de altitude) antártica, atingindo latitudes elevadas. Esses microrganismos marinhos chegam ao interior da Antártica associados a aerossóis marinhos e micropartículas insolúveis. Os microrganismos presentes nas camadas de neve compartilham características com comunidades microbianas da água superficial da Península Antártica [57].

Outro aspecto relevante dessa conexão é o impacto das mudanças climáticas. A Península Antártica é uma das regiões que mais aqueceram nas últimas décadas, com temperaturas subindo cerca de 2,5°C desde a metade do século XX [60]. Esse aquecimento, que intensifica o degelo, pode alterar os padrões de circulação atmosférica e oceânica, potencialmente afetando a Antártica Continental. Modelos climáticos sugerem que o aumento da temperatura e da umidade na Antártica Marítima pode influenciar a quantidade de neve depositada no interior do continente, modificando seu balanço de massa e contribuindo para a elevação do nível do mar [61].

4 Comentários finais

Ao conhecer o impacto que a Antártica exerce sobre o clima global, é possível determinar a importância de estudos sobre o clima na região e o impacto sofrido por ela, devido às mudanças cli-

máticas globais. Preservar esse continente é fundamental para a manutenção de sua diversidade única e dos ecossistemas globais afetados pela dinâmica de alimentação de organismos cujo ciclo de vida depende do gelo marítimo e terrestre.

A compreensão desses fatores é fonte fundamental de subsídios para a tomada de decisões sobre o manejo dessa área, como a revisão dos termos do Tratado Antártico em 2048 [62], que atualmente contempla a importância da conservação da Antártica como um patrimônio natural que deve ser conversado. Do mesmo modo, a integração de tecnologias atuais e instalações modernas presentes no continente e na Península, permite ao Brasil desenvolver estudos substanciais para se manter como membro consultivo do tratado e entender como o país é afetado por tais mudanças. É preciso levar em conta a importância do PROANTAR nesse contexto, e no investimento em pesquisa brasileira para que essas atividades de monitoramento sejam contínuas e concretas. Com isso, as ações ligadas a estudos climáticos no continente gelado representam uma ferramenta de conservação global e colaboração internacional.

Portanto, a Antártica Marítima e a Antártica Continental estão intrinsecamente conectadas por meio de processos atmosféricos, oceânicos e criosféricos. Essas interações desempenham um papel crucial na regulação do clima global e na manutenção dos ecossistemas polares. Com as mudanças climáticas em curso, entender essa conectividade através dos sistemas de captação e transmissão de dados torna-se ainda mais essencial para prever impactos futuros e desenvolver estratégias de conservação para a região.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

Sobre o autor

Cesar Amaral (cesarllamaral@gmail.com) é especialista em Biologia Molecular Ambiental, atuando na pesquisa de bioaerosóis antárticos, mudanças climáticas e Astrobiologia. Desde janeiro de 2020 é Professor do Departamento de Biofísica e Biometria da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) e credenciado como orientador no Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Evolução (PPGEE) da UERJ, atuando como Pesquisador e Vice-Coordenador do Projeto Rios Atmosféricos da Antártica (Projeto RITMOS) junto aos coautores no desenvolvimento de pesquisas junto ao Programa Antártico Brasileiro (PRO-ANTAR).

Dafne Anjos é doutoranda no PPGEE/UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular nos temas aerobiologia, taxonomia e filogenia de organismos antárticos e sub antárticos.

Anna Donato é doutoranda no PPGEE/UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular com ênfase em DNA ambiental, Genética de Populações e Diversidade Genética de mamíferos marinhos.

Rodrigo Goldenberg-Barbosa é doutorando no PPGEE/UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular, DNA ambiental, Mudanças Climáticas e ciências Antárticas.

Letícia Eller é bióloga pela UERJ, e tem experiência em Biologia Molecular com ênfase em meio ambiente.

Referências

- [1] P. Krause e K. Flood, *Weather and Climate Extremes*, US Army Corps of Engineers 94 (1997).
- [2] J. Turner et al., *Extreme Temperatures in the Antarctic*, *Journal of Climate* **34**(7), 2653 (2021).
- [3] H. Anna et al., *Extending the record of Antarctic ice shelf thickness change, from 1992 to 2017*, *Advances in Space Research* **68**(2), 724 (2021).
- [4] A. Fox, A. Paul e R. Cooper, *Measured Properties of the Antarctic Ice Sheet Derived from the SCAR Antarctic Digital Database*, *Polar Record* **30**(174), 201 (1994).

