



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**IMPACTO DOS AEROSSÓIS ESTRATOSFÉRICOS  
NAS PROJEÇÕES DA CLIMATOLOGIA DO  
ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL**

---

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**

**Thales Chile Baldoni**

**Itajubá, MG, Brasil**

**2023**

# IMPACTO DOS AEROSSÓIS ESTRATOSFÉRICOS NAS PROJEÇÕES DA CLIMATOLOGIA DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL

---

por

**Thales Chile Baldoni**

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas.**

Orientador: [Michelle Simões Reboita](#)

Itajubá, MG, Brasil  
2023

**Universidade Federal de Itajubá  
Instituto de Recursos Naturais  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a  
Monografia

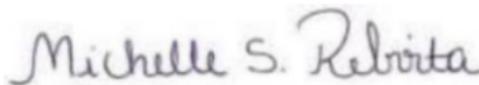
**IMPACTO DE AEROSSÓIS ESTRATOSFÉRICOS NAS PROJEÇÕES  
DA CLIMATOLOGIA DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO  
ATLÂNTICO SUL**

elaborada por

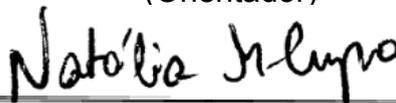
**Thales Chile Baldoni**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Bacharel em Ciências Atmosféricas**

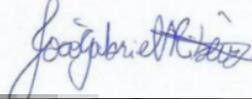
**Comissão Examinadora:**



**Michelle Simões Reboita, Dr.** (Universidade Federal de Itajubá)  
(Orientador)



**Natália Machado Crespo, Dr.** (Universidade de Praga)



**João Gabriel Martins Ribeiro** (Universidade Federal de Itajubá)

Itajubá, 02 de novembro de 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, em especial a minha mãe, que sempre fez o possível para me proporcionar as melhores oportunidades e apoio durante essa jornada acadêmica. Também gostaria de agradecer ao meu irmão e ao restante da minha família, cujo incentivo foi fundamental para terminar minha graduação.

Minha profunda gratidão ao Matheus, que tem sido um pilar fundamental em minha vida. Seu apoio constante, compreensão e amor incondicional foram um impulso incrível para mim durante esse período e sou muito grato por tê-lo ao meu lado. Além disso, aos meus amigos Pedro, Rafael e Guilherme, que não apenas me apoiaram academicamente, mas também tornaram esta jornada desafiadora engraçada e descontraída, criando memórias preciosas que levarei para o resto da minha vida.

Também gostaria de reconhecer e agradecer profundamente à minha orientadora Dra. Michelle, cuja orientação, paciência e oportunidades incríveis moldaram meu crescimento acadêmico e me proporcionaram aprendizados valiosos. Além disso, quero estender meu agradecimento ao restante do corpo docente, que contribuiu significativamente para minha formação.

A todas as pessoas importantes que fazem parte da minha jornada. Vocês são os pilares que sustentam minha trajetória e a inspiração que alimenta minha busca pela excelência. Obrigado por fazerem parte deste capítulo significativo da minha vida.

“Em cada sonho de verão, noite eterna e juventude, encontramos nossa própria melodia.” - Lana Del Rey.

## **RESUMO**

Monografia de Graduação  
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

### **IMPACTO DE AEROSSÓIS ESTRATOSFÉRICOS NAS PROJEÇÕES DA CLIMATOLOGIA DO ANTICICLONE SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL**

AUTOR(A): THALES CHILE BALDONI  
ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA  
Local e Data da Defesa: Itajubá, XX de novembro de 2023.

A geoengenharia surgiu com a finalidade de encontrar meios para contornar o aquecimento de temperatura do planeta devido a mudanças climáticas, a partir de determinadas técnicas, como a injeção de aerossóis estratosféricos. Dessa forma, o presente estudo, investigou a influência desses aerossóis no Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Foram utilizados a pressão ao nível médio do mar (PNMM) de três conjuntos de projeções climáticas (GeoMIP, GLENS e ARISE-SAI), no período de 2040-2059, analisados em cenários com e sem a presença de aerossóis estratosféricos. Embora os modelos tenham apresentado padrões sazonais semelhantes, foi mostrado variações significativas na posição e intensidade do ASAS em resposta a injeção de aerossóis, com diferença entre os conjuntos. O estudo revelou a sensibilidade do ASAS em cenários futuros com a técnica de geoengenharia e a importância de considerar esses fatores na modelagem climática para as projeções futuras e a necessidade contínua de aprimorar os modelos climáticos para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Geoengenharia. Mudanças Climáticas. Projeções Climáticas.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Localização no globo das áreas em que ocorreram injeção de aerossol atmosférico do GeoMIP, GLENS e ARISE SAI.....	16
FIGURA 2 - Climatologia mensal do ponto de grade de maior valor de PNMM e sua posição geográfica do (a) GeoMIP (controle e experimento); (b) GLENS (controle e experimento) e (c) ARISE-SAI (controle e experimento).....	19
FIGURA 3 - Climatologia mensal do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.....	20
FIGURA 4 - Climatologia mensal da latitude do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2049.....	21
FIGURA 5 - Climatologia mensal da longitude do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2049.....	22
FIGURA 6 - Climatologia sazonal da pressão ao nível médio do mar (hPa), no período de 2040 a 2059, dos conjuntos: GeoMIP controle (a,b,c,d); GeoMIP experimento (m,n,o,p); GLENS controle (e,f,g,h); GLENS experimento (q,r,s,t); ARISE-SAI (i,j,k,l) e ARISE-SAI experimento (u,v,w,x).....	24
FIGURA 7 - Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o GeoMIP, no período 2040 a 2059.....	25
FIGURA 8 - Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o GLENS, no período 2040 a 2059.....	25
FIGURA 9 - Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o ARISE-SAI, no período 2040 a 2059.....	26
FIGURA 10 - Climatologia sazonal da isóbara de 1020 hPa nos períodos de 2040 a 2059., na cor azul o grupo controle e vermelho o grupo do experimento.....	28

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Informações sobre o modelo, período utilizado, cenário das simulações.....	15
TABELA 2 - Teste t emparelhado entre os conjuntos de controle e experimento, dos valores mensais do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.....	20
TABELA 3 - Teste t emparelhado entre os conjuntos de controle e experimento, dos valores climatológicos mensais da longitude e latitude dos pontos de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.....	22
TABELA 4 - Climatologia sazonal do ponto de maior valor de PNMM e a sua localização de lat e lon nos períodos de 2040 a 2059.....	27
TABELA 5 - Área sazonal da isóbara de 1020 hPa, em km <sup>2</sup> , do período de 2040 a 2059.....	29

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ARISE-SAI – *The Assessing Responses and Impacts of Solar climate intervention on the Earth system with stratospheric aerosol injection*

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

ASPS– Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul

CEMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project*

CESM1 – *Community Earth System Model*

CESM2 – *Community Earth System Model version 2*

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub>– Dióxido de carbono

GEEs – Gases de efeito estufa

GeoMIP – *Geoengineering Model Intercomparison Project*

GLENS – *Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble*

IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

NO<sub>2</sub>– Óxido nitroso

OAS – Oceano Atlântico Sul

PNMM – Pressão ao nível médio do mar

RCPs – *Representative Concentration Pathways*

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

SSPs – *Shared Socioeconomic Pathways*

WACCM – *Whole Atmosphere Community Climate Model*

WACCM6 – *Whole Atmosphere Community Climate Model version 6*

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>14</b>
2.1. Descrição da área de estudo	14
2.2. Dados	14
2.2 Localização do Centro do ASAS	16
2.3 Análises	17
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>18</b>
3.1 Análise do maior valor de PNMM do ASAS	18
3.2 Análise da distribuição espacial sazonal do ASAS	23
<b>4. CONCLUSÃO</b>	<b>30</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b>	<b>31</b>
<b>6. ANEXOS</b>	<b>36</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A maioria das alterações observadas no clima da Terra, desde o início da revolução industrial, está associada às atividades humanas (IPCC 2021). Com o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), seja pela queima sem precedentes de combustíveis fósseis ou pelas mudanças no uso do solo, como o desflorestamento, há um aumento das temperaturas do planeta (KUNDZEWICZ, 2008). Os GEEs mais emitidos globalmente são, respectivamente, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{NO}_2$ ) (NONG et al., 2021).

De acordo com o sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC (IPCC, 2021), o tempo de permanência dos GEEs na atmosfera varia: o  $\text{CO}_2$  possui um dos maiores tempos de permanência, da ordem de séculos a milênios; por outro lado, gases como o  $\text{CH}_4$  e o  $\text{NO}_2$  possuem tempos de permanência menores. Por isso, mesmo que todas as emissões hoje fossem reduzidas a zero, o aquecimento global ainda iria continuar por várias décadas. Portanto, alternativas para contornar os problemas de efeito estufa têm sido pensadas, como as técnicas de geoengenharia.

