



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Aquecimento Súbito da Estratosfera (SSW): Uma Revisão das Dinâmicas Atmosféricas e Impactos Climáticos

Larissa Corrêa Santos¹ e André Becker Nunes²

¹ Doutoranda em Recursos Hídricos, Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, CEP 96010-610, larissacsantos01@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-4525-0911> (autor correspondente);

² Dr. em Meteorologia, Professor Associado, Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - RS, CEP: 96010-610, beckernunes@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-4881-5810>.

Artigo recebido em 02/01/2025 e aceito em 28/03/2025.

RESUMO

O fenômeno do Aquecimento Súbito da Estratosfera (SSW) tem se tornado mais frequente ao longo dos anos, porém há poucos estudos dedicados à sua investigação, destacando sua complexidade e impacto nas dinâmicas atmosféricas. Nesta pesquisa, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o SSW, com o objetivo de investigar os principais fatores desencadeantes e as metodologias utilizadas, observando a interação de dinâmicas, como ondas planetárias, ondas de gravidade e ondas de Rossby, que influenciam o vórtice polar estratosférico e a circulação atmosférica. A metodologia se constituiu em um levantamento bibliográfico nas principais plataformas "Scopus" e "Web of Science". Nos estudos analisados, verificou-se a aplicação de metodologias para identificar eventos de SSW, envolvendo análise de dados observacionais e modelagem numérica, com critérios baseados em variações de temperatura, vento e pressão estratosférica. O enfraquecimento do vórtice polar estratosférico é um indicador-chave do SSW, caracterizado por mudanças no vento zonal e padrões de circulação anômalos. A compreensão desses eventos é essencial para prever e compreender os impactos do SSW no clima global. O estudo destaca a evolução da pesquisa sobre o SSW, com um aumento significativo no número de publicações científicas, refletindo avanços tecnológicos e metodológicos. A análise dos padrões meteorológicos desencadeantes do SSW e a investigação de suas causas e efeitos são fundamentais para entender as mudanças climáticas e a interação entre estratosfera e troposfera. Por fim, este estudo espera contribuir com uma base sólida para futuras pesquisas sobre o SSW, visando minimizar os desafios e aprimorar o conhecimento sobre esse fenômeno atmosférico complexo.

Palavras-chave: Dinâmicas Atmosféricas. Vórtice Polar Estratosférico. Anomalia de Temperatura Estratosférica.

Sudden Stratospheric Warming (SSW): A Review of Atmospheric Dynamics and Climatic Impacts

ABSTRACT

The phenomenon of Sudden Stratospheric Warming (SSW) has become more frequent over the years, but there are few studies dedicated to its investigation, highlighting its complexity and impact on atmospheric dynamics. This research conducted a literature review on the SSW was conducted with the aim of investigating the main triggering factors and the methodologies used, observing the interaction of dynamics such as planetary waves, gravity waves, and Rossby waves, that influence the stratospheric polar vortex and atmospheric circulation. The methodology involved conducting a bibliographic survey on the main platforms "Scopus" and "Web of Science". The analyzed studies demonstrated the application of methodologies to identify SSW events. This involved analyzing observational data and numerical modeling, using criteria based on variations in temperature, wind, and stratospheric pressure. The weakening of the stratospheric polar vortex is a key indicator of SSW, characterized by changes in zonal wind and anomalous circulation patterns. Understanding these events is essential to predict and conceive the impacts of SSW on global climate. The study highlights the evolution of research on SSW, noting a significant increase in the number of scientific publications, which reflect technological and methodological advances. The analysis of the meteorological patterns triggering SSW and the investigation of its causes and effects are fundamental to understanding climate change and the interaction between the stratosphere and the troposphere. Finally, this study hopes to contribute a solid foundation for future research on SSW, aiming to minimize existing challenges and enhance knowledge about this complex atmospheric phenomenon.

Keywords: Atmospheric Dynamics. Stratospheric Polar Vortex. Stratospheric Temperature Anomaly.

Introdução

A área da meteorologia tem testemunhado crescente atenção nos últimos anos em relação a análise de condições climáticas anômalas devido à ocorrência do aquecimento súbito da estratosfera (*Sudden Stratospheric Warming* – SSW) (Baldwin et al., 2021; Fujiwara et al., 2022; Tian et al., 2023). O fenômeno cuja origem ainda está em investigação, tem impactado de forma significativa os mecanismos da atmosfera e do clima da Terra, com alterações na distribuição de temperatura, precipitação e pressão atmosférica, conforme os estudos realizados por Eswaraiah et al. (2017), Pedatella et al. (2018), Kozubek et al. (2020) e Li et al. (2023). No entanto, apesar dos avanços dos estudos desta temática, persistem lacunas significativas no nosso entendimento sobre o aquecimento súbito da estratosfera, suas principais causas e efeitos sobre o clima (Krüger et al., 2005; Kozubek et al., 2020; Eswaraiah et al., 2022).

O aquecimento súbito da estratosfera (SSW) é um fenômeno meteorológico caracterizado por um rápido aumento nas temperaturas na estratosfera (Baldwin et al., 2021), à 10-50 quilômetros acima da superfície terrestre, especialmente durante o inverno (Tripathi et al., 2015). Este evento apresenta impactos profundos nos padrões climáticos, como a perturbação do vórtice polar, levando a mudanças na distribuição de sistemas de alta e baixa pressão (Lu e Ding, 2013; Lehtonen e Karpechko, 2016; Edvartsen et al., 2023). Essas alterações na dinâmica atmosférica frequentemente resultam em períodos prolongados de condições climáticas incomuns, incluindo eventos de frio extremo (Zhang et al., 2022a; Zhang et al., 2022b; Liu et al., 2023), ondas de calor (Kodera et al., 2016; Yoon et al., 2020; Lu et al., 2021) e padrões alterados de precipitação (Marsh et al., 2013; Park e Nam, 2018; King et al., 2019; Furtado et al., 2021).

Apesar dos desafios existentes nas análises estratosféricas e sua influência no clima da Terra, devido à deficiência de modelos climáticos e da complexidade das interações entre estratosfera-troposfera (Tian et al., 2023), destaca-se a importância de compreender o SSW, a qual reside em seu potencial para influenciar a variabilidade climática e a ocorrência de eventos climáticos extremos (Finkel et al., 2023).

Sendo assim, a partir de uma revisão da literatura, será possível obter *insights* desse fenômeno e entender como os estudos que abordam essa temática estão sendo desenvolvidos para uma investigação eficaz, com possível auxílio na previsão de curto e longo prazo, a partir de modelos que representem as perturbações estratosféricas futuras e na previsibilidade de sua

propagação para a troposfera em escalas de tempo sazonal e subsazonal (Thompson et al., 2005; Tian et al., 2023).

O RStudio é uma ferramenta que vem sendo amplamente aplicada em estudos de revisão literária, devido à sua facilidade de acesso e tratamento de dados, em diferentes áreas do conhecimento, conforme estudos realizados por Sam et al. (2023) na análise de mudanças climáticas de Uyo na Nigéria; Juarez et al. (2022) na identificação da relação entre a qualidade do ar, condições meteorológicas, mudanças climáticas, e a disseminação da COVID-19; Castillero e Paton (2022) na análise das alterações climáticas no Panamá; Slater et al. (2019) na exploração os benefícios e vantagens do uso do R em hidrologia; Wu et al. (2024) na investigação do papel dos microrganismos do solo na ciclagem do carbono do solo e; Wu et al. (2022) na investigação de poluição por metais pesados do solo; dentre outros.

Este artigo de revisão tem como objetivo investigar os possíveis fenômenos desencadeadores das anomalias de temperatura na estratosfera, a partir de um mapeamento da bibliografia disponível na literatura sobre o tema de aquecimento súbito/repentino da estratosfera, para analisar suas tendências e respectivos padrões de comportamento, assim como a identificação dos seus impactos na circulação atmosférica e nas condições climáticas regionais e globais.

Metodologia

A abordagem metodológica deste estudo envolve um levantamento de artigos científicos nas principais plataformas de base de dados, Scopus e Web of Science, do portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), referentes a estudos sobre o aquecimento súbito da estratosfera, com a finalidade de construir uma revisão literária fundamentada. Para isso, foi utilizado o RStudio como ferramenta de auxílio, um ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment* - IDE) para a linguagem de programação do software estatístico R (Allarie, 2024), juntamente com o pacote Bibliometrix, utilizado neste estudo para a obtenção e importação dos dados bibliográficos, realização da análise descritiva dos artigos científicos, incluindo a produção científica anual sobre SSW, a taxa anual de crescimento das produções científicas nesta área, os principais manuscritos e suas citações, a média total de citações por país e as fontes mais relevantes, conforme apresentado no fluxograma esquemático (Figura 1).

A estrutura deste artigo, quanto aos resultados, é organizada da seguinte forma: Estado da arte do aquecimento súbito da estratosfera, nesta seção é apresentada uma visão geral do estado atual do conhecimento sobre o aquecimento súbito na Estratosfera, e informações gerais dos artigos obtidos e respectivos periódicos científicos; Entendendo os fatores desencadeantes do aquecimento súbito da estratosfera, nesta seção analisamos os padrões meteorológicos desencadeantes do SSW, se existentes;

Metodologias da investigação do aquecimento súbito da estratosfera, nesta seção discutimos sobre as principais metodologias utilizadas na investigação do SSW para nortear pesquisas desta temática de forma eficaz e confiável e, finalmente, nas conclusões é apresentado um resumo dos principais pontos abordados nesta pesquisa, fornecendo uma síntese do estado atual do aquecimento súbito na estratosfera e recomendações para trabalhos a serem desenvolvidos.

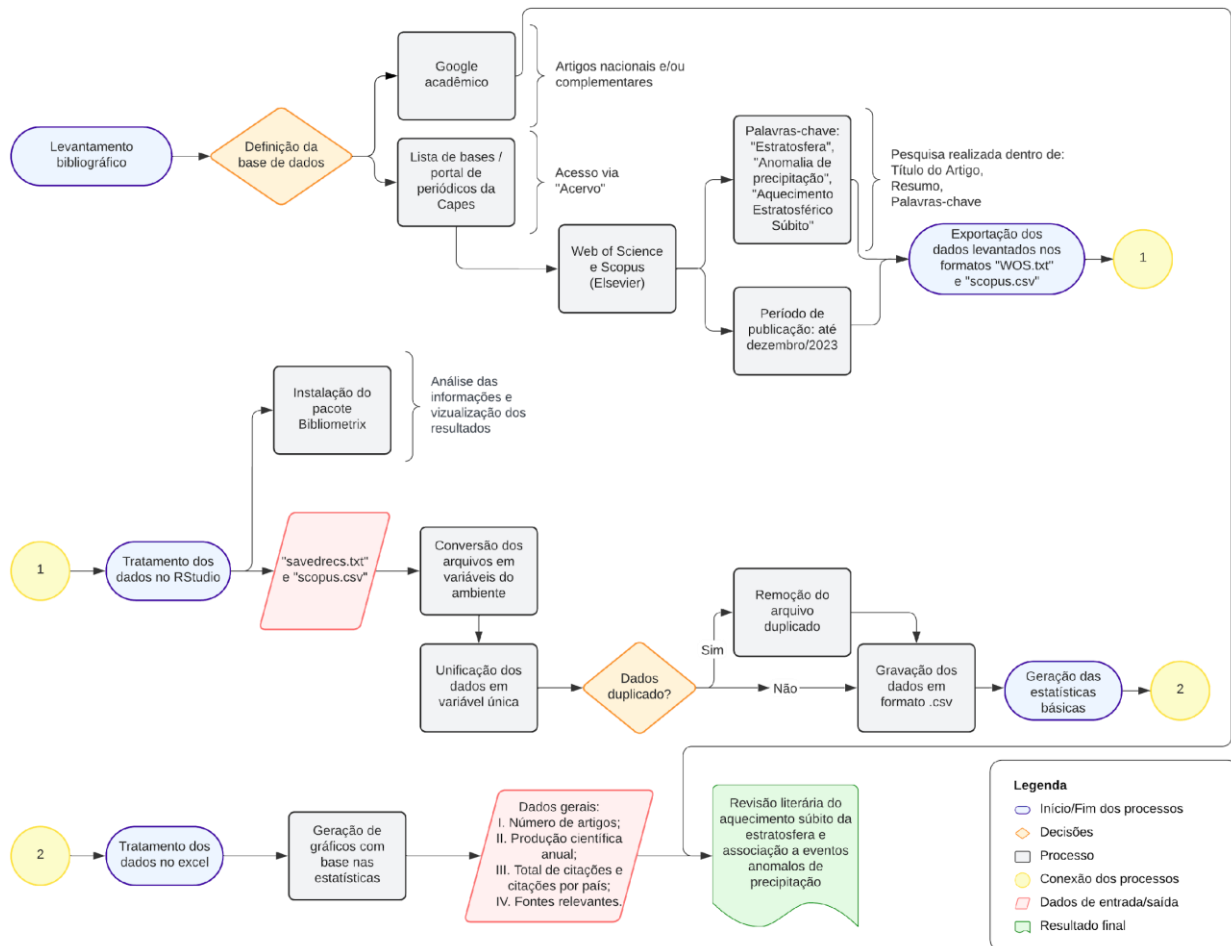


Figura 1: Fluxo da execução metodológica.

