

Principais Padrões de Verão da Pressão ao Nível do Mar sobre a Região da América do Sul no Clima Presente e em Projeções Futuras

Main Summer Patterns at Mean Sea Level Pressure over South America in the Present Climate and Future Projections

Thales Alves Teodoro¹ , Michelle Simões Reboita¹ , Gustavo Carlos Juan Escobar² 

¹Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Itajubá, MG, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Divisão de Previsão de Tempo e Clima, Cachoeira Paulista, SP, Brasil

E-mails: thales.teo@hotmail.com; reboita@unifei.edu; gustavo.escobar@inpe.br

Autor Correspondente: Thales Alves Teodoro; thales.teo@hotmail.com

Resumo

Nesse estudo objetiva-se avaliar a habilidade de alguns modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP, fase 5 - CMIP5 e fase 6 - CMIP6) e das simulações do *Regional Climate Model* (RegCM4 - versão 4) em representar os principais padrões sinóticos da pressão ao nível médio do mar (PNMM) da reanálise ERA5 na América do Sul (AS) e oceanos adjacentes. Essa avaliação é feita considerando os meses de verão (dezembro-janeiro-fevereiro) no período de 1995 a 2014 (clima presente). O modelo que melhor representa o clima presente é utilizado para projetar as possíveis mudanças nos padrões de PNMM no período de 2080 a 2099 (clima futuro), considerando um cenário pessimista de mudanças climáticas (*Representative Concentration Pathway 8.5 - RCP8.5 / Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5 - SSP5-8.5*) do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Para a identificação dos principais padrões sinóticos é aplicada a Análise de Componentes Principais (ACP) nos dados da reanálise ERA5 e simulações. A seleção do modelo que melhor representa as componentes principais (CPs) da ERA5 é feita através da análise da correlação espacial entre as CPs dos modelos com as CPs da ERA5. Os resultados indicam que o modelo MPI-ESM-MR do CMIP5 (MPICMIP5) é o que melhor reproduz os principais padrões de PNMM da ERA5 (CP1, CP2 e CP3). Assim, esse modelo é utilizado para o estudo do clima futuro. O MPICMIP5 não projeta grandes alterações nos padrões espaciais das CPs no clima futuro, mas, por outro lado, indica mudanças na frequência dos padrões encontrados, o que pode alterar o regime de chuvas em algumas regiões da AS.

Palavras-chave: ACP; Mudanças climáticas; Padrões sinóticos

Abstract

This study aims to evaluate the ability of some global climate models of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP, phase 5 - CMIP5 and phase 6 - CMIP6) and the simulations of the Regional Climate Model (RegCM4 - version 4) in representing the main synoptic patterns of mean sea level pressure (MSLP) in summer (December-January-February) over South America (SA) and adjacent oceans in the period 1995-2014 (present climate). In addition, the model with better performance in simulating the present climate is selected for the analysis of the projected changes in the MSLP patterns in the period 2080-2099 (future climate), considering a pessimist scenario (Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5) and Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5 (SSP5- 8.5)). For the identification of the main synoptic patterns, Principal Component Analysis (PCA) is applied using ERA5 reanalysis and simulations. The selection of the model that better represents the principal components (PCs) of ERA5 is carried out by analyzing the spatial correlation between the PCs of the models with the PCs of ERA5. The results indicate that the MPIP-ESM-MR model of CMIP5 (MPICMIP5) is the one that better reproduces the main PNMM patterns of ERA5 (PC1, PC2, and PC3). Thus, this model is used to study the future climate. MPICMIP5 does not project major changes in the spatial patterns of PCs in the future climate, but, on the other hand, it indicates changes in the frequency of the patterns found.