A geoengenharia surgiu com a finalidade de encontrar soluções para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas (ZHONGMING et al., 2011). É válido salientar que a geoengenharia difere da mitigação (BELAIA et al., 2021; KEITH, 2000). Enquanto a geoengenharia busca corrigir o desequilíbrio radiativo do sistema climático através de técnicas, como a redução da radiação solar incidente ou a remoção de  $\text{CO}_2$  da troposfera (VAUGHAN; LENTON, 2011), a mitigação corresponde a medidas e estratégias para tentar reduzir as emissões de GEEs (FAWZY et al., 2020).

De acordo com Vaughan e Lenton (2011), propostas que controlam o gerenciamento de radiação solar são as mais eficientes, embora tenham uma vida útil limitada, enquanto que as medidas de diminuição de  $\text{CO}_2$  se tornam cada vez mais eficazes à medida que são mantidas. Lenton e Vaughan (2009) argumentaram que um dos métodos mais eficazes da geoengenharia é o uso de aerossóis de sulfatos estratosféricos. Segundo eles, a implementação dessa abordagem não acarretaria em altos custos significativos em comparação com as medidas de mitigação impostas pelo IPCC (IPCC, 2021; ROBOCK et al., 2009). Entretanto, os aerossóis de sulfato podem ter efeitos adversos no sistema climático que ainda são

desconhecidos. Kravitz (2011) alega que a injeção de sulfatos na atmosfera pode causar alterações do ciclo hidrológico devido ao aumento da ocorrência de chuvas ácidas. Outros fatores, como a potencial depleção do Ozônio ( $O_3$ ) estratosférico são também mencionadas na literatura (BERDAHL et al., 2014; ZHAO et al., 2017; VISIONI et al., 2023). Portanto, para tomadas de decisões a respeito do clima futuro, é de fundamental importância compreender a intensidade e os padrões de resposta do sistema climático diante das intervenções da geoengenharia, e a modelagem climática tem um papel crucial nessa temática (KRAVITZ et al., 2011).

Há três projetos internacionais que fizeram simulações injetando aerossóis na estratosfera e os disponibilizam para a comunidade científica: *Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble* (GLENS; TILMES et al., 2018); *Earth system with Stratospheric Aerosol Injection* (ARISE-SAI; RICHTER et al., 2022) e *Geoengineering Model Intercomparison Project* (GeoMIP; KRAVITZ et al., 2011). Esses experimentos diferem pelo período simulado e pela região do globo em que os aerossóis são introduzidos (IRVINE et al., 2016).

As quantidades de aerossóis estratosféricos necessários para atingir o objetivo de diminuir a temperatura média global depende do tamanho dessas partículas e do seu local de injeção (VAUGHAN; LENTON, 2011). De acordo com Stenchikov et al. (1998) as menores partículas, com raio de  $0,1 \mu m$ , são as mais eficientes, pois não têm impacto na radiação de onda longa, diferente das partículas maiores que absorvem e emitem radiação de onda longa. O tempo de permanência e a cobertura global dos aerossóis estratosféricos são potencializados quando a injeção ocorre na camada inferior da estratosfera sobre as regiões tropicais (OMAN et al., 2005; RASCH et al., 2008).

Alguns estudos já têm analisado tais simulações e verificado que, em cenários futuros, a temperatura média global voltaria aos padrões próximos das séries históricas de temperatura com as injeções de aerossóis estratosféricos na atmosfera e esse tempo é determinado pela quantidade dos aerossóis injetado e a frequência dessa injeção (DA-ALLADA et al., 2020; KUSWANTO et al., 2022; PINTO et al., 2020). No entanto, há uma escassez de estudos para compreender o impacto dos aerossóis estratosféricos nos sistemas atmosféricos como, por exemplo, no Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

O ASAS é um dos três anticiclones semipermanentes do hemisfério sul. Os anticiclones são sistemas de alta pressão localizados entre  $20$  a  $40^\circ$  de latitude

(CHERCHI et al., 2018). Essas altas subtropicais desempenham um papel fundamental no sistema climático, uma vez que têm impacto direto na formação dos desertos subtropicais (MIYASAKA; NAKAMURA, 2010). Esses sistemas são caracterizados por movimentos subsidentes do ar, que inibem a formação das nuvens convectivas e limitam a disponibilidade de umidade para o desenvolvimento dos sistemas de baixa pressão, resultando em condições mais secas e estáveis nas áreas por eles influenciadas (DA FRANCA, 2009; HE et al., 2017).

A formação das altas subtropicais está associada, principalmente, à subsidência da célula de Hadley (REBOITA et al., 2019), mas também há suporte de mecanismos como: inter-relações entre o oceano e a atmosfera (SEAGER et al., 2003) e, durante o verão, as monções sobre os continentes adjacentes causam subsidência sobre o oceano (RODWELL, 2001; LIU et al., 2004).

O ASAS se localiza no oceano Atlântico Sul e, durante o inverno, se expande para oeste atingindo o setor leste do Brasil. Assim, desempenha um papel importante no clima dessa região, pois interfere diretamente na temperatura da superfície do mar, precipitação e nas regiões de convergência atmosférica no sudeste da América do Sul (CHERCHI et al., 2018; SUN et al., 2017). Em suma, a variabilidade sazonal do ASAS no inverno contribui para condições mais secas e, no verão, com sua retração para o oceano, para condições mais úmidas no sudeste brasileiro (REBOITA et al., 2019).

Em uma perspectiva de mudanças climáticas, há poucos estudos que analisam as características do ASAS no clima futuro. De acordo com Reboita et al. (2019), as mudanças projetadas para o ASAS, devido a sua expansão ao sul e oeste e o deslocamento do seu núcleo para o sul, poderão ter impactos no deslocamento das zonas secas e influências negativas na agricultura, energia e saúde da população.

Como nenhum trabalho ainda avaliou o impacto da injeção de aerossóis na atmosfera na climatologia do ASAS, o presente estudo, tem como objetivo, analisar o impacto do aumento da concentração de aerossóis na estratosfera em projeções da climatologia do ASAS.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição da área de estudo

A área de estudo abrange o Oceano Atlântico Sul (OAS). Entretanto, o oceano Pacífico também é mostrado para auxiliar no entendimento de propagação de ondas na atmosfera e na interação entre os diferentes tipos de sistemas climáticos, pois permite ter uma visão abrangente e integrada das complexas interações entre o ASAS e outros fenômenos.

### 2.2. Dados

Foram utilizados dados de pressão ao nível médio do mar (PNMM) de três projetos de modelagem climática (GLENS, ARISE-SAI e GeoMIP). Cada conjunto é composto de uma simulação controle e de um experimento, que é o que inclui a injeção de aerossóis na atmosfera.

Os modelos utilizados nos experimentos (descritos abaixo) consideram os cenários de mudanças climáticas *Representative Concentration Pathways* (RCPs) desenvolvidos pelo IPCC como parte do Quinto Relatório de Avaliação e os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) do sexto relatório. Os RCPs são representados por números que indicam a magnitude estimada do forçamento radiativo devido às emissões de GEEs até o ano de 2100, sendo o RCP8.5, em particular, o pior cenário possível, com altas taxas de emissões de GEEs (VAN VUUREN et al., 2011). Os SSPs retratam diferentes trajetórias socioeconômicas globais, considerando o desenvolvimento sustentável, rivalidade regional, desigualdade, desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis e desenvolvimento intermediário (RIAHI, 2017).

O primeiro conjunto de dados foi obtido do projeto *Stratospheric Aerosol Geoengineering Large Ensemble* (GLENS; TILMES et al., 2018). Nesse projeto, o modelo utilizado é o *Community Earth System Model* (CESM1), que é acoplado ao *Whole Atmosphere Community Climate Model* (WACCM) como componente atmosférico para simular os efeitos dos aerossóis de sulfato estratosférico na atmosfera. Na projeção controle, o GLENS utiliza um cenário de alta emissão antropogênica, o RCP8.5 (TILMES et al., 2018), no período de 2015 a 2100. Na projeção experimento, são injetados aerossóis de sulfato estratosférico, em quatro localidades diferentes (30°S, 15°S, 15°N e 30°N), em um único ponto de grade (Fig. 1) com a altitude fixa de, aproximadamente, 5 km acima da tropopausa. Mais

detalhes dos dados e das simulações realizadas são apresentados em Tilmes et al. (2018).

O segundo conjunto utilizado é o *The Assessing Responses and Impacts of Solar climate intervention on the Earth system with stratospheric aerosol injection* (ARISE-SAI; Richter et al., 2022). O modelo utilizado nesse conjunto é o *Community Earth System Model version 2* (CESM2; DANABASOGLU et al., 2020), que é acoplado com *Whole Atmosphere Community Climate Model version 6* (WACCM6; GETTELMAN et al., 2019) como componente atmosférico. Na projeção controle, foram utilizadas as simulações de 2015 a 2069 considerando o SSP2-4.5 como cenário intermediário de emissão de GEEs. Na projeção experimento, dióxido de sulfúrico (SO<sub>2</sub>) foi injetado em quatro localidades diferentes (30°S, 15°S, 15°N e 30°N), em um único ponto de grade (Fig. 1) com a altitude fixa de, aproximadamente, 5 km acima da tropopausa. Mais detalhes dos dados e das simulações realizadas são apresentados em Richter et al. (2022).