Resultados e Discussão

Estado da arte do aquecimento súbito da estratosfera

De acordo com Limpasuvan et al. (2016) o aquecimento súbito da estratosfera é um fenômeno, como já mencionado, caracterizado por um aumento da temperatura na estratosfera de forma abrupta, e este fenômeno pode desencadear diversos efeitos dinâmicos na atmosfera associados a perturbações na circulação atmosférica, como a reversão dos ventos e a propagação de ondas atmosféricas. Deste modo, a compreensão das suas causas e efeitos é fundamental para compreensão do clima global.

Segundo os resultados obtidos pela busca nos periódicos da CAPES, Scopus e Web Of Science, foram encontrados um total de dezoito artigos (Tabela 1) de pesquisas desenvolvidas sobre o aquecimento súbito da estratosfera no mundo. Observou-se que os estudos sobre o fenômeno tiveram início nos anos 1990 e mantiveram sequência até a atualidade, com uma considerável tendência de crescimento ao longo dos anos.

Ao longo da última década (2014-2023), temos testemunhado um avanço na produção anual de artigos científicos relacionados a eventos SSW, refletindo a tendência de crescimento, mas com desafios e complexidade na análise das condições climáticas na estratosfera e suas interações e

influências para com a troposfera.

Esse progresso é evidenciado pelo aumento exponencial no número de publicações ao ano (Figura 2), com destaque aos anos de 2018, 2020, 2021 e 2022, impulsionados por avanços tecnológicos para a investigação das condições atmosféricas e principalmente modelos climáticos e meteorológicos que permitem a simulação de cenário com diferentes condições meteorológicas, especialmente da atmosfera superior, que viabilizam e dão subsídio a previsões futuras.

Apesar dos avanços em termos globais de tecnologia, comunicação e acesso à informação de diferentes estudos, realizados por diversos pesquisadores do mundo, a dinâmica da atmosfera, com ênfase da estratosfera, são complexas, o que, de certo modo, explica a escassez de pesquisas desenvolvidas e/ou relacionados à esta temática.

Além disso, conforme as informações apresentadas é possível verificar as fontes mais relevantes de estudos sobre o SSW, com base no número de artigos por fonte, representados visualmente pela Figura 3. Destacam-se as cinco revistas científicas, listadas em ordem de citação: Journal of Climate, Atmospheric Chemistry and Physics, Geophysical Research Letters, Journal of Geophysical Research-Atmospheres e Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, com três artigos publicados na primeira revista, um artigo publicado na segunda revista e dois artigos nas demais.

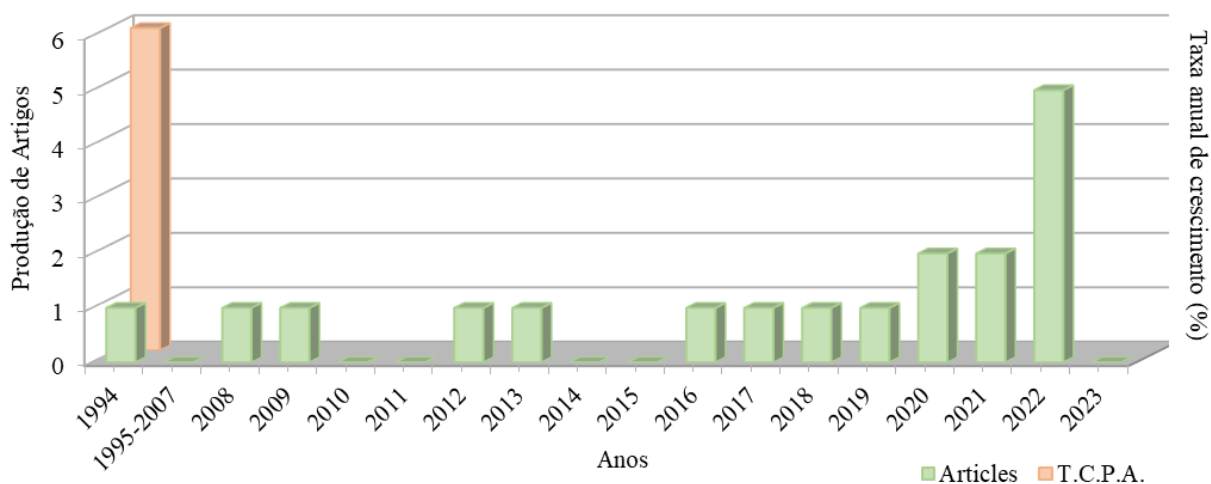
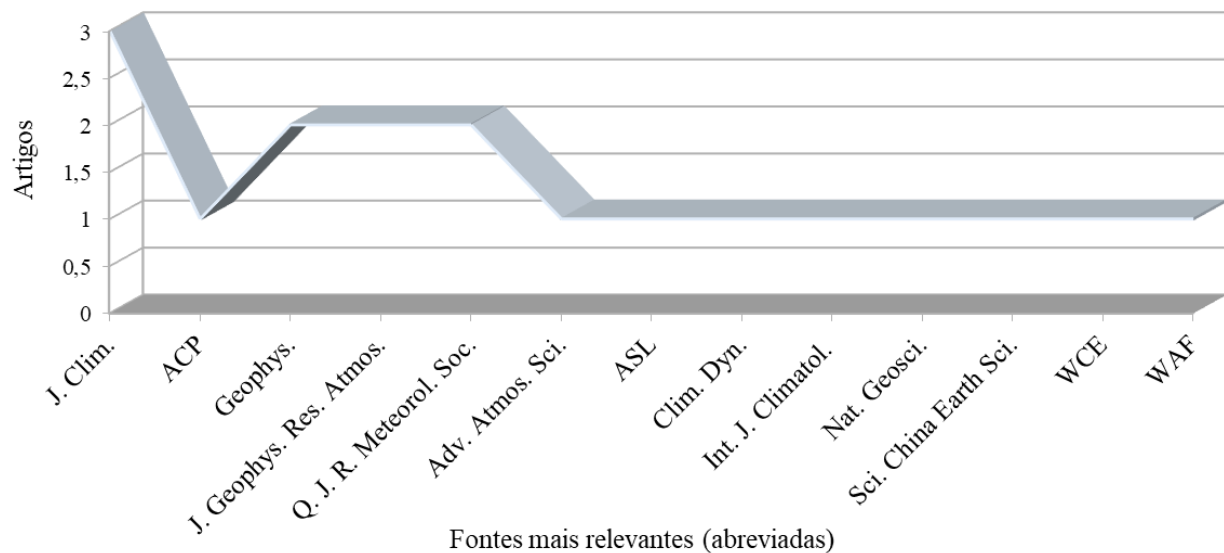


Figura 2: Produção científica anual e Taxa de crescimento percentual anual (T.C.P.A.).



Fontes mais relevantes (abreviadas)

Figura 3: Fontes mais relevantes a partir do fator de impacto.

Tabela 1: Informações gerais dos artigos científicos levantados pelas plataformas Scopus e Web of Science sobre Aquecimento Súbito da Estratosfera.

Autores	Ano de Publicação	Revistas Científicas	DOI
Mahfouf et al.	1994	Climate Dynamics	10.1007/BF00223447
Lu et al.	2008	Journal of Geophysical Research Atmospheres	10.1029/2007JD008915
Cagnazzo e Manzini	2009	Journal of Climate	10.1175/2008JCLI2549.1
Li et al.	2012	Science China Earth Sciences	10.1007/s11430-011-4329-4
Sigmond et al.	2013	Nature Geoscience	10.1038/ngeo1698
Limpasuvan et al.	2016	Journal of Geophysical Research-Atmospheres	10.1002/2015JD024401
Kodera et al.	2017	Atmospheric Chemistry And Physics	10.5194/acp-17-615-2017
Ayarzagüena et al.	2018	Geophysical Research Letters	10.1029/2018GL079802
Oehrlein et al.	2019	Atmospheric Science Letters	10.1002/asl.923
Kolstad et al.	2020	Journal of Climate	10.1175/JCLI-D-20-0270.1
Büeler et al.	2020	Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society	10.1002/qj.3866
Gomes et al.	2021	Weather and Climate Extremes	10.1016/j.wace.2021.100404
Bell et al.	2021	Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society	10.1002/qj.4174
Monnin et al.	2022	International Journal of Climatology	10.1002/joc.7426
Shen et al.	2022	Journal of Climate	10.1175/JCLI-D-21-0500.1
Lee et al.	2022	Geophysical Research Letters	10.1029/2022GL100381
Winters e Attard	2022	Weather and Forecasting	10.1175/WAF-D-21-0203.1
Yu et al.	2022	Advances In Atmospheric Sciences	10.1007/s00376-021-1289-2

*Em que: DOI - identificador de artigo digital; et al. - e outros autores.

Na Tabela a seguir, exploraram-se as diferentes métricas de avaliação e a visibilidade das revistas científicas relevantes. São

apresentados o número de artigos publicados em cada periódico científico, sua classificação de Qualis pela CAPES (Plataforma Sucupira, válidas

para o quadriênio 2017-2020), bem como as métricas do fator de impacto pela Clarivate e CiteScore.

A classificação e visibilidade das revistas científicas desempenham um papel crucial no meio acadêmico, influenciando a disseminação e o reconhecimento dos estudos científicos. A avaliação desses fatores é fundamental para pesquisadores, editores e instituições de ensino, pois impacta diretamente na reputação, na atratividade e na credibilidade das publicações.

Os periódicos científicos estão listados conforme a ordem de número de artigos publicados.

No que se refere à avaliação dos periódicos científicos utilizados, a maioria está classificado como Qualis A1, sendo esta a melhor classificação, seguindo de dois periódicos com

classificação de A2, dois periódicos com classificação A4 e um periódico como B1. Os três periódicos com a classificação mais elevada, com Qualis A1 e A2, e com fator de impacto superior a seis pela Clarivate e superior a dez pela CiteScore, sendo esta métrica referente ao número médio expressivo de citações em um biênio, ou seja, avaliação do impacto e visibilidade das revistas e periódicos científicos (Almeida e Gracio, 2019), são: Nature Geoscience, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society e Atmospheric Chemistry and Physics, respectivamente. Destaca-se que nenhum periódico apresentou fator de impacto abaixo de um, indicando que os periódicos em questão estão sendo citados em outros artigos, ou seja, reconhecidos e que seus conteúdos são considerados relevantes na área científica.

Tabela 2: Informações sobre classificação e visibilidade de periódicos científicos relevantes.