Keywords: PCA; Climate changes; Synoptic patterns

1 Introdução

O ciclo anual da precipitação em grande parte da América do Sul (AS) é uma resposta ao Sistema de Monção da América do Sul (SMAS) (Ashfaq et al. 2020; Gan, Kousky & Roupelewski 2004; Grimm 2004; Marengo et al. 2012; Pascale et al. 2019; Reboita et al. 2010; Sena & Magnusdottir 2020; Vera et al. 2006; Wang, Jin & Liu 2020). Nas regiões em que esse sistema atua (que vai da Amazônia, passando pela região centro-oeste e sudeste do Brasil e chegando ao oceano Atlântico Sul), há dois regimes de precipitação bem definidos: a estação úmida (outubro-março) e a estação seca (abril-setembro). Considerando a estação úmida, os maiores volumes de precipitação ocorrem entre dezembro e fevereiro – DJF (Marengo et al. 2012; Reboita et al. 2010).

Os principais padrões da circulação atmosférica em superfície nos meses úmidos do SMAS (Figura 1) estão relacionados com (a) a presença de dois centros de baixa pressão que se posicionam a leste da cordilheira dos Andes (Baixa do Chaco – BCH e Baixa do Noroeste Argentino – BNOA), influenciando as condições de tempo principalmente no centro-norte da Argentina, sul da Bolívia e Paraguai (Escobar 2019); (b) o Jato de Baixos Níveis (JBN) a leste da cordilheira dos Andes, que transporta ar quente e úmido da região tropical para a subtropical (Montini, Jones & Carvalho 2019; Santos & Reboita 2018) e que pode, em algumas ocasiões, convergir na região sudeste do Brasil com o escoamento proveniente do (c) Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que é um sistema de alta pressão semipermanente sobre o oceano Atlântico (Marengo et al. 2020; Reboita et al. 2019), contribuindo para a formação da (d) Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Escobar & Reboita 2022; Silva, Reboita & Escobar 2019). Durante a estação chuvosa, a AS também é afetada pela passagem de frentes frias que muitas vezes contribuem para organizar episódios de ZCAS e a ocorrência de chuvas intensas (Moura, Escobar & Andrade 2013; Seluchi, Beu & Andrade 2016). Ainda se tratando das características atmosféricas em baixos níveis no período chuvoso, destaca-se a grande atividade convectiva principalmente na Amazônia. Essa convecção dá suporte para a formação de uma área de alta pressão em altos níveis, conhecida como Alta da Bolívia (AB; Zhou & Lau 1998). A AB domina a circulação em altos níveis praticamente ao longo de todo o período úmido, sendo muitas vezes responsável também por intensificar o jato subtropical que se encontra a sul do seu centro. Corrente abaixo da AB há a formação de um cavado que é chamado de cavado das cercanias do Nordeste do Brasil (Ferreira, Reboita & Rocha 2019). Esse cavado é responsável por contribuir para a ocorrência de precipitação em regiões localizadas em sua periferia (Lyra & Arraut 2020; Reboita et al. 2017).

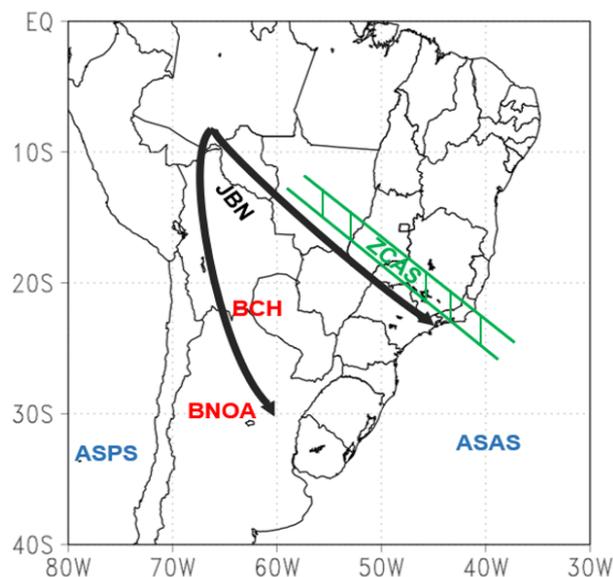


Figura 1 Área de estudo e representação esquemática dos sistemas atmosféricos em superfície atuantes na AS, conforme Reboita et al. (2010). ASAS (Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul); ASPS (Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul); BCH (Baixa do Chaco); BNOA (Baixa do Noroeste Argentino); JBN (Jato de Baixos Níveis) e ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul).