Por fim, o último conjunto de dados utilizados é o *Geoengineering Model Intercomparison Project* (GeoMIP; KRAVITZ et al., 2011) acoplado com a quinta fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP6; HURRELL et al., 2011). Para o grupo controle, foram realizadas simulações de 2015 a 2100 e o cenário intermediário SSP2-4.5. No grupo de experimentos, foi empregado o projeto *G6sulfur* do GeoMIP, que representa um cenário futuro de alto forçamento radiativo (SSP5-8.5), com a redução para um cenário de médio forçamento, por meio do uso de técnicas de injeção de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) em uma faixa entre 10°N e 10°S (Fig. 1) entre 18 e 20 km de altitude (VISIONI et al., 2023), em 0° de longitude. Mais detalhes dos dados e das simulações realizadas são apresentados em Kravitz et al. (2011).

Tabela 01 - Informações sobre o modelo, período utilizado, cenário das simulações.

Projeto	Modelo	Período usado	Cenário
GLENS - controle	CMIP5	2020-2099	RCP8.5
GLENS - experimento	CMIP5	2020-2099	RCP8.5
ARISE-SAI -	CMIP6	2040-2059	SSP2-4.5

controle			
ARISE-SAI - experimento	CMIP6	2040-2059	SSP2-4.5
GeoMIP- controle	CMIP6	2020-2099	SSP2-4.5
GeoMIP- experimento	CMIP6	2020-2099	SSP2-4.5

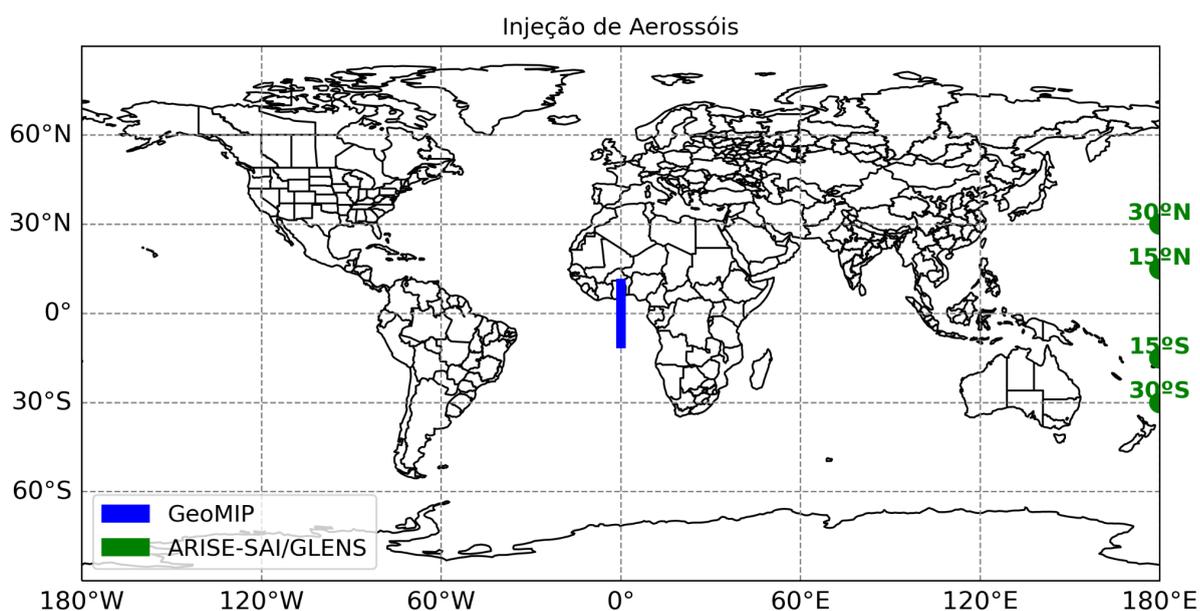


Figura 1: Localização no globo das áreas em que ocorreram injeção de aerossol atmosférico do GeoMIP, GLENS e ARISE-SAI.

## 2.2 Localização do Centro do ASAS

A identificação da posição central do ASAS usa o método descrito em Reboita et al. (2019). Nesse método, inicialmente, define-se a área entre 40° S - 20° S e 42° O - e 12° L para fazer uma varredura nos pontos de grade a fim de encontrar os maiores valores de PNMM. Isso é realizado através do método do vizinho mais próximo, em que um ponto de grade é selecionado e comparado com os 48 pontos vizinhos, seguindo os passos do algoritmo: (1) um ponto de grade é considerado candidato a ser o núcleo do ASAS se a sua PNMM for maior ou igual a dos primeiros 8 pontos vizinhos e maior que os outros 40 pontos ao redor; (2) se existir mais de um ponto de grade com o mesmo valor máximo da PNMM, o ponto de grade em latitude mais baixa é escolhido para ser o centro do ASAS. Entretanto, diferente de Reboita et al. (2019), a localização do ASAS foi realizada numa série temporal de pêntricas ao invés de dados mensais. A metodologia fornece, para cada pêntrica

(total de 73 pântadas por ano), a latitude, longitude e pressão central do ASAS. Após, foram realizadas médias climatológicas sazonais e mensais.

### **2.3 Análises**

Para avaliar as possíveis alterações no ASAS no clima futuro, sobre a influência ou não das técnicas de geoengenharia associadas com a injeção de aerossóis estratosféricos, é apresentada a distribuição espacial da PNMM por estação do ano, de cada modelo, considerando os períodos: 2020-2039; 2040-2059; 2060-2079 e 2080-2099. Para o modelo ARISE-SAI só será mostrado o período de 2040-2059 pela limitação da disponibilidade de dados. Após, é computada a diferença entre os experimentos e a simulação controle (sem injeção de SO<sub>2</sub>), considerando somente o período de 2040-2059.

Para uma análise mais detalhada da distribuição espacial do ASAS, foram gerados mapas sazonais com a localização da isóbara de 1020 hPa. A partir dessa informação, foi criado um algoritmo para o cálculo, no qual, considerou-se apenas os pontos de grade dentro da isóbara de 1020 hPa. Após, foi realizada a conversão, multiplicando por 111,32, para encontrar o valor da área em quilômetros quadrados (km<sup>2</sup>).

Também foi avaliada a posição climatológica mensal e o maior valor da PNMM, considerando o período de 2040-2059 do ASAS em cada projeção através de gráficos. O teste t emparelhado será utilizado em algumas análises para indicar se as diferenças entre o experimento e a simulação controle possuem significância estatística (WILKS, 2011).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise do maior valor de PNMM do ASAS

Para obter uma melhor visualização da variação mensal espacial da posição central do ASAS, que é representado pelo ponto de grade com o maior valor de PNMM, foram construídos gráficos (Figura 2), similares aos de Reboita et al. (2019). Estes gráficos mostram os padrões anuais da variação do ASAS, seguindo exemplos na literatura, conforme foi descrito por Reboita et al. (2019). Nos meses mais frios do ano (junho, julho e agosto), a posição central do ASAS está recuada para uma longitude em direção ao continente sul-americano, recuando mais em direção ao continente durante esses meses, em relação aos outros meses do ano (HASTENRATH, 2012; MÄCHEL et al., 1998). Na literatura, conforme descrito por Sun et al. (2017), a variabilidade longitudinal do ASAS é em torno de  $14^\circ$  durante os meses do ano, enquanto que a variabilidade latitudinal é de  $6^\circ$ .

Uma observação interessante na Figura 2 é referente a intensidade de deslocamento entre os modelos. O GeoMIP (Fig. 2a) é o modelo que mostra o ASAS mais deslocado para oeste, tanto o controle quanto o experimento, e sendo o GLENS (Fig 2b) o conjunto que menos retrocedeu em direção ao continente nos meses de inverno.

Ademais, é possível notar que no GeoMIP (Fig. 2a), tanto controle quanto no experimento, apresentam uma distribuição anual praticamente idêntica, o qual pode ser atribuída à utilização da técnica de injeção de  $\text{SO}_2$ . Diferente dos outros dois modelos que realizaram a injeção  $\text{SO}_2$  em pontos de grade específicos ao redor do globo (TILMES et al., 2018; Richter et al., 2022), o GeoMIP adotou uma abordagem distinta ao injetar o  $\text{SO}_2$  em uma faixa contínua entre uma latitude de  $10^\circ\text{N}$  e  $10^\circ\text{S}$  (Fig 1; VISIONI et al., 2023). A abordagem do GeoMIP pode levar a uma distribuição mais ampla e uniforme da dispersão do  $\text{SO}_2$  na atmosfera, conseguindo cobrir uma área maior no globo em comparação com os modelos que utilizam a injeção do aerossol em pontos específicos. Conseqüentemente, devido à maior dispersão do  $\text{SO}_2$ , é possível ter um impacto maior nos padrões de circulação atmosférica (KRAVITZ et al., 2013). Entretanto, é válido ressaltar que a injeção de aerossóis de uma forma longitudinal contínua pode não conseguir ressaltar os efeitos locais quando o  $\text{SO}_2$  é injetado em pontos precisos, já que esses efeitos locais são cruciais para compreender as interações atmosféricas regionais (PATEL et al., 2023).

