

## XIII Workshop Brasileiro de Micrometeorologia

# A influência do aquecimento abrupto da estratosfera na precipitação do Brasil nos anos de 1988, 2002 e 2019

Influence of sudden stratospheric warming on Brazil's rainfall in the years 1988, 2002 and 2019

Denise da Silva Dalcol<sup>1</sup>, Nathalie Tissot Boiaski<sup>1</sup>, Damaris Kirsch Pinheiro<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil

## RESUMO

O aquecimento abrupto da estratosfera (SSW em inglês) é um evento comum no Hemisfério Norte, mas muito raro no Hemisfério Sul (HS), onde sua ocorrência foi registrada nos anos de 1988, 2002 e 2019 no continente Antártico. Tais eventos podem surgir quando ondas planetárias de grande amplitude se propagam da troposfera até a estratosfera, perturbando o vórtice polar e causando um aquecimento estratosférico em questão de dias. O enfraquecimento do vórtice polar impacta a circulação troposférica, forçando o Modo Anular Sul (ou Norte) a permanecer negativo por mais tempo e resultando em anomalias climáticas em todo o hemisfério. Durante os eventos de SSW na Antártica, foram registradas anomalias climáticas no HS. No leste da Austrália, durante o SSW de 2019, observaram-se condições mais quentes e secas, resultando em incêndios florestais. Este estudo analisou a variabilidade espaço-temporal da precipitação no Brasil durante os três eventos de SSW na Antártica em 1988, 2002 e 2019, utilizando dados de precipitação do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) de 1961 até 2020. Durante esses eventos de SSW na Antártica o Modo Anular Sul permaneceu negativo. Esse enfraquecimento do vórtice polar Antártico se reflete nos padrões anômalos nos mapas de precipitação, destacando uma potencial conexão entre os eventos de SSW e alterações climáticas no Brasil.

**Palavras-chave:** Aquecimento abrupto da estratosfera; Vórtice polar; Anomalias climáticas

## ABSTRACT

Sudden stratospheric warming (SSW) is a common event in the Northern Hemisphere but very rare in the Southern Hemisphere (SH), where its occurrence was documented in 1988, 2002, and 2019 on the Antarctic continent. Such events can arise when large amplitude planetary waves propagate from the troposphere to the stratosphere, disturbing the polar vortex and causing stratospheric warming within days. The weakening of the polar vortex impacts tropospheric circulation, forcing the Southern (or Northern) Annular Mode to remain negative for longer periods and resulting in climatic anomalies

across the hemisphere. During SSW events in Antarctica, climatic anomalies were recorded in the SH. In eastern Australia, during the 2019 SSW, hotter and drier conditions were observed, resulting in wildfires. This study analyzed the spatiotemporal variability of precipitation in Brazil during three SSW events in Antarctica in 1988, 2002, and 2019, using precipitation data from the Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) from 1961 to 2020. During these SSW events in Antarctica, the Southern Annular Mode remained negative. This weakening of the Antarctic polar vortex is reflected in anomalous patterns in precipitation maps, highlighting a potential connection between SSW events and climate changes in Brazil.

**Keywords:** Sudden stratospheric warming; Polar vortex; Climate anomalies

## 1 INTRODUÇÃO

Os eventos e fenômenos que ocorrem na estratosfera podem exercer influência direta no clima da superfície terrestre. Um estudo realizado por Lim *et al.* (2019) evidenciou uma correlação importante entre nove anos em que o vórtice polar estratosférico Antártico estava significativamente fraco e a ocorrência de condições de extremos climáticos na Austrália. No Hemisfério Sul (HS), o vórtice polar estratosférico tende a ser mais estável e forte durante o inverno, diminuindo a estabilidade e enfraquecendo durante a primavera e o verão (Langematz; Kunze, 2006). Porém, durante os anos de 1988, 2002 e 2019 o vórtice polar Antártico enfraqueceu consideravelmente mais cedo, entre julho e setembro. A causa desses incomuns enfraquecimentos está associada há raros eventos de aquecimento abrupto da estratosfera (SSW em inglês) na Antártica.