Fontes mais relevantes	Qualis	Fator de Impacto
Revista Científica	Nº de Artigos	Sucupira Clarivate CiteScore
Journal of Climate	3	A1 4,9 8,7
Atmospheric Chemistry And Physics	1	A1 6,7 11,5
Geophysical Research Letters	2	A1 5,2 8,9
Journal of Geophysical Research Atmospheres	2	A1 4,4 8,1
Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society	2	A2 8,9 12,1
Advances In Atmospheric Sciences	1	A4 5,8 7,3
Atmospheric Science Letters	1	A4 3 5,3
Climate Dynamics	1	A1 4,6 10,3
International Journal Of Climatology	1	A1 3,9 6,7
Nature Geoscience	1	A1 19,6 32,5
Science China Earth Sciences	1	B1 5,7 9,9
Weather and Climate Extremes	1	A1 8 9,2
Weather and Forecasting	1	A2 2,9 5,4

*Em que: N° - número.

A fim de identificar a visibilidade dos artigos científicos levantados, foi analisada a citação dos artigos por país e os principais manuscritos por citação. Na Tabela 3 é apresentado o total de citações por país.

Tabela 3: Citações totais por país.

País	Média de Citações Totais	Citações de artigos
EUA	89	29,7
China	16	16,0
Brasil	12	12,0
Japão	3	3,0

*Em que: EUA - Estados Unidos da América.

Perante o exposto, identificou-se o número total de citações recebidas por artigo científico produzido em cada um dos quatro países, com destaque para os EUA, seguido da China, Brasil e Japão, respectivamente. O EUA é apontado como o país com maior média de citação de artigos científicos (oitenta e nove), com uma citação média de vinte e nove vírgula sete por artigo, possivelmente ao seu alto potencial de investimento na pesquisa científica, assim como pela sua liderança nas mudanças climáticas apontado no estudo de Parker e Karlsson (2018). Além disso, esses resultados sugerem que os artigos altamente referenciados nos EUA possuem impacto significativo, evidenciando uma forte

liderança na pesquisa sobre o aquecimento súbito da estratosfera. A China mostra-se como um importante contribuinte, seguindo pelo Brasil, que apresenta uma boa quantidade de citações de artigos, porém em uma proporção mais modesta.

Por fim, foram identificados diversos manuscritos de destaque, evidenciados pela quantidade significativa de citações, conforme indicado na Figura 4, o que ressalta sua importância e impacto no campo de estudo em análise. Estes manuscritos representam contribuições fundamentais para o avanço do conhecimento sobre o fenômeno do aquecimento súbito da estratosfera, sendo frequentemente referenciados e reconhecidos como fontes relevantes. A análise das citações desses

manuscritos oferece informações valiosas sobre as tendências, os debates e os pontos cruciais de interesse sobre os eventos de SSW, os quais serão discutidos nas próximas seções, proporcionando uma base sólida para a compreensão do panorama atual e das lacunas a serem preenchidas na pesquisa.

Nas seções seguintes são abordadas as principais metodologias para a investigação e análise dos eventos de SSW e os principais fatores, se existentes, que estimulam a sua ocorrência. Sendo assim, este estudo servirá como base para futuros estudos, com o intuito de minimizar os desafios já preestabelecidos sobre o aquecimento súbito da estratosfera, que até o momento, ainda é pouco investigado.

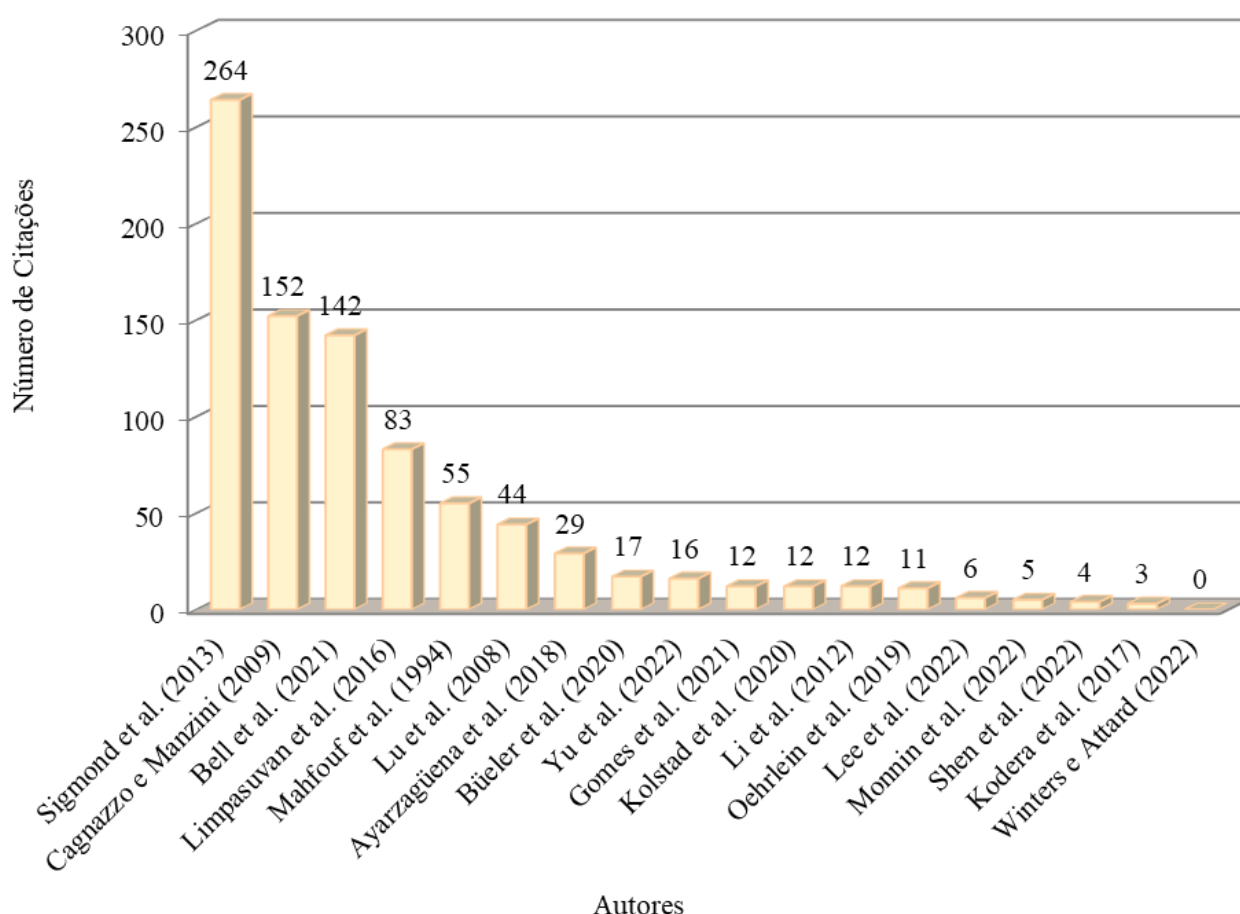


Figura 4 – Principais manuscritos, por citações.

Entendendo os fatores desencadeantes do aquecimento súbito da estratosfera

O aquecimento súbito da estratosfera (SSW) é um fenômeno complexo que envolve as interações de diferentes processos atmosféricos e entre a estratosfera e a troposfera (Sigmond et al., 2013), como ondas planetárias (Butler et al., 2019), ondas de gravidade (Oehrlein et al., 2019) e as ondas de Rossby (Lee et al., 2022; Shen et al.,

2022), as quais modulam o vórtice estratosférico e influenciam na circulação atmosférica em escalas sub-sazonais a sazonais. Este evento inclui mudanças transitórias na temperatura, vento zonal e vórtice polar estratosférico (Pacini et al., 2015). Limpasuvan et al. (2016), Büeller et al. (2020) e Pérot e Orsolini (2021) apontam que os SSW são comumente associados ao rápido aumento de temperatura na estratosfera, anomalias de circulação atmosférica e reversão do vento zonal,

caracterizado por uma inversão do vento de oeste para leste em 60° de latitude e 10 hPa de pressão num curto período de tempo.

A elevação abrupta de temperatura na camada da estratosfera pode ser associada à influência de diferentes fatores. Um estudo pioneiro sobre este fenômeno aponta que a intensificação da circulação zonal favorecida pelo aumento das concentrações de CO₂ provoca mudanças na dinâmica atmosférica e nos padrões de circulação estratosférica (Mahfouf et al., 1994). Também é apontado na literatura que o fortalecimento excepcional do jato subtropical da atmosfera média (MASTJ), com um repentino deslocamento equatorial do jato noturno polar estratosférico (PNJ), influenciam a propagação de ondas planetárias na atmosfera, que por sua vez propicia o SSW e impactam a dinâmica atmosférica e os padrões climáticos (Kodera et al., 2017).

Lu et al. (2008) apontaram que os eventos de SSW também são influenciados pela atividade geomagnética, referente aos distúrbios geomagnéticos causados pela interação entre o vento solar e o campo magnético da Terra, e pela atividade solar, com variações da radiação solar e do vento que modulam a circulação atmosférica e as condições de temperatura na estratosfera. Alterações estas, induzidas por mudanças nas condições de propagação de ondas desempenham um papel importante na dinâmica da estratosfera (Ayarzagüena et al., 2018; Sinnhuber et al., 2018), assim como a divergência de fluxo de Eliassen-Palm, que é um fenômeno relacionado à propagação e dissipação de ondas atmosféricas, influente na circulação e distribuição de temperatura e dos ventos (Limpasuvan et al., 2016).

Além das condições já apresentadas, o evento de SSW é influenciado pela interação entre a estratosfera e a troposfera, e entre a atmosfera e o oceano, pelas forçantes troposféricas como os padrões de bloqueio atmosféricos e de baixa altitude, correntes de jato, alterações na distribuição das massas de ar e anomalias de temperatura da superfície do mar (Oehlerlein et al., 2019; Büeler et al., 2020; Gomes et al., 2021; Yu et al., 2022), assim como pela ocorrência de fenômenos climáticos como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), que apresenta variabilidade atmosférica e favorece a ocorrência de eventos extremos, provocados pelo enfraquecimento do vórtice polar estratosférico e aumento das interações onda-fluxo médio na estratosfera (Cagnazzo e Manzini, 2009), sendo o enfraquecimento do vórtice polar estratosférico um dos principais contribuintes para o SSW (Shen et

al., 2022).

O enfraquecimento do vórtice polar estratosférico resulta da fase negativa da Oscilação Ártica (AO), influenciada pela atuação das ondas planetárias ascendentes (Li et al., 2012) e da fase negativa do Modo Anular Sul (Lim et al., 2019), deste modo, favorecendo a ocorrência de SSW; da persistência negativa da Oscilação do Atlântico Norte (NAO) (Kolstad et al., 2020); e do enfraquecimento repentino das correntes de vento (Monnin et al., 2022).

Diferentemente dos estudos abordados até o momento, Yu et al. (2022) apontam que as mudanças no gelo marinho do Ártico, afetam a transferência de calor entre o oceano e a atmosfera, contribuindo para as instabilidades atmosféricas. Além disso, os autores mencionam as interações entre a circulação de massa isentrópica e ondas planetárias, que desempenham papel importante na amplificação dos efeitos atmosféricos.

Por fim, Ayarzagüena et al. (2018) apontam que a compreensão e análise continuada do acoplamento estratosfera-troposfera, proporciona inferir que as previsões sazonais sejam melhoradas, como na identificação de probabilidades futuras de eventos extremos, a partir do monitoramento das condições estratosféricas, reconhecendo os padrões e condições atmosféricas dos eventos de SSW. Com isto, tem-se um sistema de alerta precoce para fenômenos extremos da chuva, mitigando os impactos futuros à sociedade como um todo.

Este evento é uma raridade no Hemisfério Sul, sendo mais comum no Hemisfério Norte. Dalcol et al. (2024), em uma investigação sobre a variabilidade espaço-temporal da precipitação no Brasil durante eventos de SSW, apresentaram a ocorrência de três eventos nos anos de 1988, 2002 e 2019 no continente Antártico.

Durante esses eventos, foi notado um enfraquecimento considerável do vórtice polar Antártico nos meses de julho e setembro, relacionados à ocorrência dos eventos de SSW na Antártica e à consequente persistência da fase negativa do Modo Anular Sul. Além disso, foram observadas influências significativas nas condições climáticas do Hemisfério Sul, com anomalias de precipitação e de temperatura em diversas regiões.