Ademais, Kravitz et al. (2017) alega que a injeção em pontos estratégicos de  $\text{SO}_2$  pode reduzir efeitos colaterais simulados pelo GeoMIP, ao inserir aerossol de forma uniforme em todas as latitudes.

No GeoMIP (Fig. 2a), em ambas as projeções, a variação longitudinal foi de, aproximadamente,  $18,4^\circ$  e a latitudinal de  $7,5^\circ$ . No GLENS (Fig. 2b), no controle, a variação longitudinal foi de aproximadamente  $10,7^\circ$ , enquanto a variação latitudinal foi de  $6,2^\circ$ . Por outro lado, no experimento com aerossol os valores apresentaram uma ligeira diferença, com uma variação longitudinal de  $11,1^\circ$  e latitudinal de  $5,3^\circ$ . No ARISE-SAI, o cenário controle mostrou uma variação longitudinal de  $15^\circ$  e latitudinal de  $7^\circ$ , ao contrário do cenário do experimento, que registrou variação longitudinal de  $14^\circ$  e  $7,5^\circ$  latitudinalmente.

É notável que o GLENS, entre os outros dois conjuntos, apresentaram a maior diferença entre o cenário controle e experimento (Fig. 2b), com uma variação significativa nas projeções latitudinais e longitudinais entre os cenários. Em seguida, no ARISE-SAI (Fig. 2c), também foi possível observar variações consideráveis, entretanto, ligeiramente menores do que as do GLENS. Por fim, no GeoMIP, as variações longitudinais e latitudinais entre o controle e experimento foram mínimas.

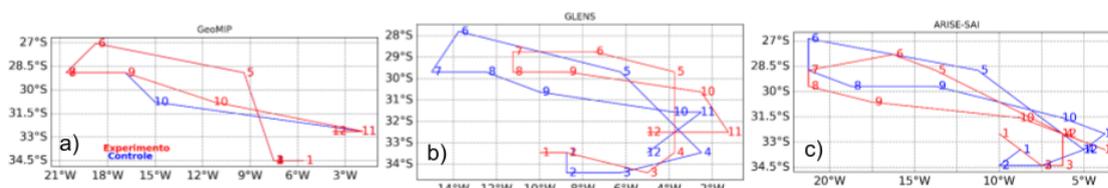


Figura 2: Climatologia mensal do ponto de grade de maior valor de PNMM e sua posição geográfica do (a) GeoMIP (controle e experimento); (b) GLENS (controle e experimento) e (c) ARISE-SAI (controle e experimento).

Na Figura 3, é apresentada a climatologia mensal do ponto de maior PNMM do ASAS. Os modelos seguem o mesmo padrão retratado na literatura por Mächel et al. (1998) e Reboita et al. (2017). A pressão central do ASAS é menor de dezembro a abril, em torno de 1021 hPa, e maior nos meses mais frios do ano, sendo sua máxima intensidade em agosto, com valores em torno de 1027 hPa, com exceção do ARISE-SAI com injeção de aerossol, que simula o valor mais intenso no mês de setembro (1028 hPa). O GeoMIP, entre os conjuntos, é o que apresenta os menores valores quando o ASAS atinge sua maior intensidade (controle 1026,5 hPa e experimento 1026 hPa). Em contrapartida, o ARISE-SAI é o que demonstra os maiores valores de pressão (controle 1027,5 hPa e experimento 1028 hPa). O

GLENS apresentou a maior amplitude de diferença entre os cenários, sendo 1027,5 hPa no controle e 1026 hPa no experimento.

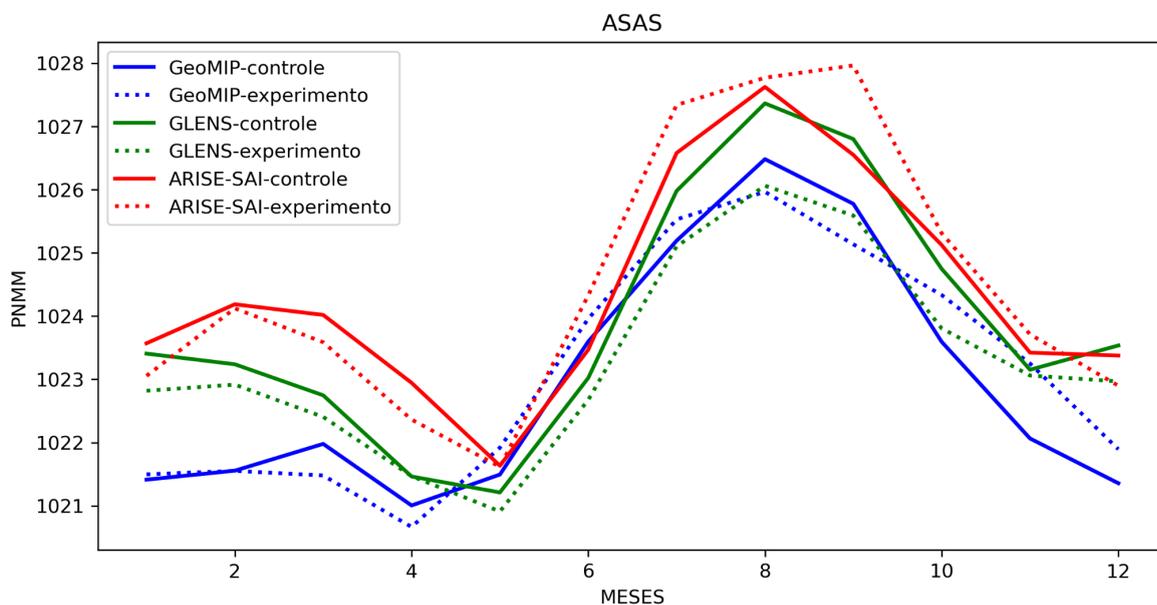


Figura 3: Climatologia mensal do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.

Na Tabela 2 é mostrado o *t-Test* emparelhado entre o conjunto controle e seu respectivo experimento. A partir dos resultados obtidos, é possível inferir se existem diferenças significativas entre os cenários sem e com a injeção de aerossóis. A estatística *t* informa o tamanho da diferença entre o cenário com geoengenharia e sem a inserção dos aerossóis em relação a variabilidade presente nos conjuntos e, com base no valor *p*, conclui se existe ou não essas diferenças significativas (LOPES et al., 2015).

No GeoMIP e ARISE-SAI, é possível analisar que os resultados apresentados não são estatisticamente significativos, pois como o valor de *p* é maior que 0,05 (0,409 no GeoMIP e 0,483 no ARISE-SAI), sugerindo uma diferença não muito acentuada entre o controle e o experimento. Em contrapartida, no GLENS, o valor de *p* é baixo (0,001), dessa forma, a diferença entre o controle e o experimento é significativa.

Tabela 02 - Teste *t* emparelhado entre os conjuntos de controle e experimento, dos valores mensais do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.

<b>GeoMIP</b>	
Estatística <i>t</i>	-0,856
Valor <i>p</i>	0,409
<b>GLENS</b>	
Estatística <i>t</i>	4,689
Valor <i>p</i>	0,001
<b>ARISE-SAI</b>	
Estatística <i>t</i>	-0,725
Valor <i>p</i>	0,483

Na Figura 4 são apresentadas, em uma climatologia mensal, as latitudes dos pontos de maior pressão do ASAS dos modelos, no período de 2040 a 2059. No período de inverno, conforme descrito por Degola (2013), o ASAS atinge sua posição mais ao norte ( $-28^\circ$ ). Em relação aos modelos analisados, todos concordam com o resultado do autor. O ARISE-SAI controle é o conjunto que menos desloca-se sua posição ao norte ( $-27^\circ$ ), em contrapartida, o GeoMIP experimento apresentou a maior intensidade de deslocamento.

No ARISE-SAI e GLENS, os cenários que apresentaram as injeções, mostraram um deslocamento mais ao norte ( $-28^\circ$  no ARISE-SAI e  $-29^\circ$  no GLENS) em comparação com os cenários controle ( $-27^\circ$  no ARISE-SAI e  $-28^\circ$  no GLENS). Ademais, o conjunto GeoMIP não apresentou mudanças da latitude entre os cenários de experimento e controle, ambos com valores de  $-26,8^\circ$ .