Os eventos de SSW podem surgir de ondas planetárias de grande amplitude que se formam na troposfera e propagam-se até a estratosfera, a perturbação dessas ondas pode provocar a diminuição da velocidade dos ventos de oeste do vórtice polar ou até mesmo o seu colapso. Quando isso ocorre, o ar é forçado a mover-se em direção aos pólos para conservar o momento angular, com descida sobre a calota polar. Por consequência disso, surge um aquecimento na estratosfera em escala de tempo de apenas alguns dias (Baldwin *et al.*, 2021). Desde 1979, o maior pico de temperatura, em 10 hPa, sobre a calota polar Antártica foi registrado durante o SSW de 2019, provocando desacelerações incomuns no vento zonal em 60°S (Chenming *et al.*, 2022). Em 1988 e

2002, a intensidade dos aquecimentos foram semelhantes e as temperaturas também ficaram acima da média climatológica em ambos os casos, mas somente em 2002 ocorreu a reversão dos ventos zonais (Roy *et al.*, 2022). Desse comportamento anômalo resultam variações na circulação troposférica. No final de outubro até dezembro de 2019, o enfraquecimento do vórtice polar estratosférico se acoplou fortemente à superfície, fazendo o Modo Anular Sul (SAM em inglês) permanecer negativo por mais tempo, essa persistência resultou em anomalias climáticas em todo o HS (Lim *et al.*, 2020). Os resultados apresentados por Lim *et al.* (2020) indicam que, no Brasil, a persistência de um SAM negativo resultou em anomalias de precipitação negativas na maior parte do Nordeste (NE) e positivas na maior parte das regiões Sudeste (SE) e Norte (N). Além disso, as regiões SE e NE também apresentaram anomalias de temperatura positivas, indicando que o período entre outubro e dezembro foi mais quente e seco no NE e quente e úmido no SE.

Nesse estudo, busca-se demonstrar a relação entre os raros eventos de SSW na Antártica e a variabilidade espaço-temporal da precipitação no Brasil durante parte do inverno e a primavera austral dos anos de 1988, 2002 e 2019. Nessa análise observacional utilizou-se dados de precipitação obtidos do Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) para investigar como esses eventos influenciaram as condições climáticas no Brasil. Esse artigo está dividido em quatro seções principais. Na seção 2, discute-se o SSW e seus impactos no clima. A seção 3 apresenta os dados utilizados no estudo e os resultados obtidos a partir da análise. Por fim, na seção 4, são discutidas as considerações finais.