Metodologias da investigação do aquecimento súbito da estratosfera

Nesta seção, como já mencionado, serão apresentadas as metodologias usuais na investigação do aquecimento súbito da estratosfera e/ou fenômenos correlacionados, para cada uma das pesquisas levantadas.

Metodologia do artigo “Response of the Meteo-France climate model to changes in CO₂ and sea surface temperature”

No estudo desenvolvido por Mahfouf et al. (1994) sobre o impacto climático em relação às variações de aumento da concentração de CO₂ e das temperaturas de superfície do mar, utilizou-se como ferramenta um modelo numérico de previsão do tempo denominado “EMERAUDE” do Météo-France. Esse modelo utiliza um truncamento horizontal triangular espectral T42, com uma resolução de 2,8 graus em latitude e longitude, discretizado em trinta níveis verticais, desde o solo até 80km de altitude, utilizando coordenada híbrida vertical com dez níveis na troposfera, quinze níveis na estratosfera e cinco níveis na mesosfera. A partir deste modelo realizaram-se simulações de controle e perturbação, considerando um aumento gradual nas concentrações de CO₂, seguindo descrições do cenário “Business-as-usual” do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC).

A partir das concentrações de CO₂, os pesquisadores identificaram as mudanças significativas na dinâmica atmosférica e a ocorrência de aquecimentos súbitos na estratosfera. O modelo foi integrado em dois cenários de cinco anos (simulação de controle e perturbada), com início em 31/12/1979, através das análises e previsões meteorológicas do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* - ECMWF), utilizando modelos numéricos de previsão meteorológica e dados observacionais, como temperatura da superfície do mar (dez anos, sendo o período de 1979-1988), obtida a partir da interpolação dos dados médio mensais; a concentração de dióxido de carbono constante de 345 ppmv (simulação um) e 690 ppmv (simulação dois); e extensão do gelo marinho, obtida a partir da simulação de controle média de dez anos (1956-1965) com o modelo acoplado atmosfera-oceano.

Este estudo concluiu que houve variações climáticas, incluindo o aquecimento médio do ar na superfície da Terra, mudanças na taxa de precipitação e na temperatura da estratosfera no Hemisfério Norte, com identificação de aumento na frequência e intensidade dos aquecimentos súbitos da estratosfera. Observou-se que a intensificação e frequência desses aquecimentos foram resultantes das mudanças na dinâmica atmosférica devido aos níveis elevados de CO₂. Os autores apontam que o aumento das concentrações de CO₂ contribui para as mudanças de temperatura

da estratosfera, induzidas pelas alterações na circulação estratosférica e interações do sistema climático atmosférico, com destaque para a influência na região do Polo Norte e o clima global. Assim, demonstra-se a influência dos gases de efeito estufa na dinâmica atmosférica e destaca-se a importância da compreensão das interações da atmosfera para auxiliar nos sistemas de previsão de possíveis variações climáticas futuras.

Metodologia do artigo “Geomagnetic perturbations on stratospheric circulation in late winter and spring”

Lu et al. (2008) realizaram um estudo para analisar os sinais geomagnéticos na estratosfera durante o final do inverno e início da primavera, a fim de investigar a relação entre as perturbações geomagnéticas, a circulação do vento estratosférico e as variações de temperatura. Além disso, foi analisado o impacto da variabilidade geomagnética na estratosfera, através da indução do nitrogênio na precipitação de partículas energéticas descendentes. Também foi explorado o impacto das atividades geomagnéticas e suas respectivas alterações atmosféricas, devido ao ciclo solar de onze anos e à oscilação bienal.

Para isso, foi realizada uma análise estatística de possíveis influências nos sinais geomagnéticos na circulação atmosférica a cada mês, utilizando como base os dados mensais de vento e de temperatura do ECMWF, nos intervalos de setembro de 1957 a agosto de 2002 e setembro de 2002 a dezembro de 2006; dados de reanálise atmosférica do ERA-40, no período de setembro de 1957 a agosto de 2002, com uma resolução horizontal de 1,125 graus de latitude e longitude, em vinte e três níveis de pressão padrão de 1000 hPa a 1 hPa. Os autores contaram com o auxílio de dados de radiossondagens e satélite. Para obtenção dos níveis de nitrogênio da região polar, foram realizadas medições com auxílio do Monitoramento global de ozônio por ocultação de estrelas (*Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars* - GOMOS) para o rastreamento do nitrogênio noturno, SAGE III e POAM III para o rastreamento diurno, assim como para a análise da correlação entre os dados de nitrogênio com as atividades geomagnéticas.

Os autores sugerem que os sinais geomagnéticos na estratosfera são influenciados pelas variações das ondas induzidas pela atividade geomagnética e solar, assim como pela propagação de ondas, mas apontam que estes sinais são encontrados em anos sem a ocorrência dos eventos de aquecimento súbito da estratosfera. Sendo assim, pode-se deduzir que não foi identificada

relação ou efeito direto das atividades geomagnéticas deste estudo em relação aos eventos de aquecimento súbito da estratosfera, uma vez que as atividades geomagnéticas foram influenciadas pelas variações de circulação das ondas.

Metodologia do artigo “Impact of the Stratosphere on the Winter Tropospheric Teleconnections between ENSO and the North Atlantic and European Region”

O impacto da variabilidade estratosférica na teleconexão entre o ENOS e a região do Atlântico Norte Europeu (NAE) foi abordada por Cagnazzo e Manzini (2009) através de uma comparação entre dois conjuntos de simulações realizadas por duas versões do modelo de circulação geral da atmosfera. Para focar na estratosfera, foi utilizado o modelo High-Top, MAECHAM5, que abrange a superfície da Terra até altitudes de 0,01 hPa, com trinta e nove níveis verticais, e foi utilizada a versão Low-Top do modelo ECHAM5, para simulações representativas da superfície terrestre até 10 hPa, com um total de 19 níveis verticais.

De modo geral foram utilizados dois conjuntos de nove simulações cada, no intervalo de tempo de 1980 a 1999, com a utilização dos valores médios mensais de temperatura da superfície do mar, obtidos do conjunto de dados do Projeto de Intercomparação de Modelos Atmosféricos II (*Atmospheric Model Intercomparison Project II - AMIP II*) do Programa de Diagnóstico e Intercomparação de Modelos Climáticos. Além disso, foram utilizados dados de concentração de gelo e dados médio mensais de distribuição de ozônio (Fortuin e Kelder, 1998), este último para representar a distribuição do ozônio na atmosfera.

A partir dos resultados dos conjuntos das simulações, foram realizadas comparações entre os dois conjuntos, a fim de avaliar o impacto da variabilidade climática na troposfera. Essa análise teve como foco a investigação da estratosfera em relação ao ENOS e as influências do ENOS no padrão climático da superfície e nos eventos de aquecimento súbito da estratosfera.

Segundo os pesquisadores, os resultados encontrados apontam que as diferenças entre as simulações em cada versão do modelo sugerem que a estratosfera sob influência do ENOS, incluindo os aquecimentos súbitos, pode influenciar nas condições climáticas da troposfera. O modelo High-Top permitiu representar o aquecimento súbito da estratosfera de forma mais realista, assim como sua frequência e intensidade, ambos influenciados pelo ENOS. Já o modelo

Low-Top mostrou a falta dos eventos de SSW em resposta ao ENOS. Apesar desta divergência entre os modelos, foi apontado que os SSW favorecem a ocorrência de condições climáticas anômalas persistentes no Atlântico Norte e na região europeia. Por fim, destacam a importância da compreensão da dinâmica estratosférica em relação à variabilidade climática de inverno no Hemisfério Norte.

Metodologia do artigo “Arctic Oscillation anomaly in winter 2009/2010 and its impacts on weather and climate”

Li et al. (2012) realizaram estudo de análise a anomalia do Índice de Oscilação Ártica (AO) durante o inverno de 2009/2010, com destaque para os eventos negativos. Neste estudo, foram investigados os impactos das variações do Índice de Oscilação Ártica no vórtice polar estratosférico, anomalia de temperatura, altura geopotencial, ondas planetárias e padrões de precipitação no Hemisfério Norte.

Para a investigação das anomalias da Oscilação Ártica, os autores utilizaram dados de reanálise diária do NCEP/NCAR, com resolução de 2,5 x 2,5 graus, abrangendo de 1000 a 10hPa, com um total de dezessete níveis de pressão verticais, durante o intervalo de 1 de janeiro de 1948 a 28 de fevereiro de 2010. Além disso, foram utilizados dados diários e mensais do Índice de Oscilação do Ártico do Centro Nacional de Previsão Climática da América (*National Climate Prediction Center of America - CPC*), assim como dados de precipitação de cento e sessenta estações do Centro Nacional do Clima da China (*National Climate Center of China - NCC*).

Com os dados de reanálise foram identificadas as anomalias de temperatura, anomalias de altura geopotencial e atividade das ondas planetárias. Os dados do Índice AO foram utilizados para acompanhar a evolução do AO durante o inverno de 2009/2010. E, por fim, os dados de precipitação foram utilizados para compreender a dinâmica da AO. A partir da combinação destas informações, foram realizadas análises com o objetivo de compreender os padrões meteorológicos das condições climáticas observadas, as interações entre a estratosfera e a troposfera e a circulação atmosférica.

Os resultados obtidos indicaram que a fase negativa da AO correspondeu às anomalias de temperatura e precipitação no Hemisfério Norte, em que os eventos foram influenciados pelas ondas planetárias e sua propagação ascendente, anomalias do vórtice polar estratosférico e anomalias de temperatura na troposfera,

principalmente devido às interações entre a estratosfera e a troposfera. Essas anomalias são importantes para subsidiar previsões do tempo e do clima de forma mais precisa.

Metodologia do artigo “Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings”

Com o objetivo de melhorar a previsão sazonal nas regiões extratropicais, Sigmond et al. (2013) desenvolveram um sistema de previsão sazonal com o acoplamento de informações sobre os eventos de aquecimento súbito da estratosfera, utilizando um modelo que representasse de forma eficiente a estratosfera, visando melhorar as previsões futuras dos padrões de circulação atmosférica e os impactos na superfície terrestre após a ocorrência dos eventos de SSW.

Os pesquisadores apontam que os eventos de SSW introduzem anomalias de circulação de longa duração na estratosfera inferior e, consequentemente, afetam a troposfera, com duração de até dois meses. Essas anomalias resultantes do SSW possuem características de longa duração e persistentes. Assim, com o sistema de previsão sazonal, é possível antecipar os padrões de circulação atmosférica e as temperaturas na superfície da Terra em regiões extratropicais.

Para isso, foram realizadas previsões retrospectivas de modelos de conjunto, com base em vinte eventos de aquecimento súbito da estratosfera, identificados a partir das observações relacionadas ao índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO), quando o índice NAO estava abaixo de -2,5 a 30 hPa, definido pela avaliação da altura geopotencial média zonal, entre novembro de 1970 a março de 2009.

As previsões foram conduzidas utilizando o modelo Canadense da Atmosfera Média, que possui setenta e um níveis verticais da superfície até 100 km de altitude, com resolução horizontal T63. Foram inicializadas com as condições atmosféricas e da superfície terrestre obtidas por meio de assimilações, totalizando dez previsões, iniciadas a partir de estados atmosféricos diferentes de 01 de janeiro de 1970.

As anomalias da temperatura da superfície do mar foram utilizadas para isolar as previsões decorrentes das perturbações atmosféricas para as duas primeiras semanas de previsões. Além disso, foram realizadas previsões de controle para uma comparação efetiva entre elas. As anomalias dos campos meteorológicos foram calculadas em relação à média climatológica e posteriormente quantificadas usando a Pontuação de Probabilidade Classificada Contínua (CSS).