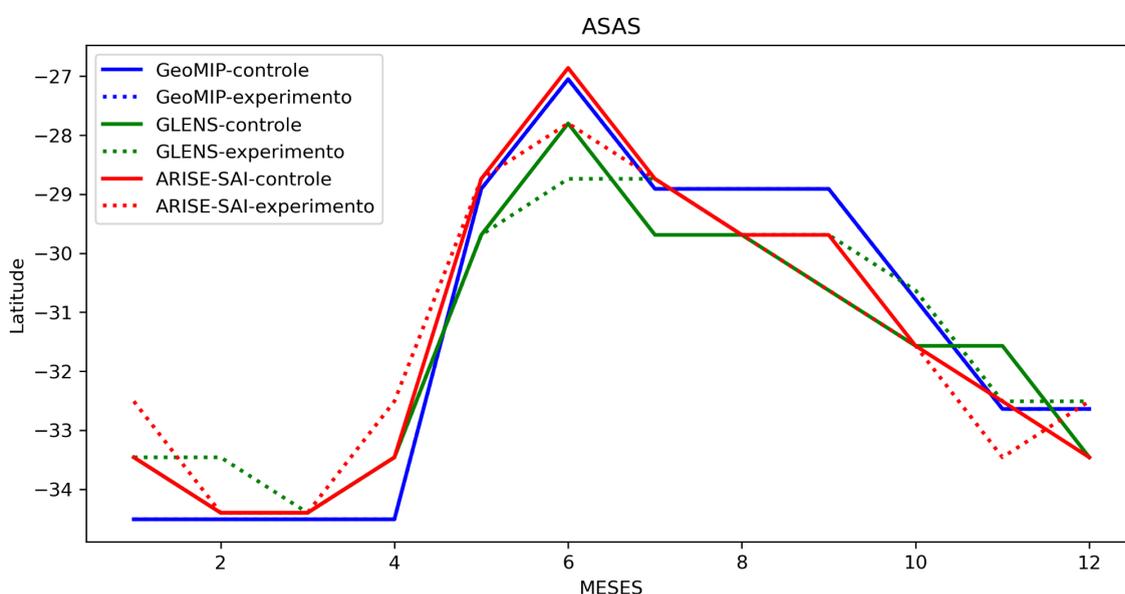


Figura 4: Climatologia mensal da latitude do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2049.

Na Figura 5 são apresentadas, em uma climatologia mensal, as longitudes dos pontos de maior pressão do ASAS dos modelos, no período de 2040 a 2059. Nos períodos de inverno, conforme descrito por Degola (2013), o ASAS atinge sua posição mais ao oeste ( $-11^\circ$ ). Nas projeções dos modelos analisados, todos apresentam esse padrão. No GLENS, com a injeção de aerossol, deslocou-se com uma intensidade menor para oeste ( $-10^\circ$ ) em relação ao controle ( $-13^\circ$ ). No ARISE-SAI e GeoMIP, mostraram a mesma intensidade de deslocamento para oeste ( $-21^\circ$  no ARISE-SAI e  $-20^\circ$  no GeoMIP).

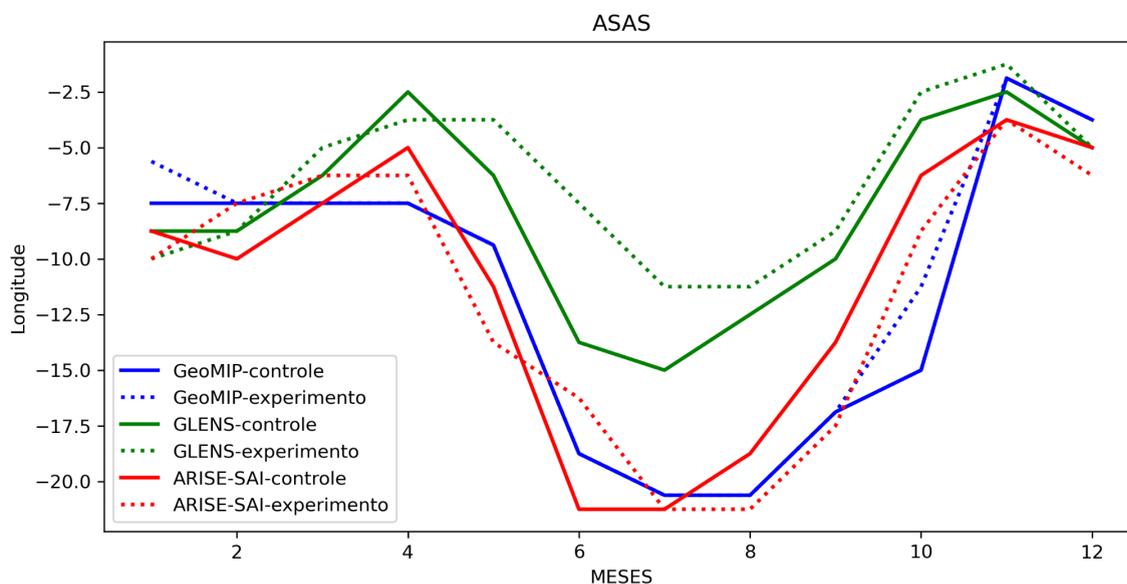


Figura 5: Climatologia mensal da longitude do ponto de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2049.

Na Tabela 3 é mostrado o *t-test* emparelhado entre os modelos controle e seu respectivo experimento das coordenadas de latitude e longitude do ponto de maior de pressão (hPa) do ASAS. É importante observar que, no conjunto GeoMIP, não foi incluído o valor de *p* para a latitude, uma vez que ambos os cenários compartilham os mesmos pontos de latitude.

No GeoMIP e ARISE-SAI, os valores de *p* são maiores que 0,05 (0,190 no GeoMIP e 0,480 no ARISE-SAI) demonstrando que não possuem muita diferença estatisticamente significativas entre o cenário com ou sem injeção de aerossol. No entanto, ao considerar o conjunto GLENS, observamos um valor de *p* baixo, apenas 0,046. Esse valor indica que os cenários neste conjunto apresentam diferenças estatisticamente significativas entre si.

Tabela 03 - Teste *t* emparelhado entre os conjuntos de controle e experimento, dos valores climatológicos mensais da longitude e latitude dos pontos de maior pressão (hPa) do ASAS, no período de 2040 a 2059.

	Latitude	Longitude
GeoMIP		
Estatística <i>t</i>	--	-1,393842706
Valor <i>p</i>	--	0,1908832696
GLENS		
Estatística <i>t</i>	-1,154100587	-2,238477534
Valor <i>p</i>	0,272917310	0,04682598998
ARISE-SAI		
Estatística <i>t</i>	-0,008257697	0,7307397502
Valor <i>p</i>	0,799355925	0,4802135821

### 3.2 Análise da distribuição espacial sazonal do ASAS

A Figura 6 mostra o campo sazonal da PNMM obtido por meio das projeções considerando os cenários com (experimento) e sem injeção (controle) de aerossóis na estratosfera. Em todos os conjuntos é mostrada a média calculada entre os anos de 2040 a 2059.

O ASAS, no período de verão (DJF), possui formato circular de acordo com as isóbaras mostradas na Figura 6a, e, i, m, q, u. No outono (MAM), o anticiclone começa a perder sua característica circular e se expande em direção ao continente sul americano (Fig. 6b, f, j, n, r, v), atingindo sua maior extensão sobre o continente durante os meses de inverno (JJA, Fig. 6c, g, k, o, s, w). Por fim, o ASAS enfraquece e retrai para leste durante a primavera (SON, Fig. 6d, h, l, p, t) (SUN et al., 2017; REBOITA et al., 2019).

Dessa forma, tanto a simulação controle quanto experimento, mostraram padrões semelhantes da configuração espacial do ASAS descrita, por exemplo, em Sun et al. (2017) e Reboita et al. (2019). É importante lembrar que o ASAS é um dos sistemas que inibe a convecção e a passagem dos sistemas frontais na região sudeste do Brasil, afetando os padrões de precipitação dessa mesma região (REBOITA et al., 2010; SILVA et al., 2017; REBOITA et al., 2014).

Na Figura 6, sobre a região do Oceano Pacífico, é possível identificar também a variação sazonal do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul (ASPS). Em DJF (Fig. 6a, e, i, m, q, u), o ASPS fica mais intenso. Entretanto, nos meses mais frios (JJA, Fig. 6c, g, k, o, s, w) o núcleo do sistema enfraquece e o ASPS aparece deslocado em direção ao continente sul americano (JIANG et al., 2011). Como o trabalho está com enfoque no ASAS, não serão realizadas muitas análises para o ASPS.