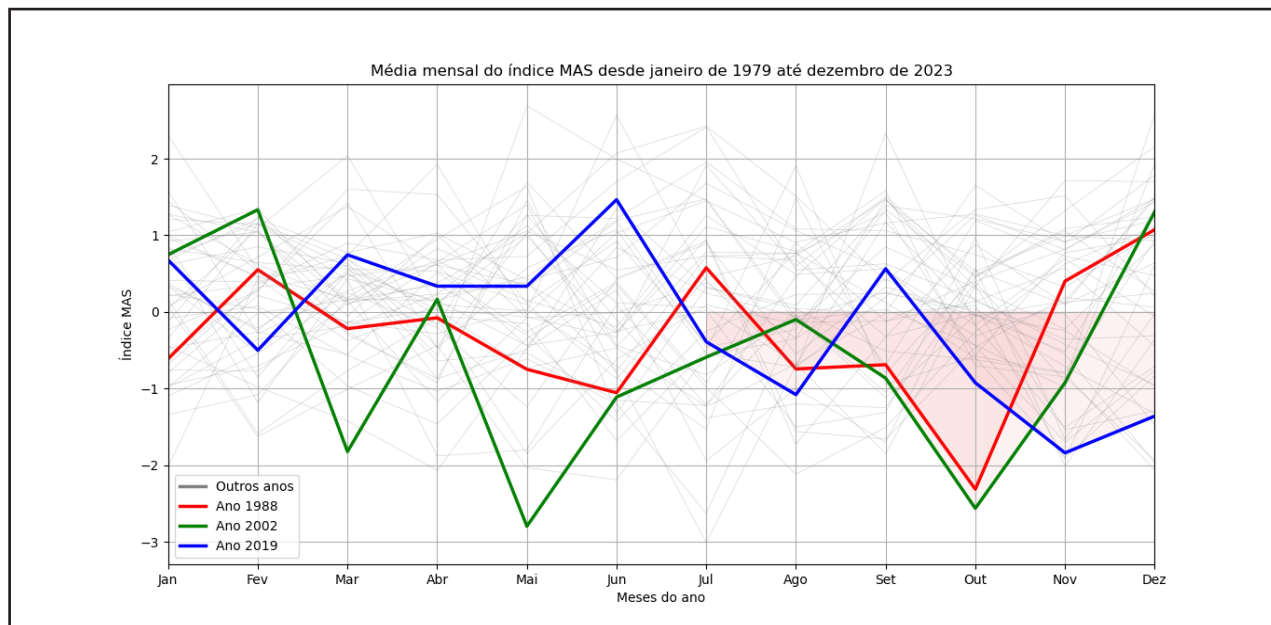
## **2 O SSW E SEUS IMPACTOS NO CLIMA**

O vórtice polar estratosférico do HS apresenta maior variabilidade na primavera, de meados de outubro a meados dezembro. O vórtice é forte com ventos de oeste durante o inverno austral no trimestre de junho, julho e agosto e é fraco ou com ventos de leste de fevereiro a março (Thompson; Wallace, 2000). O enfraquecimento

do vórtice polar Antártico durante a primavera resulta na polaridade negativa do índice do SAM. A persistência dessa fase negativa de outubro a janeiro em 9 anos nos quais o vórtice polar Antártico esteve mais fraco está relacionada à amplificação de condições climáticas extremas na Austrália (Lim, 2019). Essa relação entre o enfraquecimento do vórtice polar Antártico e a persistência do SAM negativo esteve presente durante os três eventos de SSW no Pólo Sul. A evolução vertical do SAM durante os SSWs na Antártica em 2002 e 2019 indicam diferenças no mecanismo de formação e propagação descendente. Em 2002, o SSW indicou uma resposta instantânea entre os níveis superiores e inferiores. Por outro lado, o SSW de 2019 apresentou um modo de propagação descendente distinto (MA, 2022). Em 2019, o acoplamento estratosfera e troposfera não foi instantâneo e com isso, os períodos que apresentam anomalias climáticas na superfície foram diferentes nesses dois eventos. A conexão com a troposfera também não foi instantânea para o SSW de 1988 (Shen, 2020).

O SSW de 2019 ocorreu no início de setembro no HS (Ma, 2022; Shen, 2020), mas a maior temperatura do ar polar em 10 hPa foi registrada após o seu início em 19 de setembro. Os SSWs de 1988 e 2002 apresentaram seus picos de temperatura em 28 e 29 de setembro, respectivamente (Shen, 2020). A figura 1 mostra que durante esses três eventos, que ocorreram no final do inverno e primavera, o índice SAM permaneceu negativo por mais de três meses, indicando o enfraquecimento do vórtice polar. O evento de 2002 apresenta a fase negativa do SAM para o inverno, período esse que antecede o SSW, indicando que o vórtice polar não estava tão intenso. Em 1988, a fase negativa surge em meados de julho e persiste até o final de outubro. E por fim, em 2019 a fase negativa do SAM aparece após o pico de temperatura do SSW. Nesse trabalho, analisaram-se as anomalias de precipitação no período do inverno, quando o vórtice polar Antártico apresenta maior variabilidade, e na primavera, durante a atuação dos três eventos de SSW, para identificar a influência desses eventos nos padrões climáticos da precipitação no Brasil.