Quanto à constituição de um sistema dinâmico de previsão sazonal, os autores apontam que a partir dele é possível obter uma melhor capacidade de previsão dos padrões de circulação atmosférica, temperatura em superfície e precipitação no Atlântico Norte. A partir dos resultados obtidos, sugere-se que os sistemas inicializados durante os eventos de SSW são susceptíveis a produzir uma previsão mais confiável em determinadas regiões, ou seja, com a inclusão da estratosfera, há maior potencial para a previsibilidade sazonal.

Metodologia do artigo “On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause”

No estudo realizado por Limpasuvan et al. (2016), foram observados os comportamentos da mesosfera e termosfera inferior (MLT) durante os eventos de aquecimento súbito da estratosfera com a estratopausa elevada. Para isso, foram analisados os efeitos das ondas planetárias na circulação atmosférica média da MLT, a recuperação do vórtice polar e a propagação dos impactos dos eventos de aquecimento súbito da estratosfera.

Para as suas investigações foi utilizado um modelo de circulação climática global desenvolvido pelo Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (*National Center For Atmospheric Research* - NCAR), denominado Modelo Climático da Comunidade de Toda a Atmosfera (*Whole Atmosphere Community Climate Model* - WACCM) versão quatro. Esse modelo possui resolução horizontal de 1,9 x 2,5 graus e extensão de até 145 km, com um total de oitenta e oito níveis de pressão. Ele analisa a dinâmica da atmosfera e é amplamente utilizado na investigação das interações entre a atmosfera e o clima da Terra, permitindo realizar simulações dos processos atmosféricos, desde a superfície da Terra até aproximadamente 145 km de altitude.

Além disso, utilizaram dados de reanálise do Modern-ERA (MERRA) do escritório de modelagem e assimilação global da NASA, que foram gerados a cada 3 horas, para a identificação dos eventos do SSW, seguindo os critérios de Stray et al. (2015): reversão do gradiente de temperatura zonal, devido seu impacto na distribuição de temperatura; anomalias de ventos estratosféricos (reversão), devido ocasionarem mudanças na circulação atmosférica; propagação das ondas atmosféricas (planetárias e gravitacionais).

Os pesquisadores utilizaram o modelo para simular os eventos de aquecimento súbito da estratosfera, e, a partir disso, identificar as interações das ondas planetárias e ondas

gravitacionais com a circulação média da mesosfera e da termosfera durante os eventos, obtendo características de seus efeitos e processos atmosféricos associados. Sendo assim, os resultados dessas simulações do modelo WACCM permitem analisar as mudanças na circulação atmosférica, temperatura, vento e outras variáveis expressivas aos eventos de SSW.

Metodologia do artigo “Stratospheric tropical warming event and its impact on the polar and tropical troposphere”

Kodera et al. (2017) investigaram a correlação entre a estratosfera e a troposfera em relação ao jato subtropical da atmosfera média no inverno boreal. Identificou-se em dezembro de 2011 um fortalecimento do jato subtropical associado ao evento repentino de deslocamento equatorial do jato polar noturno estratosférico, resultando em impactos na circulação atmosférica. Isso ocorreu devido à propagação de ondas planetárias e à distribuição anômala de temperatura na estratosfera e troposfera, que consequentemente influenciaram a circulação meridional e os jatos subtropicais e polares.

Para essa análise, foram utilizados dados de vento zonal médio e temperatura em diferentes regiões e altitudes da atmosfera durante o aquecimento súbito da estratosfera, com destaque na investigação das mudanças climáticas na circulação atmosférica. Contando com o auxílio de um conjunto de dados de reanálise do JRA-55 produzidos pela Agência Meteorológica do Japão, com resolução de 1,25 x 1,25 graus e trinta e sete níveis verticais, sendo dez níveis contemplando altitudes acima de 100hPa até 1hPa. Além disso, utilizou-se estatística para a identificação das anomalias, definidas por desvio padrão da média climática de 37 anos (1979-2015).

De acordo com os autores, as consequências desse deslocamento do jato noturno polar estratosférico e suas perturbações na atmosfera impactam os padrões climáticos e o comportamento de fenômenos como a Oscilação de Madden-Julian (MJO), com destaque às mudanças climáticas que ocorrem na superfície da Terra.

Por fim, conclui-se que o jato noturno polar estratosférico (PNJ) e outros padrões de circulação na estratosfera são afetados pelo aquecimento súbito da estratosfera, e suas mudanças influenciam a propagação das ondas planetárias, distribuição de temperatura e pressão na estratosfera e troposfera, além dos padrões climáticos em diferentes escalas de tempo e espaço.

Metodologia do artigo “Stratospheric Connection to the Abrupt End of the 2016/2017 Iberian Drought”

A pesquisa desenvolvida por Ayarzagüena et al. (2018) investigou a influência do evento de aquecimento súbito da estratosfera, que ocorreu em 2018, no fim da seca extrema que a Península Ibérica vinha sofrendo de forma significativa. Neste estudo, os autores analisaram as interações entre a estratosfera e a troposfera, suas condições atmosféricas e padrões climáticos, assim como a verificação da influência do SSW na troposfera, que provocou uma mudança climática proporcionando o fim da estiagem.

Para a efetiva investigação, foram utilizados dados de reanálise obtidos dos centros Nacionais de Previsão Ambiental/Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica (*National Centers for Environmental Prediction* - NCEP/ *National Center for Atmospheric Research* - NCAR), ambos com dados médios diários de resolução horizontal de 2,5 x 2,5 graus; e dados médios diários de precipitação, obtidos do conjunto de dados do CPC (*Climate Prediction Center*) com resolução de 0,5 x 0,5 graus, a fim de avaliar o impacto no SSW nas condições climáticas da Península Ibérica, a partir das condições troposféricas e estratosféricas.

A identificação do SSW foi realizada através da análise das condições anômalas da estratosfera, na qual foi identificado um aumento anômalo de temperatura. Também foi realizado o cálculo de índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO) para identificar a propagação do SSW da estratosfera para a troposfera. Para a caracterização da circulação troposférica foram utilizadas as anomalias de altura geopotencial a 500hPa. Por fim, foi realizada uma abordagem análoga aos fluxos para investigar a ligação do SSW e a mudança climática na região.

Foi identificado que o SSW se propagou para a troposfera em tempo hábil com a mudança do regime climático para condições negativas de NAO. Essa mudança contribuiu para o aumento repentino de precipitação e vento na área em estudo durante o mês de março de 2018, influenciando a circulação atmosférica. A fase negativa do NAO favoreceu o aumento de temperatura e de precipitação, correspondendo a condições de pressões abaixo da média sobre o Atlântico Norte e pressões acima da média sobre a região Euro-Atlântica. Esses padrões conduzem o deslocamento da Corrente de Jato para o Sul, transportando chuva e vento para o sudoeste da Europa.

Como conclusão, os autores apontam que o SSW contribuiu para a persistência de condições

meteorológicas extremas em março de 2018, o que provocou a persistência da fase negativa do NAO e o aumento da precipitação, está última, características de influência do SSW, destacando a importância do acoplamento dinâmico da estratosfera e troposfera na influência dos eventos estratosféricos nos padrões climáticos da região troposférica.

Metodologia do artigo “Separating and quantifying the distinct impacts of El Niño and sudden stratospheric warmings on North Atlantic and Eurasian wintertime climate”

O estudo realizado por Oehrlein et al. (2019) analisou a influência do Aquecimento Súbito da Estratosfera e a fase positiva (El Niño) do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) no clima de inverno na Eurásia (união dos continentes da Europa e da Ásia).

Neste estudo, foram utilizados dois conjuntos de integrações de 1 ano do CESM1 (*Community Earth System Model - Version 1*) e WACCM (*Whole Atmosphere Community Climate Model*), com uma resolução horizontal de 1,9 graus de latitude e 2,6 graus de longitude, com sessenta e seis verticais e um topo de $5,1 \times 10^{-6}$ hPa. Um dos conjuntos foi realizado com temperaturas da superfície do mar correspondente a anos com invernos de El Niño, e o outro com temperaturas da superfície do mar correspondente a invernos neutros do ENOS, totalizando duzentos membros em cada. Além disso, foi utilizado o método de componente principal baseado em pressão ao nível do mar para calcular o índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO) nas integrações realizadas no estudo.

As integrações realizadas para a condição neutra das temperaturas da superfície do mar ENOS foram constituídas com a utilização de um conjunto de dados de temperatura da superfície do mar reconstruídos (ERSSTv5), baseados nas observações históricas da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (NOAA), durante o período de 1950 a 2014. Esses dados são fundamentais para a compreensão das condições climáticas e tendências passadas.

Os SSWs, causados pelas perturbações na estratosfera e o enfraquecimento do vórtice polar estratosférico, têm sido associados às fases negativas da NAO, propiciando temperaturas mais frias. Além disso, contribuem para um aumento dos bloqueios na atmosfera, afetando indiretamente a distribuição das massas de ar e a precipitação da Eurásia. Já os eventos de El Niño, caracterizados pelo aquecimento das temperaturas da superfície do mar no Oceano Pacífico tropical central e

oriental, influenciam nos padrões de circulação atmosférica global. Quando associados às mudanças na NAO e na Oscilação Ártica (AO), propiciam alterações nos padrões climáticos de inverno na Eurásia, com mudanças na posição e intensidade do jato de corrente, afetando o transporte de umidade e as anomalias de temperatura.

Diante disso, os autores concluíram que os eventos mencionados anteriormente (SSW e El Niño) influenciam de formas variadas e independentes no clima de inverno no Atlântico Norte e na Eurásia, com a ocorrência de anomalias negativas da NAO, aumento de precipitação e resfriamento na região norte com domínio do SSW.

Metodologia do artigo “Tracing North Atlantic Oscillation Forecast Errors to Stratospheric Origins”

Devido à oscilação do Atlântico Norte ser considerada o principal motivador da variabilidade climática na Eurásia, Groenlândia, América do Norte e Norte da África, com a sua previsão, melhores seriam as previsões de precipitação e temperatura. Kolstad et al. (2020) apontam que o Índice de Oscilação do Atlântico Norte (NAO) é influenciado pela estratosfera e devido à complexidade da análise desse acoplamento pelos modelos de previsão.

Neste estudo, foi analisada a relação dos erros de previsão do NAO e a influência do vórtice polar estratosférico, visando melhorar as previsões meteorológicas, principalmente a precipitação e temperatura. Para isso, foram analisados 21 invernos de dados de previsão subsazonal do sistema de previsão mensal do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo, com o intuito de investigar os erros da pressão do nível do mar no Oceano Atlântico Norte e sua relação com o vórtice polar estratosférico.

Os autores destacam que o modelo superestimou a persistência da resposta negativa da NAO após um vórtice polar fraco e a resposta positiva do NAO após um vórtice polar forte. Além disso, apontam uma representação inadequada do modelo em relação ao impacto descendente gradual de anomalias do vórtice estratosférico.

A partir dos resultados obtidos no estudo, constatou-se que o aquecimento súbito da estratosfera teve um papel significativo na análise dos erros de previsão do NAO. Nas cinco semanas após o evento do SSW, devido à superestimação do regime negativo de NAO, resultou em previsões com temperaturas muito baixas para a região norte-europeia. Perante isso, os autores destacam que os

eventos de SSW influenciam na dinâmica atmosférica e na melhoria das previsões meteorológicas, com destaque à Oscilação do Atlântico Norte e as condições climáticas na região.

Metodologia do artigo “Stratospheric influence on ECMWF sub-seasonal forecast skill for energy-industry-relevant surface weather in European countries”

A fim de investigar a influência da dinâmica estratosfera no clima em países europeias, Büeller et al. (2020) analisaram as anomalias de temperatura e precipitação associadas ao Vórtice Polar Estratosférico (SPV), assim como as previsões subsazonal do clima da Europa utilizando dados de previsão do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), com o intuito de investigar a capacidade de previsão dos países europeus após eventos de SPV. Os autores apontam que as anomalias de temperatura, respectivas do SSW, influenciam as mudanças do vórtice polar estratosférico e dependem da análise de dados de satélite, radiossonda e dados de reanálise, parâmetros frequentemente utilizados para sua identificação.