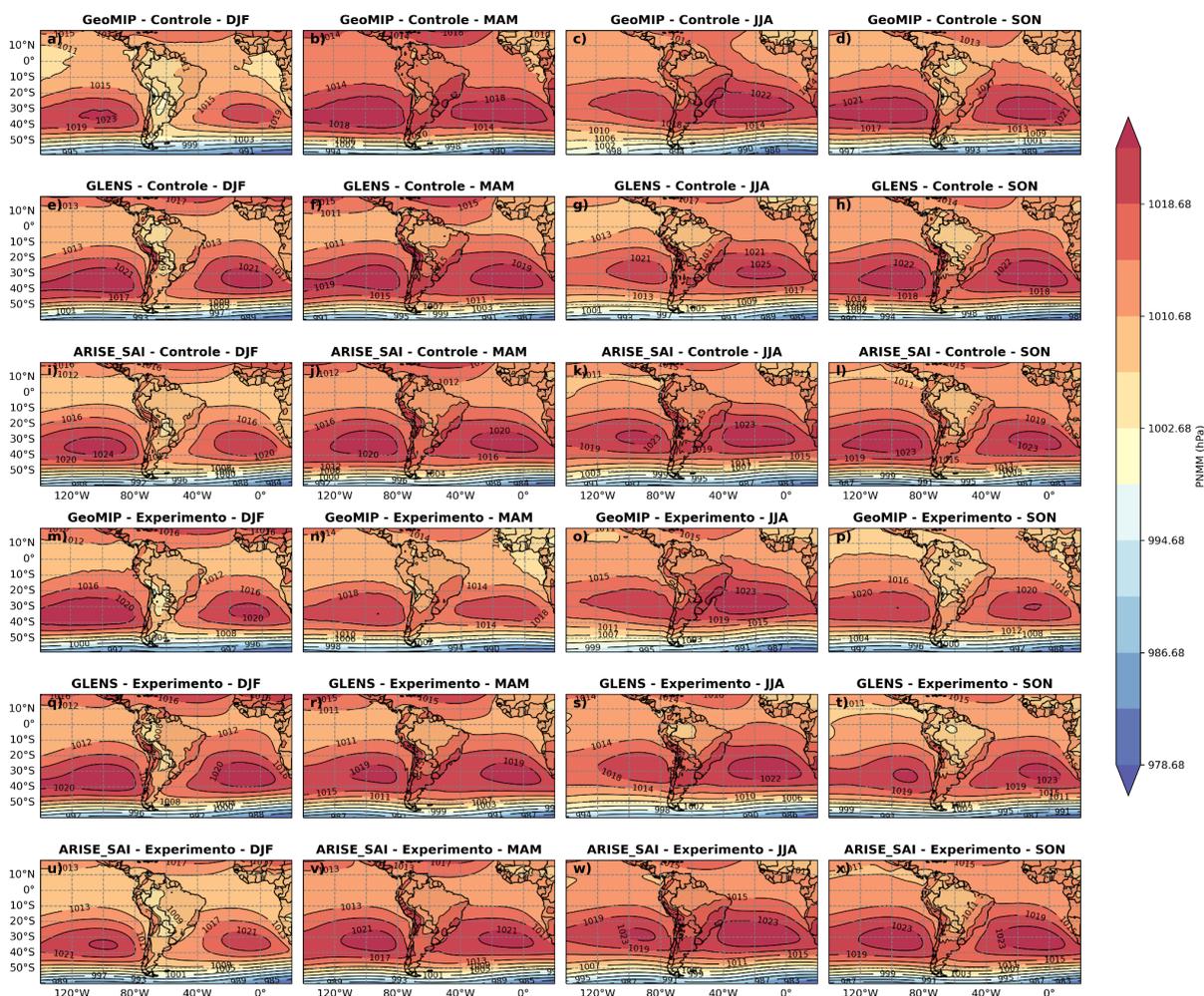


Figura 6: Climatologia sazonal da pressão ao nível médio do mar (hPa), no período de 2040 a 2059, dos conjuntos: GeoMIP controle (a, b, c, d); GeoMIP experimento (m, n, o, p); GLENS controle (e, f, g, h); GLENS experimento (q, r, s, t); ARISE-SAI (i, j, k, l) e ARISE-SAI experimento (u, v, w, x).

Nas Figuras 7, 8 e 9 são apresentadas as diferenças entre cada experimento e a sua versão controle, considerando o período de 2040-2059. No GeoMIP, nos meses de verão (Fig. 7a), há um aumento na PNMM tanto nos subtropicais do oceano Pacífico quanto Atlântico, indicando um fortalecimento desses sistemas em cenários com injeção de aerossol, que é acompanhado por diminuição de pressão em zonas adjacentes ao continente (-0,5 hPa). Durante o outono (Fig. 7b), a região do ASAS mostra declínio na pressão de cerca de 0,5 hPa no experimento. Entretanto, sobre a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS), evidenciam-se valores de PNMM mais elevados no experimento. No inverno (Figura 7c), os padrões representados para a ASPS são consistentes com os de outono, contudo, sobre o

ASAS, em sua região central, os valores da PNMM considerando a injeção de aerossol diminuíram.

Por fim, na estação da primavera austral (Fig. 7d) há aumento da PNMM sobre os dois sistemas de alta (ASPS e ASAS), principalmente em maiores latitudes sobre o Oceano Atlântico Sul, com valores acima de 2 hPa. O aumento na pressão pode afetar a formação e a trajetória do deslocamento de massas de ar e, conseqüentemente, nos padrões das correntes de jatos de altos níveis e ciclones (SERRA e RATISBONNA, 1959; CHEN et al., 2008).

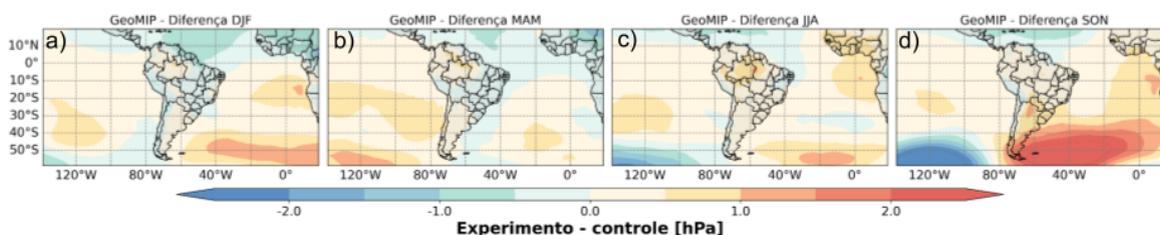


Figura 7: Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o GeoMIP, no período 2040 a 2059.

No GLENS (Fig. 8), exceto na primavera (Fig. 8a-c), nas regiões dos anticiclones (ASPS e ASAS) e no continente sul-americano, os valores da PNMM no experimento apresentam uma diminuição em comparação à simulação controle. Na primavera (Fig. 8d), os valores da PNMM no ASPS apresentam uma diminuição ainda mais acentuada, chegando a -3 hPa sobre o ASPS e -1 hPa no ASAS. A diminuição da pressão pode ser um indicativo de padrões instáveis da atmosfera, (HALLAK e PEREIRA 2012; BAAS et al., 2016). Além disso, na primavera (Fig. 8d), a área continental em latitudes mais elevadas, têm aumento nos valores da PNMM no experimento.

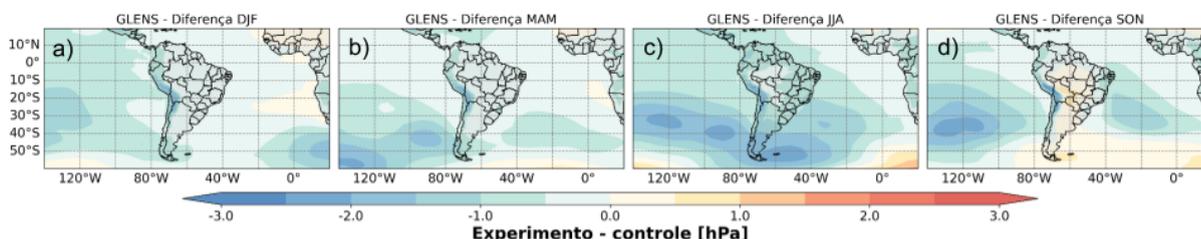


Figura 8: Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o GLENS, no período 2040 a 2059.

No ARISE-SAI (Fig. 9), os valores da PNMM obtidos da diferença assemelham-se aos padrões obtidos do GeoMIP (Fig. 7). Entretanto, há diferenças acentuadas entre o oceano Atlântico e Pacífico, pois no inverno (Fig. 9c) e primavera

(Fig. 9d) o ASAS apresenta valores de PNMM maiores na projeção de aerossol (inverno  $\sim 1$  hPa e primavera  $\sim 2$  hPa) e menores nas outras duas estações ( $\sim 0,5$  hPa), sendo mais acentuada no outono (Fig. 9a). Também é notório o aumento relativo da pressão, em latitudes maiores, no Oceano Atlântico no inverno e primavera, chegando a valores de, aproximadamente, 2 hPa (Figs. 9c e 9d).

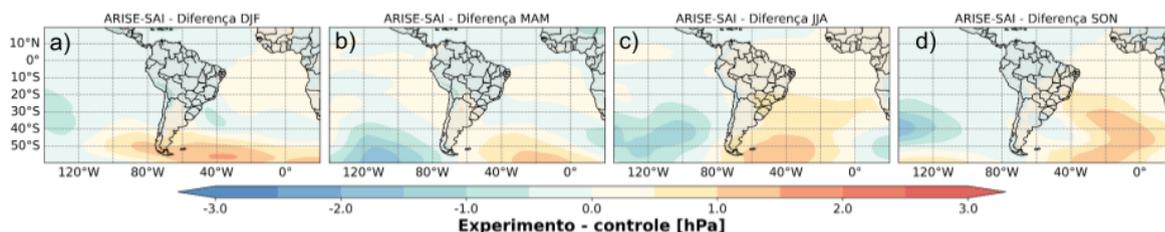


Figura 9: Diferença da PNMM (hPa) entre o experimento menos controle, considerando o ARISE-SAI, no período 2040 a 2059.