Figura 1 – Média mensal do índice SAM



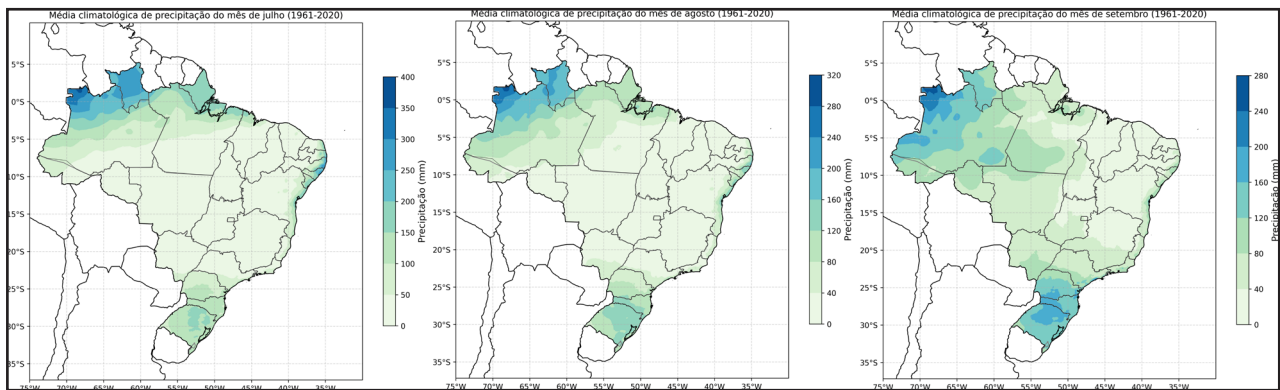
Fonte: Autoras (2024)

Fonte de dados: NOAA, 2024

### 3 DADOS E RESULTADOS

As anomalias mensais de precipitação para o Brasil, em milímetros (mm), foram obtidas utilizando o Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD) (Xavier *et al.*, 2022). O BR-DWGD é uma grade de dados meteorológicos que inclui dados diários de precipitação para o Brasil, resultantes de um total de 11.473 pluviômetros, com resolução espacial de 0,1° de longitude por 0,1° de latitude. O BR-DWGD é proveniente de uma correção dos dados observacionais por interpolação de estações da Agência Nacional das Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O cálculo da média climatológica mensal foi realizado para o período de 1° de janeiro de 1961 até 13 de julho de 2020, totalizando 59 anos de dados observacionais de precipitação. As anomalias mensais de precipitação foram obtidas para os meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro nos anos de 1988, 2002 e 2019.