Deste modo, foram analisadas repredições subsazonais para temperatura diária média de 2 m, velocidade do vento de 10 m e precipitação total diária acumulada na Europa. A investigação abordou vinte e dois invernos durante o período entre dezembro de 1995 e fevereiro de 2017. Sua inicialização foi realizada a partir de ERA-Interim, com onze membros do conjunto (um controle e dez previsões), com interpolação de 1,5 x 1,5 graus. Além disso, foram utilizadas as previsões de condições extremas do vórtice polar estratosférico para avaliar a significância estatística da habilidade da previsão.

Os autores também realizaram a comparação das anomalias previstas com os dados do ERA-Interim, referentes à temperatura, velocidade do vento e precipitação. Essas anomalias foram identificadas através dos dados de previsão e da normal climatológica (média).

Os resultados obtidos apontam que as anomalias climáticas identificadas se assemelham às fases opostas da Oscilação do Atlântico Norte; além disso, a previsibilidade subsazonal dos parâmetros meteorológicos variou conforme o estado do SPV, o qual, por sua vez, esteve associado aos eventos de aquecimento súbito da estratosfera. Destacam a importância da interpretação das interações entre a troposfera e a estratosfera, assim como das previsões, uma vez

que beneficiam a capacidade de previsão do clima na Europa.

Metodologia do artigo “2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences”

Gomes et al. (2021) analisaram a seca extrema ocorrida na América do Sul em 2019 e 2020 e sua relação com o aquecimento súbito da estratosfera, investigando os padrões atmosféricos e oceânicos influentes, a variabilidade temporal dos Jatos de Baixos Níveis (JBN) e o transporte de umidade.

De acordo com os autores, o evento de SSW induziu a fase negativa do Modo Anular do Sul, gerando subsidência sobre os trópicos e influenciando na precipitação. Além disso, apontam que o SSW se propagou para a troposfera, contribuindo para a ocorrência da seca na América do Sul.

Para a investigação, utilizaram uma abordagem analítica e descritiva, por meio da análise das anomalias de precipitação, temperatura e umidade, investigando os padrões atmosféricos e a influência do SSW na dinâmica atmosférica.

Na identificação do aquecimento súbito da estratosfera, monitoraram a estratosfera por meio de dados de temperatura e pressão atmosférica, observando um rápido aumento de temperatura em latitudes altas e mudanças na circulação atmosférica. Também analisaram os efeitos do SSW na dinâmica atmosférica, que induziram a fase negativa do Modo Anular do Sul, por meio da análise da posição e intensidade dos jatos de vento em altas e médias latitudes, e identificaram as anomalias de temperatura da superfície do mar a partir dos dados climáticos.

De acordo com os autores, o trabalho desenvolvido indicou que o aquecimento súbito da estratosfera causou impactos na dinâmica atmosférica e nos padrões climáticos da América do Sul, ressaltando a importância do SSW, seus efeitos e a complexidade da compreensão das interações climáticas.

Metodologia do artigo “The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950”

No estudo desenvolvido por Bell et al. (2021), foi realizada uma extensão da reanálise global ERA5 até o ano de 1950, uma vez que o mesmo cobria a partir do período de 1979. O objetivo desta extensão foi permitir uma análise mais abrangente e consistente do clima ao longo do tempo. Neste estudo, foram realizadas melhorias na assimilação de observações convencionais e

dados de satélite, visando aprimorar a qualidade e previsão dos dados de reanálise.

Esta extensão foi utilizada para representar e auxiliar na identificação de eventos específicos de aquecimento súbito da estratosfera, como o ocorrido em 1952. Foram utilizados dados de reanálise para analisar o evento e também foi realizada sua comparação com dados climatológicos, tais como temperatura, vento e outras variáveis atmosféricas, por exemplo, a umidade, em altitudes de 30 hPa. Isso permitiu uma avaliação mais detalhada do aquecimento súbito da estratosfera, contribuindo para uma melhor compreensão da sua dinâmica e o impacto no clima global.

Como resultados, os autores apontam que com a melhora da qualidade da reanálise obtêm-se representações mais precisas das condições atmosféricas. Além disso, a partir da representação realizada, foi possível evidenciar maior capacidade na captura de eventos importantes, como o aquecimento súbito da estratosfera, devido ao fornecimento de insights importantes sobre a evolução do clima global.

Metodologia do artigo “The role of the timing of sudden stratospheric warmings for precipitation and temperature anomalies in Europe”

A análise do impacto do aquecimento súbito da estratosfera no clima de inverno da Europa foi realizada pelos pesquisadores Monnin et al. (2022). Neste estudo, foram analisadas as características, frequência e efeitos dos eventos de SSW na superfície, através do uso de hindcasts, simulações feitas pelo modelo de previsão sazonal SEAS5 do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (*Advancing global NWP through international collaboration - ECMWF*).

A metodologia utilizada para a identificação dos aquecimentos estratosféricos repentinos (SSWs) foi o uso dos dados do vento zonal em 10 hPa da reanálise ERA5 do ECMWF, que é um conjunto de dados de observação. Os SSWs foram identificados como eventos em que o vento zonal em 10 hPa em 60°N e 90°N muda de uma condição de oeste para leste em um período inferior a 5 dias.

Também foram utilizados dados de altura geopotencial em 1000 e 150 hPa para analisar a propagação descendente dos SSWs a partir do índice do Modo Anular Norte (NAM), calculado pela média ponderada da área da altura geopotencial média diária com a calota polar (60-90°N). Para a padronização do NAM, fez-se a subtração do índice com a climatologia plurianual

de cada dia, dividindo-a pelo desvio padrão plurianual diário.

Para identificar a frequência dos eventos de SSWs, além dos hindcasts mencionados anteriormente, também foi realizada a contabilização da ocorrência dos eventos no período de dezembro a março, respectivo da estação de inverno no continente europeu.

De acordo com os autores, destaca-se como conclusão que os eventos de aquecimento súbito da estratosfera possuem um grande impacto no clima de inverno da Europa, principalmente na resposta de precipitação e temperatura. Além disso, salientam que as influências são mais significativas quando o evento ocorre no início da estação em comparação com as que ocorrem no final da mesma. Por fim, apontam que compreender o timing, período de ocorrência, e a definição do SSW são fundamentais para melhorar a previsão e compreensão dos eventos extremos.

Metodologia do artigo “The Life Cycle and Variability of Antarctic Weak Polar Vortex Events”

Shen et al. (2022), em estudo desenvolvido sobre a variabilidade dos eventos de Vórtice Polar Fraco (WPVs) na Antártica após a ocorrência do aquecimento súbito da estratosfera (SSW) no Hemisfério Norte, investigaram os WPVs desencadeados pela intensificação das ondas de Rossby, que são ondas atmosféricas de grande escala propagando-se para a atmosfera terrestre em regiões de altas latitudes. Essas ondas ocorrem em meio a um vórtice polar estratosférico antártico enfraquecido. Assim, a presença de um vórtice polar estratosférico pré-condicionado é um dos fatores que contribuem para a ocorrência dos WPVs.

Neste estudo foi realizada uma combinação de análise de dados observacionais e análise estatística para identificar eventos de WPV. Os eventos de WPV foram definidos como períodos nos quais o vento zonal médio diário a 60°S e 10 hPa ao longo de 30 dias é mais fraco do que -1 de desvio padrão da climatologia, totalizando dezesseis eventos entre 1979 a 2020.

A identificação foi feita com base em um conjunto de dados japonês de 55 anos de reanálise (JRA-55) e na reanálise ERA – Interim do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (*Advancing global NWP through international collaboration - ECMWF*). Para confirmar os eventos de WPV, foi realizada uma análise composta dos eventos, examinando o comportamento médio da atmosfera antes, durante

e depois dos eventos, e identificando padrões entre WPV e SSW.

Os eventos de SSW foram identificados a partir das observações do aumento repentino de temperatura na estratosfera, em altas latitudes, reversão do gradiente de vento oeste para leste, desaceleração do jato polar e presença de ondas de Rossby, além de variações anômalas de pressão atmosférica.

A partir das análises realizadas, os autores concluíram que, apesar das semelhanças entre os eventos de WPVs e SSW, as características dos SSW ainda não são claras. Além disso, em relação aos eventos de WPVs, foi identificado que a frequência de ocorrência é de cerca de quatro eventos por década, sendo impulsionados pelo aumento acentuado da onda de Rossby e mais frequentes na primavera austral, associados a mudanças na concentração de ozônio na região polar. No entanto, devido ao avanço dos eventos de aquecimento súbito da estratosfera, a frequência dos WPVs dobrou, resultando em fase negativa do modo anular do sul, que desce para a troposfera e acarreta anomalias de temperatura e precipitação por cerca de 3 meses, destacando os impactos do SSW e a importância da sua compreensão para uma previsão climática eficaz.

Metodologia do artigo “Modulation of Atmospheric Rivers by the Arctic Stratospheric Polar Vortex”

Lee et al. (2022) conduziram uma análise sobre a relação entre a força do vórtice estratosférico, incluindo eventos de aquecimento súbito da estratosfera, e a frequência de ocorrência de Rios Atmosféricos (ARs), que são estruturas filamentosas de intenso transporte horizontal de vapor d'água. Os autores identificaram uma variabilidade sazonal na precipitação sobre a Europa devido à frequência de ARs, os quais estão geralmente associadas a frentes frias de ciclones de latitudes médias.

O estudo foi realizado utilizando dados da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e do MERRA - 2 (*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications - version 2*), que possui uma resolução de 0,5 x 0,625. Este modelo permite a análise da relação entre a força do vórtice estratosférico e a ocorrência de rios atmosféricos (Rienecker et al., 2011).

Para isso, foram utilizados dados de dezembro, janeiro, fevereiro e março, durante o período de 1980 a 2020. A detecção dos ARs foi realizada a partir de um algoritmo baseado nos dados do MERRA-2, assim como as análises-

chave usando o catálogo “Mundhenk v” para comparação, que é um conjunto de dados para detecção e análise de ARs com base no algoritmo de Guan e Waliser. Este catálogo é baseado em um limiar global de percentil, em contraste com percentis de ponto de grade utilizados pelo algoritmo, contribuindo para a compreensão da variabilidade dos ARs e sua influência no clima global e regional.

A partir da aplicação metodológica, os resultados indicaram que a força do vórtice estratosférico influencia na frequência e na distribuição dos ARs, principalmente durante eventos de aquecimento súbito da estratosfera e eventos de vórtice forte. Esses resultados reforçam a importância da compreensão das interações da estratosfera com a troposfera para melhorar a previsão de eventos climáticos extremos em escala regional.

Metodologia do artigo “An Isentropic Mass Circulation View on the Extreme Cold Events in the 2020/21 Winter”

O estudo realizado por Yu et al. (2022) analisa a relação entre a circulação de massa isentrópica e o aquecimento súbito da estratosfera durante os eventos de frio extremo no inverno de 2020/2021 no leste Asiático e América do Norte. Foram avaliados os impactos das variações na circulação estratosfera-troposfera na ocorrência desses eventos, assim como a dinâmica entre a variação do vórtice polar estratosférico e as temperaturas superficiais extratropicais, possíveis fatores desencadeadores dos eventos de frio extremo.

Para isso, foram utilizados dados de temperatura, pressão e vento meridional da superfície e a temperatura do ar, altura geopotencial e vento meridional oriundos do conjunto de dados do ERA5 em intervalos de 6 horas do Serviço de Mudanças Climáticas do Copernicus (*Copernicus Climate Change Service - C3S*), com resolução horizontal de 1,5 x 1,5°, incluindo trinta e sete níveis de pressão e 1000 hPa a 1 hPa. Totalizando quarenta e dois invernos durante o período de 1 de novembro de 1979 a 28 de fevereiro de 2010. A partir desses dados, foi realizada uma análise integrada de dados observacionais, modelagem atmosférica com uso do ERA5, aplicação de técnicas de diagnóstico, como a investigação do padrão de propagação de ondas planetárias na atmosfera, feedbacks atmosféricos e a análise de anomalias de temperatura do mar em diferentes regiões, a fim de compreender a dinâmica atmosférica de grande escala, o aquecimento súbito da estratosfera e a

circulação de massa isentrópica.