- [5] I. L. Boyd, *Antarctic Marine Mammals*, in *Encyclopedia of Marine Mammals*, editado por W. F. Perrin, B. Würsig e J. Thewissen (Academic Press, London, 2009), 42–46, second edition ed.
- [6] P. Fretwell et al., *Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica*, *The cryosphere* **7**(1), 186 (2013).
- [7] S. Andrew et al., *The IMBIE team. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*, *Nature* **558**, 219– (2018).
- [8] J. Garbe et al., *The hysteresis of the Antarctic Ice Sheet*, *Nature* **585**, 538 (2020).
- [9] T. John et al., *The dominant role of extreme precipitation events in Antarctic snowfall variability*, *Geophysical Research Letters* **46**(6), 3502 (2019).
- [10] J. D. Wille et al., *Antarctic Atmospheric River Climatology and Precipitation Impacts*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **126**(8), e2020JD033788 (2021).
- [11] N. Souverijns et al., *How does the ice sheet surface mass balance relate to snowfall? Insights from a ground-based precipitation radar in East Antarctica*, *The Cryosphere* **12**(6), 1987 (2018).
- [12] D. Thompson e S. Susan, *Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change*, *Science* **296**(5569), 895 (2002).
- [13] M. L. MacLennan et al., *Contribution of Atmospheric Rivers to Antarctic Precipitation*, *Geophysical Research Letters* **49**(18), e2022GL100585 (2022).
- [14] K. Marlen et al., *Vertical structure and surface impact of atmospheric rivers reaching antarctic sea ice and land*, *Atmospheric Research* **315**, 107841 (2025).
- [15] H. Eicken, *The role of sea ice in structuring Antarctic ecosystems*, *Polar Biology* **12**(1), 3 (1992).
- [16] R. A. Massom et al., *Snow on Antarctic sea ice*, *Reviews of Geophysics* **39**(3), 413 (2001).
- [17] P. A. Mayewski et al., *State of the Antarctic and Southern Ocean climate system*, *Reviews of Geophysics* **47**(1), RG1003 (2009).
- [18] B. Narissa et al., *Perspective: increasing blue carbon around Antarctica is an ecosystem service of considerable societal and economic value worth protecting*, *Global Change Biology* **27**(1), 5 (2021).
- [19] H. Filip et al., *Modelling ground thermal regime in bordering (dis) continuous permafrost environments*, *Environmental research* **181**, 108901 (2020).
- [20] S. Rahmstorf, *Ocean circulation and climate during the past 120,000 years*, *Nature* **419**(6903), 207 (2002).
- [21] T. John et al., *Antarctic climate change and the environment: an update*, *Polar record* **50**(3), 237 (2014).
- [22] F. Hauke et al., *The association of Antarctic krill *Euphausia superba* with the under-ice habitat*, *PloS one* **7**(2), e31775 (2012).
- [23] M. Gleiber, S. Deborah e D. Hugh, *Time series of vertical flux of zooplankton fecal pellets on the continental shelf of the western Antarctic Peninsula*, *Marine Ecology Progress Series* **471**, 23 (2012).
- [24] M. R. Schoeberl et al., *The structure of the polar vortex*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **97**(D8), 7859 (1992).
- [25] P. Andrea et al., *Impact of Antarctic polar vortex occurrences on total ozone and UVB radiation at southern Argentinean and Antarctic stations during 1997–2003 period*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **110**(D3), (2005).
- [26] L. Eun-Pa et al., *Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex*, *Nature Geoscience* **12**(11), 896 (2019).
- [27] L. R. Pertierra et al., *Ecosystem services in Antarctica: Global assessment of the current state, future challenges and managing opportunities*, *Land use policy* **49**, 101299 (2021).