Como os modelos diferem entre si com o tipo de cenário usado, período avaliado e local de injeção do aerossol, é difícil realizar comparações entre eles. Por isso, somente uma rápida comparação foi realizada para o período de 2040 a 2059. O padrão espacial sazonal do ASAS (Figura 6) é semelhante entre todos os modelos, mas com diferenças nas intensidades simuladas entre eles (Tabela 4).

Para uma análise mais detalhada da posição central do núcleo de maior pressão do ASAS, foi identificado sazonalmente, a posição do ponto de grade de maior intensidade da PNMM e sua respectiva localização de latitude (lat) e longitude (lon, Tabela 4). Conforme apresentado na Tabela 4, no GeoMIP, os valores médios sazonais entre a projeção com a presença e sem de aerossóis mostram uma proximidade entre si. Na primavera, verifica-se que a PNMM atingiu valores superiores de 1024 hPa, em comparação com o cenário do controle, na qual foi calculado 1023,6 hPa. No GLENS, em todo período do ano, as projeções de controle obtiveram resultados da PNMM relativamente superiores do que os experimentos. Por fim, no experimento ARISE-SAI, durante os meses de verão e outono, as projeções sem a presença de aerossóis simularam valores mais elevados de PNMM (1023,6 hPa e 1022,5 hPa respectivamente) em comparação com os registros observados nas mesmas estações no controle (1023,3 hPa e 1022,2 hPa respectivamente). Entretanto, nas estações de inverno e primavera, os cenários experimentais revelaram valores mais intensos de PNMM (1026,4 hPa e 1025,4 hPa respectivamente) em relação aos demais períodos analisados.

Na literatura, Degola (2013) mostrou que os valores da PNMM do ASAS não ultrapassam 1025 hPa no inverno e não decrescem mais que 1021 hPa no verão nos cenários de tempo presente. Dessa forma, é importante ressaltar que, no inverno, do ARISE-SAI, a PNMM registrou um valor acima do normal das séries históricas calculada pelo autor, chegando a 1026,4 hPa no experimento e 1025,9 no controle.

Tabela 04 - Climatologia sazonal do ponto de maior valor de PNMM e a sua localização de lat e lon nos períodos de 2040 a 2059.

Estação	Controle			Experimento		
	Lat	Lon	PNMM	Lat	Lon	PNMM
<b>GeoMIP</b>						
Verão	-34,5	-7,5	1021,4	-34,5	-5,6	1021,6
Outono	-34,5	-7,5	1020,8	-34,5	-7,5	1020,8
Inverno	-28,9	-20,6	1025,1	-28,9	-20,6	1025,1
Primavera	-28,9	-9,3	1023,6	-30,7	-11,25	1024,0
<b>GLENS</b>						
Verão	-33,4	-7,5	1023,4	-33,4	-7,5	1022,9
Outono	-32,2	-5	1021,6	-32,5	-5	1021,4
Inverno	-28,7	-15	1025,4	-28,7	-10	1024,6
Primavera	-30,6	-6,2	1024,8	-30,6	-3,7	1024,0
<b>ARISE-SAI</b>						
Verão	-33,4	-7,5	1023,6	-33,4	-6,2	1023,3
Outono	-32,5	-7,5	1022,5	-31,5	-8,7	1022,2
Inverno	-28,7	-20	1025,9	-28,7	-21,2	1026,4
Primavera	-31,5	-6,2	1024,9	-31,5	-8,7	1025,4

Na Figura 10 são apresentadas as isóbaras, de intensidade de 1020 hPa, e sua variabilidade sazonal dos conjuntos com e sem inserção de aerossol. Na Figura 10, em todos os modelos, o ASAS aumenta de tamanho e desloca-se em direção ao Brasil durante os períodos de inverno (Fig. 10c, 10g e 10k). Na primavera (Fig. 10d, 10h e 10l), o ASAS começa a diminuir seu tamanho e desloca-se em direção ao oceano.

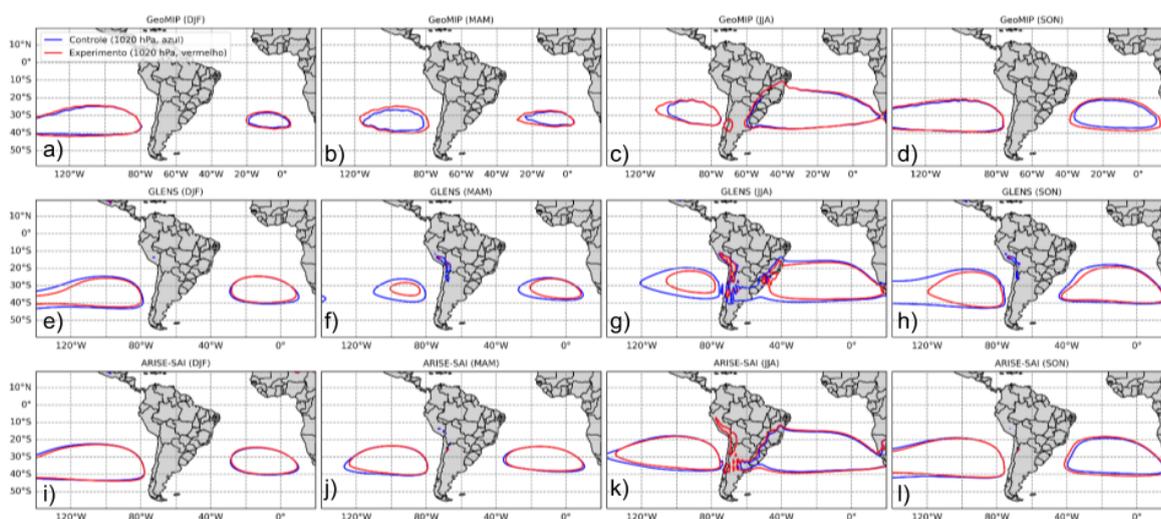


Figura 10: Climatologia sazonal da isóbara de 1020 hPa nos períodos de 2040 a 2059., na cor azul o grupo controle e vermelho o grupo do experimento.

Na Tabela 5 são apresentadas as áreas médias sazonais, em quilômetros quadrados ( $\text{km}^2$ ), das isóbaras de 1020 hPa para os conjuntos de controle e experimento, bem como a diferença entre esses valores, para quantificar o tamanho do ASAS, em relação a isóbara de 1020 hPa. O ciclo sazonal em todos os modelos são parecidos, tendo seus maiores valores de área no inverno ( $\sim 1,6 \times 10^7 \text{ km}^2$  no GeoMIP e  $\sim 2 \times 10^7 \text{ km}^2$  no GLENS e ARISE-SAI). Os valores obtidos na Tabela 4 estão de acordo com o trabalho de Sun et al. (2017).

No GeoMIP, o experimento simulou uma área maior do ASAS no cenário com a injeção de aerossol do que o grupo controle, sendo a maior diferença na primavera ( $2,13 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e a menor no verão ( $3,92 \times 10^5 \text{ km}^2$ ). No GLENS, as áreas do ASAS sem a injeção de aerossol foram maiores, com uma diferença mais abrupta no inverno ( $-3,64 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e menor no verão ( $-7,55 \times 10^5 \text{ km}^2$ ). No ARISE-SAI, no verão e outono, o grupo controle apresentou uma área do ASAS maior em comparação com o inverno e a primavera, sendo essa diferença maior na primavera ( $2,23 \times 10^6 \text{ km}^2$ ) e menor no verão ( $-2,52 \times 10^5 \text{ km}^2$ ).

Tabela 05 - Área sazonal da isóbara de 1020 hPa, em km<sup>2</sup>, do período de 2040 a 2059.

<b>Estação</b>	<b>Controle</b>	<b>Experimento</b>	<b>Experimento - controle</b>
<b>GeoMIP</b>			
<b>Verão</b>	2,00E+06	2,40E+06	3,92E+05
<b>Outono</b>	1,96E+06	2,61E+06	6,53E+05
<b>Inverno</b>	1,60E+07	1,69E+07	8,28E+05
<b>Primavera</b>	7,32E+06	9,45E+06	2,13E+06
<b>GLENS</b>			
<b>Verão</b>	8,13E+06	7,38E+06	-7,55E+05
<b>Outono</b>	5,92E+06	4,12E+06	-1,80E+06
<b>Inverno</b>	2,22E+07	1,86E+07	-3,64E+06
<b>Primavera</b>	1,71E+07	1,44E+07	-2,69E+06
<b>ARISE-SAI</b>			
<b>Verão</b>	7,82E+06	7,57E+06	-2,52E+05
<b>Outono</b>	8,50E+06	7,90E+06	-6,00E+05
<b>Inverno</b>	2,24E+07	2,41E+07	1,74E+06
<b>Primavera</b>	1,46E+07	1,68E+07	2,23E+06

## 4. CONCLUSÃO

Nesse estudo, as características do ASAS foram projetadas em simulações usando os cenários RCPs e SSPs considerando duas situações: um experimento sem e outro com aerossol estratosférico. Para tanto, três conjuntos de simulações foram analisados (GeoMIP; GLENS e ARISE-SAI) no período 2040-2059. Embora os modelos tenham indicado padrões semelhantes nas variações sazonais do ASAS, foi possível observar diferenças significativas entre os cenários de controle e seu experimento.