Figura 2 – Médias climatológicas mensais (1961-2020) de precipitação do Brasil



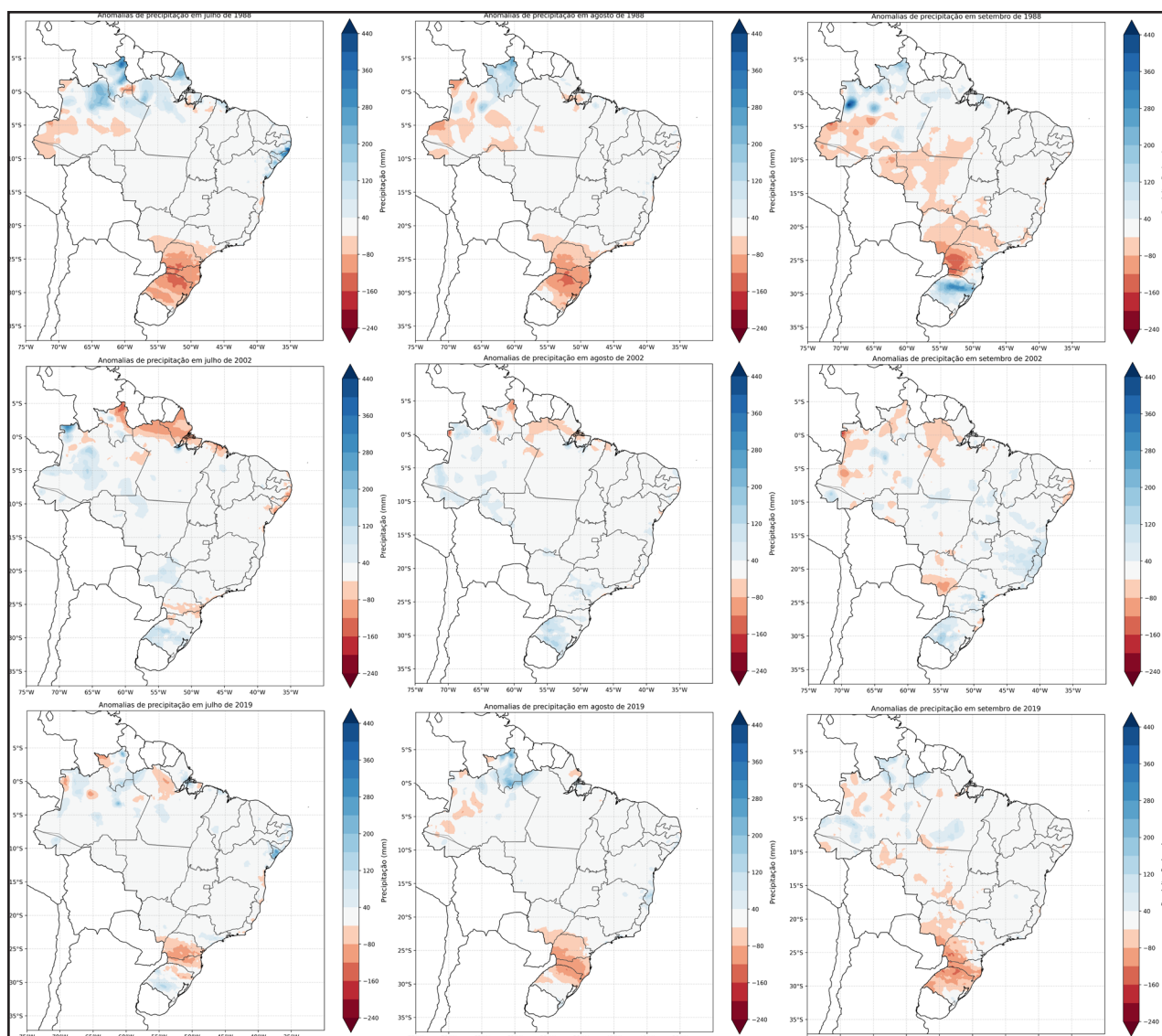
Fonte: Autoras (2024)

Fonte de dados: BR-DWGD

Legenda: Médias climatológicas mensais (1961-2020) de precipitação no Brasil de (a) julho, (b) agosto e (c) setembro

Para avaliar as variações na precipitação, primeiramente, calculou-se a média climatológica mensal da precipitação diária para o período de referência de 1° de janeiro de 1961 até 31 de julho de 2020. Essa média foi determinada para cada mês do ano, resultando em uma série temporal de médias mensais de precipitação. As anomalias de precipitação foram obtidas subtraindo-se a precipitação mensal observada da média climatológica mensal para cada mês do período de estudo. Esse cálculo permitiu identificar e quantificar desvios na precipitação em relação ao comportamento climatológico médio esperado, fornecendo uma base para a análise das variações temporais e espaciais da precipitação no Brasil no período de interesse.

Figura 3 – Anomalias de precipitação do Brasil durante os invernos de 1988, 2002 e 2019



Fonte: Autoras (2024)