De acordo com os autores, foram identificadas intensificação do transporte de ar frio em direção aos meios latitude; as anomalias de temperatura do mar no Oceano Pacífico e no Oceano ártico influenciaram a distribuição das temperaturas e padrões atmosféricos; a interação entre as ondas planetárias, feedbacks atmosféricos e forçantes oceânicas e estratosféricas desempenhou um papel significativo nos padrões climáticos e eventos de frio extremo; a combinação de fatores tropicais e extratropicais com as mudanças no gelo marinho do Ártico e o aquecimento global induzem o aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos no futuro.

Metodologia do artigo “North Pacific and North Atlantic Jet Covariability and Its Relationship to Cool Season Temperature and Precipitation Extremes”

No estudo desenvolvido por Winters e Attard (2022), foi realizada análise da variabilidade conjunta dos jatos do Pacífico Norte e do Atlântico Norte e sua relação com os eventos extremos de temperatura e precipitação durante o inverno. Este estudo, em especial, não aborda o aquecimento súbito da estratosfera diretamente, porém, trata de interações entre fenômenos que podem implicar na dinâmica atmosférica em diferentes latitudes, englobar a estratosfera e podem influenciar na propagação de ondas na atmosfera, relacionadas a eventos de aquecimento súbito da estratosfera, contribuindo indiretamente para estudos sobre o aquecimento súbito da estratosfera e suas consequências.

A metodologia utilizada contou com a análise de funções ortogonais empíricas, usada para decompor padrões complexos de variabilidade em componentes mais simples, permitindo a identificação de modos dominantes de variabilidade dos jatos. Também foram utilizados dados do Reanálise do Sistema de Previsão Climática (*Climate Forecast System Reanalysis* - CFSR), a fim de investigar a variação conjunta dos jatos, em que os jatos variam juntos e investigar suas influências aos padrões de circulação atmosférica.

De acordo com os autores, foi identificado que a probabilidade relativa e a cobertura espacial de extremos de temperatura e precipitação variam em toda a América do Norte no estado combinado dos dois jatos. Além disso, há uma potencialidade significativa da metodologia utilizada em informar previsões operacionais de médio prazo, 6 a 10 dias, e subsazonais de temperatura e precipitação.

Destaca-se a importância da compreensão desses fenômenos para melhorar a previsão de eventos climáticos extremos e variabilidade climática.

Conclusões

A partir deste trabalho, aponta-se a significativa importância em estudos de revisão bibliográfica sobre assuntos ainda pouco estudados, como o aquecimento súbito da estratosfera, para auxiliar na compreensão dos processos atmosféricos e respectiva caracterização. Durante o levantamento bibliográfico realizado, foram observadas diferentes metodologias, incluindo análise estatística e modelagem numérica, as quais são frequentemente utilizadas em combinação, devido a sua complexidade.

A metodologia mais utilizada para identificar os eventos de SSW envolve a análise de dados observacionais, como medições de temperatura, vento e pressão atmosférica na estratosfera, podendo incluir a análise de índices climáticos, como a Oscilação do Ártico (AO) e a Oscilação do Atlântico Norte (NAO), que estão associados ao enfraquecimento do vórtice polar estratosférico e à ocorrência de SSW.

Destaca-se que os eventos de aquecimento súbito da estratosfera são definidos com base no aumento anômalo de temperatura da estratosfera, variação dos padrões de dinâmica na atmosfera, na reversão do vento zonal e no enfraquecimento do vórtice polar estratosférico. As principais dinâmicas atmosféricas associadas aos SSW são as ondas planetárias, as ondas de gravidade e as ondas de Rossby.

Por fim, espera-se que este estudo auxilie em trabalhos futuros a serem desenvolvidos para a investigação e identificação dos eventos de aquecimento súbito da estratosfera.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa concedida ao primeiro autor. O segundo autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de produtividade.

Referências

Allarie, J., 2024. RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso: nov., 2024.

- Almeida, C. C.; Gracio, M. C. C., 2019. Brazilian scientific production on the "Impact Factor" indicator: a study at the SciELO, Scopus and Web of Science bases. *Encontros Bibli: revista eletrônica de biblioteconomia e ciência da informação* [online] 24, 54, 62–77. Disponível: <https://doi.org/10.5007/1518-2924.2019v24n54p62>. Acesso: out., 2024.
- Ayarzagüena, B.; Barriopedro, D.; Garrido-Perez, J. M.; Abalos, M.; Cámara, A. de la; García-Herrera, R.; Calvo, N.; Ordóñez, C., 2018. *Geophysical Research Letters* [online] 45, 12639-12646. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2018GL079802>. Acesso: nov., 2023.
- Baldwin, M. P.; Ayarzagüena, B.; Birner, T.; Butchart, N.; Butler, A. H.; Charlton-Perez, A. J.; Domeisen, D. I. V.; Garfinkel, C. I.; Garny, H.; Gerber, E. P.; Hegglin, M. I.; Langematz, U.; Pedatella, N. M., 2021. Sudden stratospheric warmings. *Reviews of Geophysics*. [online] 59, 1, Disponível: <https://doi.org/10.1029/2020RG000708>. Acesso: set., 2023.
- Bell, B.; Hersbach, H.; Simmons, A.; Berrisford, P.; Dahlgren, P.; Horányi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Radu, R.; Schepers, D.; Soci, C.; Villaume, S.; Bidlot, J.-R.; Haimberger, L.; Woollen, J.; Buontempo, C.; Thépaut, J.-N., 2021. The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950 [online] 147, 741, 4186-4227. Disponível: <https://doi.org/10.1002/qj.4174>. Acesso: nov., 2023.
- Büeler, D.; Beerli, R.; Wernli, H.; Grams, C. M., 2020. Stratospheric influence on ECMWF sub-seasonal forecast skill for energy-industry-relevant surface weather in European countries. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* [online] 146, n. 733, 3675-3694. Disponível: <https://doi.org/10.1002/qj.3866>. Acesso: nov. 2023.
- Butler, A.; Charlton-Perez, A.; Domeisen, D. I. V.; Garfinkel, C.; Gerber, E. P.; Hitchcock, P.; Karpechko, A. Y.; Maycock, A. C.; Sigmond, M.; Simpson, I.; Son, S.-W., 2019. Chapter 11 - Sub-seasonal Predictability and the Stratosphere. *Sub-Seasonal to Seasonal Prediction*, 223-241. Disponível: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811714-9.00011-5>. Acesso: nov., 2023.
- Cagnazzo, C.; Manzini, E., 2009. Impact of the Stratosphere on the Winter Tropospheric Teleconnections between ENSO and the North Atlantic and European Region. *Journal of Climate* [online] 22, 5, 1223-1238. Disponível: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2549.1>. Acesso: nov., 2023.
- Castillero, G. C.; Paton, S.; Noriega, R., 2022. The Dynamics of Climate Change Science and Policy in Panama: A Review. *Research Square* [online] 1. Disponível: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2234975/v1>. Acesso: out., 2023.
- Dalcol, D. da S.; Boiaski, N. T.; Pinheiro, D. K., 2024. A influência do aquecimento abrupto da estratosfera na precipitação do Brasil nos anos de 1988, 2002 e 2019. *Ciência e Natura* [online] 46, 2. Disponível: <https://doi.org/10.5902/2179460X87951>. Acesso: jan., 2025.
- Edvartsen, J. O.; Maliniemi [online]; Nesse, H., 2023. Effects of Energetic Particle Precipitation on Stratospheric Temperature During Disturbed Stratospheric Polar Vortex Conditions. *JGR Atmospheres* [online] 128, 10. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2022JD038010>. Acesso: mar., 2024.
- Eswaraiah, S.; Kim, Y. H.; Liu, H.; Ratman, M. V.; Lee, J., 2017. Do minor sudden stratospheric warmings in the Southern Hemisphere (SH) impact coupling between stratosphere and mesosphere–lower thermosphere (MLT) like major warmings?. *Earth, Planets and Space* [online] 69, 119. Disponível: <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0704-5>. Acesso: jul., 2023.
- Eswaraiah, S.; Seo, K. H.; Kumar, K. N.; Ratnam, M. V.; Koval, A. V.; Jeong, J.-Y.; Mengist, C. K.; Lee, Y.-S.; Greer, K.; Hwang, J.-Y.; Lee, W.; Pramitha, M.; Chalapathi, G. V.; Reddy, M. V.; Kim, Y. H., 2022. Anthropogenic Influence on the Antarctic Mesospheric Cooling Observed during the Southern Hemisphere Minor Sudden Stratospheric Warming. *Atmosphere* [online] 13, 1475. Disponível: <https://doi.org/10.3390/atmos13091475>. Acesso: maio, 2024.
- Finkel, J.; Gerber, E. P.; Abbot, D. S.; Weare, J., 2023. Revealing the Statistics of Extreme Events Hidden in Short Weather Forecast Data. *AGU Advances* [online] 4, 2. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2023AV00088>. Acesso: abril, 2024.

- Fortuin, P. J. F.; Kelder, H., 1998. An ozone climatology based on ozonesonde and satellite measurements. *Journal of Geophysical Research* [online] 103, 31709–31734. Disponível: <https://doi.org/10.1029/1998JD200008>. Acesso: mar., 2024.
- Fujiwara, M.; Manney, G.L.; Gray, L.J.; Wright, J.S. (Eds.), 2022. SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) Final Report. SPARC Report, n. 10, 612p.
- Furtado, J. C.; Cohen, J.; Becker, E. J.; Collins, D. C., 2021. Evaluating the relationship between sudden stratospheric warmings and tropospheric weather regimes in the NMME phase-2 models. *Climate Dynamics* [online] 56, 2321–2338. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05591-x>. Acesso: ago., 2023.
- Gomes, M. S.; Cavalcanti, I. F. de A.; Müller, G. V., 2021. 2019/2020 drought impacts on South America and atmospheric and oceanic influences. *Weather and Climate Extremes* [online] 34. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100404>. Acesso: nov., 2023.
- Juarez, P. D.; Ramesh, A.; Hood, D. B.; Alcendor, D. J.; Valdez, R. B.; Aramandla, M. P.; Tabatabai, M.; Matthews-Juarez, P.; Langston, M. A.; Al-Hamdan, M. Z.; Nori-Sarma, A.; Im, W.; Mouton, C. C., 2022. The effects of air pollution, meteorological parameters, and climate change on COVID-19 comorbidity and health disparities: A systematic review. *Environmental Chemistry and ecotoxicology* [online] 4, 194–210. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2022.10.002>. Acesso: abril, 2024.
- King, A. D.; Butler, A. H.; Jucker, M.; Earl, N. O.; Rudeva, I., 2019. Observed Relationships Between Sudden Stratospheric Warmings and European Climate Extremes. *JGR Atmospheres* [online] 124, 24, 13943–13961. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2019JD030480>. Acesso: maio, 2024.
- Kodera, K.; Eguchi, N.; Mukougawa, H.; Nasumo, T.; Hirooka, T., 2017. Stratospheric tropical warming event and its impact on the polar and tropical troposphere. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online] 17, 615–625, 2017. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-17-615-2017>. Acesso: nov., 2023.
- Kodera, K.; Mukougawa, H.; Maury, P.; Ueda, M.; Claud, C., 2016. Absorbing and reflecting sudden stratospheric warming events and their relationship with tropospheric circulation. *JGR Atmospheres* [online] 121, 1, 80–94. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2015JD023359>. Acesso: dez., 2023.
- Kolstad, E. W.; Wulff, C. O.; Domeisen, D. I. V.; Woolings, T., 2020. Tracing North Atlantic Oscillation Forecast Errors to Stratospheric Origins. *Journal of Climate* [online] 33, 21, 9145–9157. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0270.1>. Acesso: ago., 2023.
- Kozubek, M.; Lastovicka, J.; Krizan, P., 2020. Comparison of Key Characteristics of Remarkable SSW Events in the Southern and Northern Hemisphere. *Atmosphere* [online] 11, 10. Disponível: <https://doi.org/10.3390/atmos11101063>. Acesso: ago., 2023.
- Krüger, K.; Naujokat, B.; Labitzke, K., 2005. The unusual midwinter warming in the Southern Hemisphere stratosphere 2002. *Journal of the Atmospheric Sciences* [online] 62, 3, 603–613. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JAS-3316.1>. Acesso: set., 2023.
- Lee, S. H.; Polvani, L. M.; Guan, B., 2022. Modulation of Atmospheric Rivers by the Arctic Stratospheric Polar Vortex [online] 49, 18. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2022GL100381>. Acesso: nov., 2023.
- Lehtonen, I.; Karpechko, A. Y., 2016. Observed and modeled tropospheric cold anomalies associated with sudden stratospheric warmings. *JGR Atmospheres* [online] 121, 4, 1591–1610. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2015JD023860>. Acesso: jan., 2024.
- Li, J.; Tang, Q.; Wu, Y.; Zhou, C.; Liu, Y., 2023. Ionospheric 14.5 Day Periodic Oscillation during the 2019 Antarctic SSW Event. *Atmosphere* [online] 14, 796. Disponível: <https://doi.org/10.3390/atmos14050796>. Acesso: out., 2023.
- Li, L.; Li, C.; Song, J., 2012. Arctic Oscillation anomaly in winter 2009/2010 and its impacts on weather and climate. *Science China eArth Sciences* [online] 55, 567–579. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11430-011-4329-4>. Acesso: nov., 2023.