- [28] S. González-Herrero et al., *Climate warming amplified the 2020 record-breaking heatwave in the Antarctic Peninsula*, *Communications Earth & Environment* **3**(1), 122 (2022).
- [29] D. Barriopedro et al., *Heat waves: Physical understanding and scientific challenges*, *Reviews of Geophysics* **61**(2), e2022RG000780 (2023).
- [30] E. Blanchard-Wrigglesworth et al., *The Largest Ever Recorded Heatwave—Characteristics and Attribution of the Antarctic Heatwave of March 2022*, *Geophysical Research Letters* **50**(178), e2023GL104910 (2023).
- [31] J. D. Wille et al., *The Extraordinary March 2022 East Antarctica “Heat” Wave. Part I: Observations and Meteorological Drivers*, *Journal of Climate* **37**(3), 757 (2024).
- [32] M. Seo et al., *Long-Term Variability of Surface Albedo and Its Correlation with Climatic Variables over Antarctica*, *Remote Sensing* **8**(12) (2016).
- [33] N. Magalhães et al., *Seasonal changes in black carbon footprint on the Antarctic Peninsula due to rising shipborne tourism and forest fires*, *Science Advances* **10**(42), eadp1682 (2024).
- [34] S. Zhou et al., *Slowdown of Antarctic Bottom Water export driven by climatic wind and sea-ice changes*, *Nature Climate Change* **13**(7), 701 (2023).
- [35] Q. Li et al., *Abyssal ocean overturning slowdown and warming driven by Antarctic meltwater*, *Nature* **615**(7954), 841 (2023).
- [36] M. Kolbe et al., *Impact of Thermohaline Variability on Sea Level Changes in the Southern Ocean*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **126**(9), e2021JC017381 (2021).
- [37] H. Brix e R. Gerdes, *North Atlantic Deep Water and Antarctic Bottom Water: Their interaction and influence on the variability of the global ocean circulation*, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **108**(C2) (2003).
- [38] A. J. Greg O’Hare e R. Pope, *Current Shifts in Abrupt Climate Change: The Stability of the North Atlantic Conveyor and its Influence on Future Climate*, *Geography* **90**(3), 250 (2005).
- [39] G. O’Hare, *Updating our understanding of climate change in the North Atlantic: the role of global warming and the Gulf Stream*, *Geography* **96**(1), 5 (2011).
- [40] J. Forcada e P. N. Trathan, *Penguin responses to climate change in the Southern Ocean*, *Global Change Biology* **15**(7), 1618 (2009).
- [41] M. A. Cimino et al., *Projected asymmetric response of Adélie penguins to Antarctic climate change*, *Environmental Research Letters* **6**(1), 28785 (2016).
- [42] C. Barbraud e H. Weimerskirch, *Emperor penguins and climate change*, *Nature* **411**(6834), 183 (2001).
- [43] D. A. Pearce, *Climate Change and the Microbiology of the Antarctic Peninsula Region*, *Science Progress* **91**(2), 203 (2008).
- [44] B. Abirami et al., *Impacts of global warming on marine microbial communities*, *Science of The Total Environment* **791**, 147905 (2021).
- [45] A. Santos et al., *Measuring the effect of climate change in Antarctic microbial communities: toward novel experimental approaches*, *Current Opinion in Biotechnology* **81**, 102918 (2023).
- [46] A. Ferreira et al., *Climate change is associated with higher phytoplankton biomass and longer blooms in the West Antarctic Peninsula*, *Nature Communications* **15**(1), 6536 (2024).
- [47] M. Cataldo et al., *Aerobiology in High Latitudes: Evidence of Bacteria Acting as Tracer of Warm Air Mass Advection reaching Northern Antarctic Peninsula*, *Anais da Academia Brasileira de Ciencias* **95**(suppl 3), 388 (2023).
- [48] T. P. Roland et al., *Sustained greening of the Antarctic Peninsula observed from satellites*, *Nature Geoscience* **17**(11), 1121 (2024).

- [49] N. Cannone et al., *Acceleration of climate warming and plant dynamics in Antarctica*, [Current Biology](#) **32**(7), 1599 (2022).
- [50] E. Caminha, *Antártica - Terra de ninguém, futuro de todos*, in *Estação Comandante Ferraz: A casa do Brasil na Antártica*, editado por M. Mossmann (Lisbela Editora, Brasília, 2020), 15.
- [51] H. Evangelista et al., *Ideas and perspectives: Southwestern tropical Atlantic coral growth response to atmospheric circulation changes induced by ozone depletion in Antarctica*, [Biogeosciences](#) **13**(8), 2379 (2016).
- [52] M. M. Mata, V. M. Tavano e C. A. E. Garcia, *15 years sailing with the Brazilian High Latitude Oceanography Group (GOAL)*, [Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography](#) **149**(9), 1 (2018).
- [53] J. E. B. Souza, *Brasil na Antártica 25 Anos de História* (Vento Verde, 2008).
- [54] A. R. Viana et al., *Antarctic Science for Brazil: An action plan for the 2013-2022 period* (2023).
- [55] P. E. Câmara et al., *Brazil in Antarctica: 40 years of science*, [Antarctic Science](#) **33**(1), 30 (2021).
- [56] H. Evangelista et al., *The Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic barometric pressure pulse and meteotsunami travel recorded in several Antarctic stations*, [Anais da Academia Brasileira de Ciências](#) **96**(suppl 2), e20240556 (2024).
- [57] A. Bendia et al., *Patterns of air mass incursions from Southern Ocean play a role on microbial dispersions into West Antarctic Ice Sheet*, research Square.
- [58] J. Turner et al., *Antarctic Climate Change and the Environment* (SCAR & Scott Polar Research Institute, Cambridge, 2009).
- [59] S. J. Gonçalves et al., *Photochemical reactions on aerosols at West Antarctica: A molecular case-study of nitrate formation among sea salt aerosols*, [Science of The Total Environment](#) **758**, 143586 (2021).
- [60] D. Vaughan et al., *Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula*, [Climatic change](#) **60**, 243 (2003).
- [61] G. Krinner et al., *Studies of the Antarctic climate with a stretched-grid general circulation model*, [Journal of Geophysical Research: Atmospheres](#) **102**(D12), 13731 (1997).
- [62] S. Coburn, *Eyeing 2048: Antarctic Treaty System's Mining Ban*, [Columbia Journal of Environmental Law](#) **42**(2), 1 (2017).