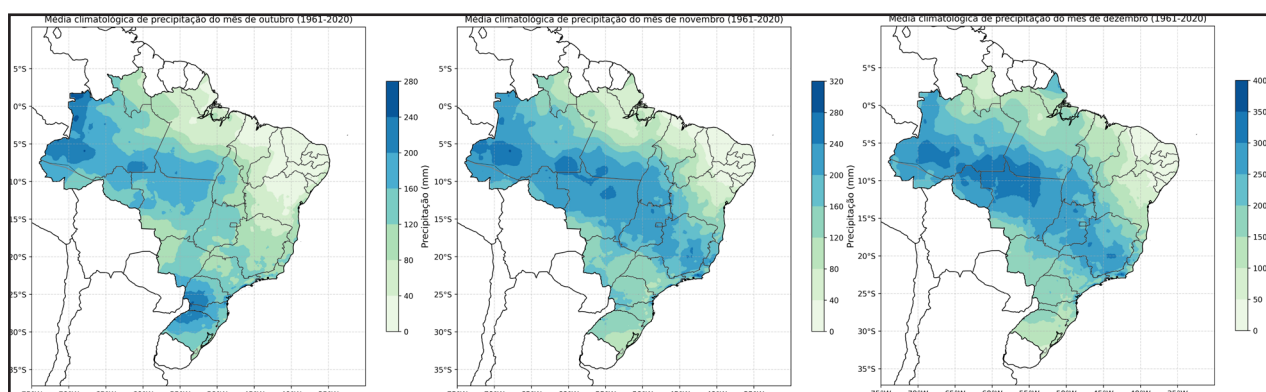
Fonte de dados: BR-DWGD

Legenda: Anomalias de precipitação no Brasil nos meses de inverno durante os eventos de SSW no período de (a) julho, (b) agosto e (c) setembro de 1988, (d) julho, (e) agosto e (f) setembro de 2002 e (g) julho, (h) agosto e (i) setembro de 2019

As figuras 2 e 3 apresentam as médias climatológicas e as anomalias de precipitação no Brasil durante o inverno austral nos anos de 1988, 2002 e 2019 em que foram registrados SSW na Antártica. No mês de julho de 1988 pode-se observar que as regiões Sul (S), parte do Sudeste (SE) e parte do Centro-Oeste (CO) apresentaram

anomalias negativas de precipitação, enquanto que parte do Nordeste (NE) e extremo Norte (N) apresentaram anomalias positivas de precipitação. No mês de julho de 2002 parte da região S apresentou anomalias positivas e no extremo N anomalias negativas de precipitação. Em agosto de 1988, ocorreram anomalias positivas no extremo N e anomalias negativas no S e parte do CO. Já em 2019, parte da região S e CO apresentaram anomalias positivas de precipitação durante o inverno.

Figura 4 – Médias climatológicas mensais (1961-2020) de precipitação do Brasil



Fonte: Autoras (2024)