No GeoMIP, a inserção de aerossóis na banda longitudinal contínua entre 10°S a 10°N de latitude, causou uma ligeira expansão do ASAS, principalmente na primavera, enquanto que, no GLENS e ARISE-SAI, observou-se uma diminuição na área do ASAS, com a inserção de aerossóis em pontos específicos do globo. Também é válido ressaltar que, a coordenada de maior pressão (hPa) do ASAS apresentou variações sazonais entre a simulação controle e o experimento, em especial no GLENS, em que a pressão é maior no experimento.

Com os resultados obtidos, foi demonstrada a sensibilidade do ASAS à presença de aerossóis estratosféricos e a importância de considerar esses efeitos na modelagem climática para as projeções futuras. Além disso, o presente estudo, destaca as necessidades contínuas de aprimorar os modelos climáticos para as tomadas das decisões em relação às mudanças climáticas, a fim de ter uma melhor implementação de estratégias de mitigação e/ou adaptação.

## 5. REFERÊNCIAS

BAAS, Peter; BOSVELD, F. C.; BURGERS, G. The impact of atmospheric stability on the near-surface wind over sea in storm conditions. **Wind Energy**, v. 19, n. 2, p. 187-198, 2016.

BELAIA, Mariia; MORENO-CRUZ, Juan B.; KEITH, David W. Optimal climate policy in 3D: Mitigation, carbon removal, and solar geoengineering. **Climate Change Economics**, v. 12, n. 03, p. 2150008, 2021.

BERDAHL, Mira et al. Arctic cryosphere response in the Geoengineering Model Intercomparison Project G3 and G4 scenarios. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 3, p. 1308-1321, 2014.

CHEN, Z. H. et al. Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 24, p. 6078-6087, 2008.

CHERCHI, Annalisa et al. The response of subtropical highs to climate change. **Current Climate Change Reports**, v. 4, p. 371-382, 2018.

DA FRANCA, Rafael Rodrigues. Anticiclones e umidade relativa do ar: um estudo sobre o clima de Belo Horizonte. 2009.

DANABASOGLU, Gokhan et al. The community earth system model version 2 (CESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, v. 12, n. 2, p. e2019MS001916, 2020.

DA-ALLADA, C. Y. et al. Changes in west African summer monsoon precipitation under stratospheric aerosol geoengineering. **Earth's Future**, v. 8, n. 7, p. e2020EF001595, 2020.

DEGOLA, T. S. D. **Impacts and variability of the South Atlantic subtropical anticyclone on Brazil in the present climate and in future scenarios**. 2013. Tese de Doutorado. University of São Paulo, 2013.

FAWZY, Samer et al. Strategies for mitigation of climate change: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, p. 2069-2094, 2020.

HALLAK, Ricardo; PEREIRA FILHO, Augusto José. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de

mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p. 173-206, 2012.

HASTENRATH, Stefan. **Climate dynamics of the tropics**. Springer Science & Business Media, 2012.

HE, Chao et al. Responses of the summertime subtropical anticyclones to global warming. **Journal of Climate**, v. 30, n. 16, p. 6465-6479, 2017.

HURRELL, J.; VISBECK, M.; PIRANI, P. WCRP coupled model intercomparison project-phase 5-CMIP5. **Clivar Exchanges**, v. 16, n. 56, p. 1-52, 2011.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Editado por V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu e B. Zhou. Cambridge University Press. Em Preparação.

IRVINE, P. J., Kravitz, B., Lawrence, M. G., & Muri, H. . An overview of the Earth system science of solar geoengineering. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 7, n. 6, p. 815-833, 2016.

JIANG, Xingwen et al. Interannual and interdecadal variations of the South Asian and western Pacific subtropical highs and their relationships with Asian-Pacific summer climate. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 113, p. 171-180, 2011.

KEITH, David W. Geoengineering the climate: History and prospect. **Annual review of energy and the environment**, v. 25, n. 1, p. 245-284, 2000.

KRAVITZ, Ben et al. The geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). **Atmospheric Science Letters**, v. 12, n. 2, p. 162-167, 2011.

KRAVITZ, Ben et al. Climate model response from the geoengineering model intercomparison project (GeoMIP). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 15, p. 8320-8332, 2013.

KUNDZEWICZ, Zbigniew W. Climate change impacts on the hydrological cycle. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 8, n. 2-4, p. 195-203, 2008.

KUSWANTO, Heri et al. Impact of solar geoengineering on temperatures over the Indonesian Maritime Continent. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 5, p. 2795-2814, 2022.

LENTON, Tim M.; VAUGHAN, Nem E. The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 9, n. 15, p. 5539-5561, 2009.

LIU, Yimin; WU, Guoxiong; REN, Rongcai. Relationship between the subtropical anticyclone and diabatic heating. **Journal of Climate**, v. 17, n. 4, p. 682-698, 2004.

LOPES, Aline Cristina Berbet; LEINIOSKI, Amanda da Cruz; CECCON, Larissa. Testes t para comparação de médias de dois grupos independentes. **Universidade Federal do Paraná–UFPR**, 2015.

MÄCHEL, H.; KAPALA, A.; FLOHN, H. Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. **International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 18, n. 1, p. 1-22, 1998.

MIYASAKA, Takafumi; NAKAMURA, Hisashi. Structure and mechanisms of the Southern Hemisphere summertime subtropical anticyclones. **Journal of Climate**, v. 23, n. 8, p. 2115-2130, 2010.

OMAN, Luke et al. Climatic response to high-latitude volcanic eruptions. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 110, n. D13, 2005.

NONG, Duy; SIMSHAUSER, Paul; NGUYEN, Duong Binh. Greenhouse gas emissions vs CO2 emissions: Comparative analysis of a global carbon tax. **Applied Energy**, v. 298, p. 117223, 2021.

PATEL, Trisha D. et al. Potential impact of stratospheric aerosol geoengineering on projected temperature and precipitation extremes in South Africa. **Environmental Research: Climate**, v. 2, n. 3, p. 035004, 2023.

PINTO, Izidine et al. Africa's climate response to solar radiation management with stratospheric aerosol. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 2, p. e2019GL086047, 2020.

RASCH, Philip J. et al. An overview of geoengineering of climate using stratospheric

sulphate aerosols. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 366, n. 1882, p. 4007-4037, 2008.

REBOITA, Michelle Simões et al. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.

REBOITA, Michelle Simões et al. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019.

RIAHI, Keywan et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global environmental change**, v. 42, p. 153-168, 2017.

RICHTER, Jadwiga H. et al. Assessing Responses and Impacts of Solar climate intervention on the Earth system with stratospheric aerosol injection (ARISE-SAI): Protocol and initial results from the first simulations. **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 22, p. 8221-8243, 2022.

ROBOCK, Alan et al. Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering. **Geophysical research letters**, v. 36, n. 19, 2009.

RODWELL, Mark J.; HOSKINS, Brian J. Subtropical anticyclones and summer monsoons. **Journal of Climate**, v. 14, n. 15, p. 3192-3211, 2001.

SEAGER, Richard et al. Air–sea interaction and the seasonal cycle of the subtropical anticyclones. **Journal of climate**, v. 16, n. 12, p. 1948-1966, 2003.

SERRA, Adalberto; RATISBONNA, Leandro. As massas de ar da América do Sul:(primeira parte). **Revista Geográfica**, p. 67-129, 1959.

SILVA, Luciano José; REBOITA, Michelle Simões; DA ROCHA, Rosmeri Porfírio. Relação da passagem de frentes frias na região sul de Minas Gerais (RSMG) com a precipitação e eventos de geada. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, n. 1, 2014.

STENCHIKOV, Georgiy L. et al. Radiative forcing from the 1991 Mount Pinatubo volcanic eruption. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 103, n. D12, p. 13837-13857, 1998.

SUN, Xiaoming; COOK, Kerry H.; VIZY, Edward K. The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279-3296, 2017.

TILMES, Simone et al. CESM1 (WACCM) stratospheric aerosol geoengineering large ensemble project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 11, p. 2361-2371, 2018.

VAN VUUREN, Detlef P. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**, v. 109, p. 5-31, 2011.

VAUGHAN, Naomi E.; LENTON, Timothy M. A review of climate geoengineering proposals. **Climatic change**, v. 109, n. 3-4, p. 745-790, 2011.

VISIONI, Daniele et al. Opinion: The scientific and community-building roles of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP)—past, present, and future. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 23, n. 9, p. 5149-5176, 2023.

WILKS, Daniel S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Academic press, 2011.

ZHAO, Liyun et al. Glacier evolution in high-mountain Asia under stratospheric sulfate aerosol injection geoengineering. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, n. 11, p. 6547-6564, 2017.

ZHONGMING, Zhu et al. Geoengineering: A national strategic plan for research on the potential effectiveness, feasibility, and consequences of climate remediation technologies. 2011.

**ANEXOS**