- Lim, E.-P.; Hendon, H. H.; Bosch, G.; Hudson, D.; Thompson, D. W. J.; Dowdy, A. J.; Arblaster, J. M., 2019. Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex. *Nature Geoscience* [online] 12, 11, 896–901. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0456-x>. Acesso: ago., 2023.
- Limpasuvan [online]; Orsolini, Y. J.; Chandran, A.; Garcia, R. R.; Smith, A. K., 2016. On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online] 121, 4518–4537. Disponível: <https://doi.org/10.1002/2015JD024401>. Acesso: nov., 2023.
- Liu, M.; Hu, D.; Guan, Z., 2023. Modulation of a long-lasting extreme cold event in Siberia by a minor sudden stratospheric warming and the dynamical mechanism involved. *Climate Dynamics* [online] 60, 797–811. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06353-7>. Acesso: nov., 2023.
- Lu, C.; Ding, Y., 2013. Observational responses of stratospheric sudden warming to blocking highs and its feedbacks on the troposphere. *Chinese Science Bulletin* [online] 58, 1374–1384. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5505-4>. Acesso: jun., 2023.
- Lu, H.; Clilver, M. A.; Seppälä, A.; Hood, L. L., 2008. Geomagnetic perturbations on stratospheric circulation in late winter and spring. *Journal of Geophysical Research* [online] 113. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2007JD008915>. Acesso: mai., 2023.
- Lu, Q.; Rao, J.; Liang, Z.; Guo, D.; Luo, J.; Liu, S.; Wang, C.; Wang, T. The sudden stratospheric warming in January 2021. *Environmental Research Letters* [online] 16, 8. Disponível: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac12f4>. Acesso: ago., 2023.
- Mahfouf, J. F.; Cariolle, D.; Royer, J.-F.; Geleyn, J.-F.; Timbal, B., 1994. Response of the Météo-France climate model to changes in CO₂ and sea surface temperature. *Climate Dynamics* [online] 9, 345–362. Disponível: <https://doi.org/10.1007/BF00223447>. Acesso: out., 2023.
- Marsh, D. R.; Mills, M. E.; Kinnison, D. E.; Lamarque, J.-F.; Calvo, N.; Polvani, L. M., 2013. Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1 (WACCM). *Journal of Climate* [online] 26, 7372–7391. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-0558.1>. Acesso: out., 2023.
- Monnin, E.; Kretschmer, M.; Polichtchouk, I., 2022. The role of the timing of sudden stratospheric warmings for precipitation and temperature anomalies in Europe. *International Journal of Climatology* [online] 42, 6, 3448–3462. Disponível: <https://doi.org/10.1002/joc.7426>. Acesso: nov., 2023.
- Oehrlein, J.; Chiodo, G.; Polvani, L. M., 2019. Separating and quantifying the distinct impacts of El Niño and sudden stratospheric warmings on North Atlantic and Eurasian wintertime climate. *Atmospheric Science Letters* [online] 20, 7. Disponível: <https://doi.org/10.1002/asl.923>. Acesso: nov., 2023.
- Pacini, A. A.; Usoskin, I. G.; Mursula, K.; Echer, E.; Evangelista, H., 2015. Signature of a sudden stratospheric warming in the near-ground 7Be flux. *Atmospheric Environment* [online] 113, p. 27–31. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.04.065>.
- Park, J.; Nam, S., 2018. Interannual variability of winter precipitation linked to upper ocean heat content off the east coast of Korea. *International Journal of Climatology* [online] 38, S1, e1266–e1273. Disponível: <https://doi.org/10.1002/joc.5354>. Acesso: out., 2023.
- Parker, C. F.; Karlsson, C., 2018. The UN climate change negotiations and the role of the United States: assessing American leadership from Copenhagen to Paris. *Environmental Politics* [online] 27, 3, 519–540. Disponível: <https://doi.org/10.1080/09644016.2018.1442388>. Acesso: ago., 2023.
- Pedatella, N. M.; Chau, J. L.; Schmidt, H.; Goncharenko, L. P.; Stolle, C.; Hocke, K.; Harvey [online] L.; Funke, B.; Siddiqui, T. A., 2018. How sudden stratospheric warming affects the whole atmosphere. *Eos* [online] 99. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2018EO092441>. Acesso: jul., 2023.

- Pérot, K.; Orsolini, Y. J., 2021. Impact of the major SSWs of February 2018 and January 2019 on the middle atmospheric nitric oxide abundance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online] 218. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105586>. Acesso: ago., 2023.
- Rienecker, M. M.; Suarez, M. J.; Gelaro, R.; Todling, R.; Bacmeister, J.; Liu, E., 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications, *Journal of Climate* [online] 24, 3624–3648. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00015.1>. Acesso: jun., 2023.
- Sam, M. G.; Nwaogazie1, I. L.; Ikebude, C.; Inyang, U. J.; Irokwe1, J. O., 2023. Modeling Rainfall Intensity-Duration-Frequency (IDF) and Establishing Climate Change Existence in Uyo-Nigeria Using Non-Stationary Approach. *Journal of Water Resource and Protection* [online] 15, 5. Disponível: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2023.155012>. Acesso: jan., 2024.
- Shen, X.; Wang, L.; Osprey, S.; Hardiman, S. C.; Scaife, A. A.; Ma, J., 2022. The Life Cycle and Variability of Antarctic Weak Polar Vortex Events. *Journal of Climate* [online] 35, 6, 2079-2092. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0500.1>. Acesso: out., 2023.
- Sigmond, M.; Scinocca, J. F.; Kharin, V. V.; Shepherd, T. G., 2013. Enhanced seasonal forecast skill following stratospheric sudden warmings. *Nature Geoscience* [online] 6, 98-102. Disponível: <https://doi.org/10.1038/ngeo1698>. Acesso: set., 2023.
- Sinnhuber, M.; Berger, U.; Funke, B.; Nieder, H.; Reddmann, T.; Stiller, G.; Versick, S.; Clarmann, T. V.; Wissing, J. M., 2018. NOy production, ozone loss and changes in net radiative heating due to energetic particle precipitation in 2002–2010. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online] 18, 1115-1147. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-18-1115-2018>. Acesso: jul., 2023.
- Slater, L. J.; Thirel, G.; Harrigan, S.; Delaigue, O.; Hurley, A.; Khoaukhi, A.; Prosdocimi, I.; Vitolo, C.; Smith, K., 2019. Using R in hydrology: a review of recent developments and future directions. *Hydrology and Earth System Sciences* [online] 23, 2939-2963. Disponível: <https://doi.org/10.5194/hess-23-2939-2019>. Acesso: mar., 2023.
- Stray, N. H. Orsolini, Y. J.; Espy, P. J.; Limpasuvan, V.; Hibbins, R. E., 2015. Observations of planetary waves in the mesosphere-lower thermosphere during stratospheric warming events, *Atmospheric Chemistry and Physics* [online] 15, 4997–5005. Disponível: <https://doi.org/10.5194/acp-15-4997-2015>. Acesso: abril, 2023.
- Tian, W.; Huang, J.; Zhang, J.; Xie, F.; Wang, W.; Peng, Y., 2023. Role of Stratospheric Processes in Climate Change: Advances and Challenges. *Advances in Atmospheric Sciences* [online] 40, 8, 1379-1400. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00376-023-2341-1>. Acesso: jun., 2023.
- Thompson, D. W. J.; Baldwin, M. P.; Solomon, S., 2005. Stratosphere-troposphere coupling in the Southern Hemisphere. *Journal of the Atmospheric Sciences* [online] 62, 708–715. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JAS-3321.1>. Acesso: mar., 2023.
- Tripathi, O. P.; Baldwin, M.; Charlton-Perez, A.; Charron, M.; Eckermann, S. D.; Gerber, E.; Harrison, G.; Jackson, D. R.; Kim, B.-M.; Kuroda, Y.; Lang, A.; Mahmood, S.; Mizuta, R.; Roff, G.; Sigmond, M.; Son, S.-W., 2015. The predictability of the extratropical stratosphere on monthly time-scales and its impact on the skill of tropospheric forecasts. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* [online] 141, 987–1,003. Disponível: <https://doi.org/10.1002/qj.2432>. Acesso: mar., 2023.
- Winters, A. C.; Attard, H. E., 2022. North Pacific and North Atlantic Jet Covariability and Its Relationship to Cool Season Temperature and Precipitation Extremes. *Weather and Forecasting* [online] 37, 9, 1581-1600. Disponível: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-21-0203.1>. Acesso: jun., 2023.
- Wu, H.; Cui, H.; Fu, C.; Li, R.; Qi, F.; Liu, Z.; Yang, G.; Xiao, K.; Qiao, M., 2024. Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. *Science of The Total Environment* [online]909. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168627>. Acesso: abril, 2024.
- Wu, Y.; Li, X.; Yu, L.; Wang, T.; Wang, J.; Liu, T., 2022. Review of soil heavy metal pollution in China: Spatial distribution, primary sources, and remediation alternatives. *Resources, Conservation and Recycling* [online] 181. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106261>. Acesso: mar., 2023.

- Yoon, D.; Cha, D.-H.; Lee, M.-I.; Min, K.-H.; Kim, J.; Jun, S.-Y.; Choi, Y., 2020. Recent changes in heatwave characteristics over Korea. *Climate Dynamics* [online] 55, 1685-1696. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05420-1>. Acesso: maio, 2023.
- Yu, Y.; Li, Y.; Ren, R.; Cai, M.; Guan, Z.; Huang, W., 2022. An Isentropic Mass Circulation View on the Extreme Cold Events in the 2020/21 Winter. *Advances in Atmospheric Sciences* [online] 39, 643-657. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1289-2>. Acesso: maio, 2023.
- Zhang, X.; Fu, Y.; Han, Z.; Overland, J. E.; Rinke, A.; Tang, H.; Vihma, T.; Wang, M., 2022a. Extreme Cold Events from East Asia to North America in Winter 2020/21: Comparisons, Causes, and Future Implications. *Advances in Atmospheric Sciences* [online] 39, 553-565. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1229-1>. Acesso: abril, 2023.
- Zhang, M.; Yang, X.-Y.; Huang, Y., 2022b. Impacts of Sudden Stratospheric Warming on Extreme Cold Events in Early 2021: An Ensemble-Based Sensitivity Analysis. *Geophysical Research Letters* [online] 49, 2. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2021GL096840>. Acesso: abril, 2023.