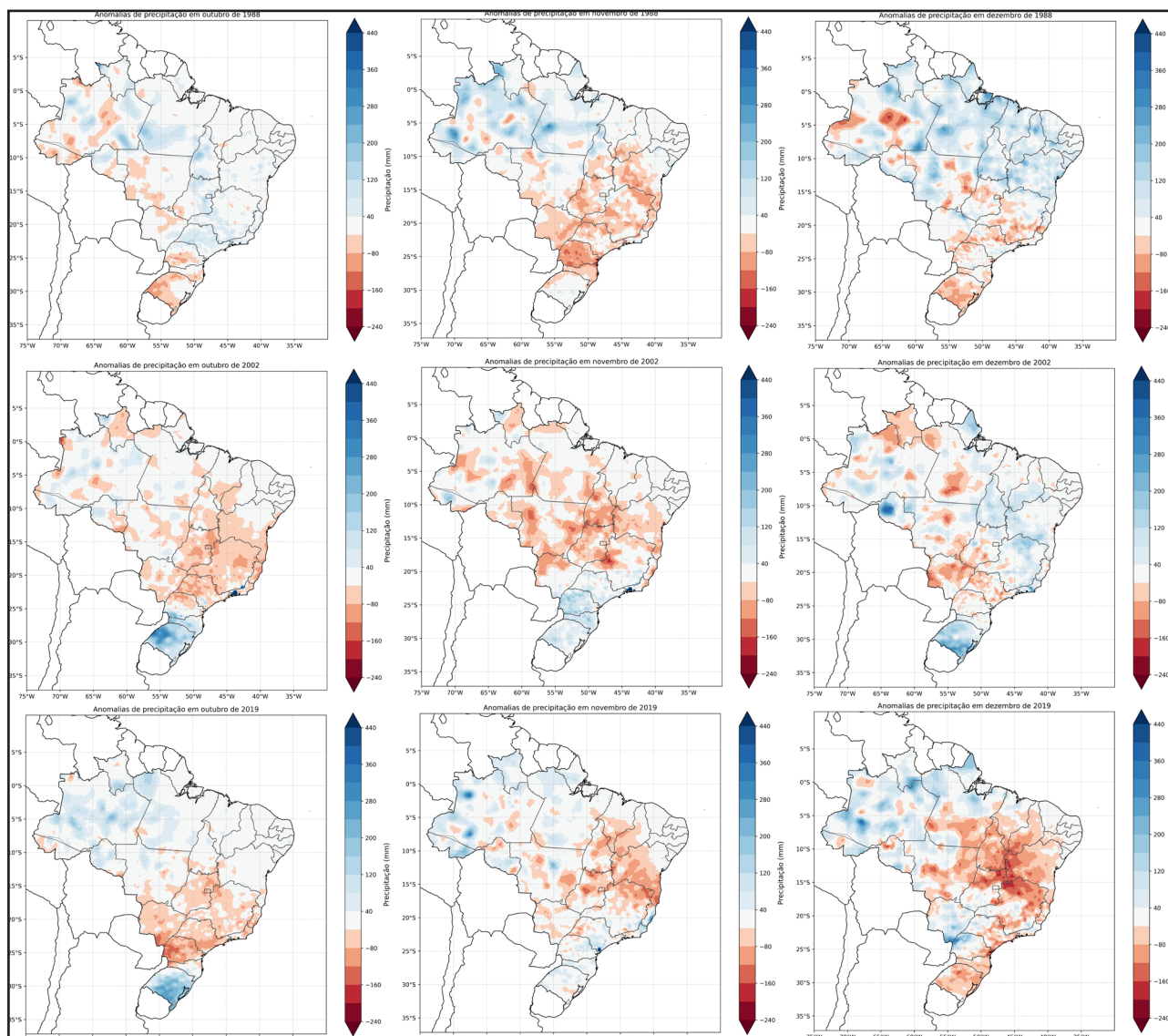
Fonte de dados: BR-DWGD

Legenda: Médias climatológicas mensais (1961-2020) de (a) outubro, (e) novembro e (i) dezembro

Na figura 4, as médias climatológicas apresentam o desenvolvimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) durante a primavera austral. Com isso, é esperado um aumento da precipitação nas regiões N, CO e SE no decorrer do trimestre de outubro, novembro e dezembro. Contudo, no mês de novembro dos três anos analisados, essas regiões apresentam anomalias negativas de precipitação e podem indicar um sistema climático menos propenso ao desenvolvimento da ZCAS. Em dezembro de 1988, observa-se anomalias positivas de precipitação no NE, enquanto que em dezembro de 2002, essa condição foi observada no extremo S. Em contrapartida, em 2019, as anomalias positivas ocorreram na região N. Embora, 1988 e 2019 sejam eventos de SSW menores, as anomalias de precipitação ainda são visíveis, com padrões de precipitação significativamente alterados.



Figura 5 – Anomalias de precipitação do Brasil durante as primaveras de 1988, 2002 e 2019



Fonte: Autoras (2024)

Fonte de dados: BR-DWGD

Legenda: Anomalias de precipitação no Brasil nos meses de primavera durante os eventos de SSW no período de (a) outubro, (b) novembro e (c) dezembro de 1988, (d) outubro, (e) novembro e (f) dezembro de 2002 e (g) outubro, (h) novembro e (i) dezembro de 2019

A relação entre os eventos de SSW e as anomalias de precipitação no Brasil é evidenciada pela presença de padrões anômalo nos mapas de 1988, 2002 e 2019. Os eventos de SSW na Antártica enfraqueceram o vórtice polar, mantendo o SAM negativo durante os períodos analisados. Essa condição resulta em alterações nos

padrões climáticos, como observado nas anomalias de precipitação das figuras 3 e 5. Assim como apresentado por Lim *et al.*, 2020, parte do NE apresentou anomalias de precipitação negativas durante a primavera de 2019.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, foi analisada a variabilidade espaço-temporal da precipitação durante o inverno e primavera austral nos anos de 1988, 2002 e 2019 em que foram registrados eventos de SSW na Antártica. Os padrões de variabilidade climática fornecem base para entender os impactos de eventos climáticos extremos no Brasil durante o período de interesse. Os padrões sazonais específicos identificados nesse estudo, estão associados aos eventos de SSW na Antártica e por consequência também podem estar correlacionados com a persistência de uma fase negativa do SAM forçada por esses eventos. Os resultados obtidos indicam que esses eventos, embora raros no HS, podem ter impactos climáticos substanciais que se manifestam nas regiões do Brasil. Estudos futuros serão direcionados para investigar as anomalias de temperatura máxima e mínima no Brasil durante o mesmo período, aprofundando ainda mais o entendimento sobre a influência do SSW nos padrões climáticos regionais.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado como apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código do financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

BALDWIN, M. P. et al. Sudden stratospheric warmings. **Reviews of Geophysics**, v. 59, n. 1, p. e2020RG000708, nov. 2021.

LANGEMATZ, U.; KUNZE, M. An update on dynamical changes in the Arctic and Antarctic stratospheric polar vortices. **Climate Dynamics**, v. 27, p. 647-660, jun. 2006.

LIM, E. P. et al. Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex. **Nature Geoscience**, v. 12, n. 11, p. 896-901, oct. 2019.

LIM, E. P. et al. The 2019 Antarctic sudden stratospheric warming. **SPARC Newsletter**, v. 54, p. 10-13, jan. 2020.

MA, C. et al. Possible causes of the occurrence of a rare Antarctic sudden stratospheric warming in 2019. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, p. 147, jan. 2022.

NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Southern Oscillation Index (SOI) Data. Disponível em: [https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily\\_ao\\_index/aao/aao.shtml](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/aao/aao.shtml). Acesso em: 14 jun. 2024.

ROY, R. et al. The sudden stratospheric warming and chemical ozone loss in the Antarctic winter 2019: comparison with the winters of 1988 and 2002. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, n. 1, p. 119-130, apr. 2022.

SHEN, X.; WANG, L.; OSPREY, S. The Southern Hemisphere sudden stratospheric warming of September 2019. **Science Bulletin**, v. 65, n. 21, p. 1800-1802, jun. 2020.

THOMPSON, D. W. J.; WALLACE, J. M. Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. **Journal of Climate**, v. 13, n. 5, p.1000–1016, mar. 2000.

XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, may. 2022.

## Contribuições de Autoria

### 1 – Denise da Silva Dalcol

Licenciada em Física e Mestre em Física

<https://orcid.org/0009-0000-8321-5661> • [denidalcol@gmail.com](mailto:denidalcol@gmail.com)

Contribuição: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do Projeto, Software, Validação, Visualização de Dados, Escrita – Primeira Redação

### 2 – Nathalie Tissot Boiaski

Meteorologista, Mestre e Doutora em Meteorologia

<https://orcid.org/0000-0003-3929-4299> • [nathalie.boiaski@ufsm.br](mailto:nathalie.boiaski@ufsm.br)

Contribuição: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Recursos, Supervisão, Software, Administração do Projeto, Escrita – Revisão & Edição

### 3 – Damaris Kirsch Pinheiro

Engenheira Química, Mestre em Engenharia Química e Doutora em Geofísica Espacial

<https://orcid.org/0000-0001-6939-7091> • [damaris@ufsm.com](mailto:damaris@ufsm.com)

Contribuição: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Recursos, Supervisão, Software, Administração do Projeto, Escrita – Revisão & Edição

## Como citar este artigo

DALCOL, D. da S.; BOIASKI, N. T.; PINHEIRO, D. K. A influência do aquecimento abrupto da estratosfera na precipitação do Brasil nos anos de 1988, 2002 e 2019. **Ciência e Natura**, v. 46, esp. 2, e87951, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X87951>.