Os sistemas meteorológicos citados anteriormente, em geral, são registrados pela primeira Componente Principal (CP) nos estudos que utilizam a Análise de Componentes Principais de campos atmosféricos (ACP; Escobar 2019). Entretanto, há outros padrões de circulação que apresentam menor variância explicada, sendo representados pelas demais CPs (2, 3 etc.). Como esses padrões de circulação são menos frequentes, acabam não sendo retratados pelo campo médio climatológico. Sendo assim, a utilização da ACP torna-se importante para investigar as mudanças nos padrões atmosféricos de uma determinada variável. Na literatura, não são muitos os estudos que aplicam ACP na análise das características do período úmido do SMAS. Porém, essa técnica tem sido amplamente empregada para estudos com outros objetivos como a da identificação de padrões de circulação associados às ondas de frio (Reboita, Escobar & Lopes 2015), friagens (Escobar, Vaz & Reboita 2019), chuvas extremas (Escobar, Seluchi & Andrade 2016), transporte de umidade (Hoyos et al. 2019) e relacionados à influência dos poluentes atmosféricos na saúde humana (Gonçalves et al. 2007).

Devido aos efeitos adversos relacionados às mudanças climáticas, vários estudos têm investigado como essas mudanças podem alterar os padrões atmosféricos da AS (Fahad, Burls & Strasberg 2020; Pascale et al. 2019; Reboita et al. 2019; Sena & Magnusdottir 2020). No estudo de Reboita et al. (2019), os autores encontraram que para

o período de 2065 - 2095, sob um cenário de aquecimento global, há uma tendência de aumento da Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) no setor sul do oceano Atlântico Sul e uma diminuição no setor tropical, principalmente nos meses de verão. Sena & Magnusdottir (2020), ao investigarem as mudanças projetadas no SMAS no final deste século, mostraram condições mais úmidas na região sudeste do Brasil, em decorrência do fortalecimento da convergência de umidade proveniente do JBN e do Atlântico Sul.

Nesse contexto, o objetivo principal deste estudo é avaliar as habilidades de alguns modelos climáticos globais do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP, fase 5 - CMIP5 e fase 6 - CMIP6) e do *Regional Climate Model* (RegCM4 - versão 4) em representar os principais padrões sinóticos da PNMM registrados pela reanálise ERA5 na AS e oceanos adjacentes. Além disso, o modelo com melhor representatividade será utilizado para avaliar a PNMM num cenário pessimista de mudanças climáticas. O estudo focará na fase mais úmida do SMAS (DJF), considerando o período de 1995-2014 como clima presente e o período de 2080-2099 como clima futuro.

2 Material e Métodos

2.1 Dados

Para determinar os principais padrões sinóticos da circulação atmosférica em superfície na AS e adjacências (0°–40°S, 80°–30°W; Figura 1) são utilizados dados médios diários de PNMM pertencentes à reanálise ERA5 (Hersbach et al. 2020). Esses dados serão considerados como referência para a validação dos dados diários das simulações dos modelos climáticos do CMIP5 (CMIP5; Meehl & Bony 2011), CMIP6 (Eyring et al. 2016) e do RegCM4 (Gutowski

et al. 2016), que foi dirigido com diferentes MCGs do CMIP5. Na Tabela 1 é apresentada a lista dos modelos que foram utilizados no estudo, as abreviações para referenciar cada simulação no texto, informações dos centros do desenvolvimento e da resolução espacial de cada modelo. A escolha dos modelos globais foi decorrente de serem os mesmos utilizados na técnica de *downscaling* com o RegCM4. Destaca-se aqui que todos dados desses modelos foram obtidos na plataforma do *Earth System Grid Federation* (ESGF, <https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>). Para cada modelo, apenas o primeiro membro do conjunto de cada experimento é utilizado.

O estudo foca dois períodos: 1995-2014 (clima presente) e 2080-2099 (clima futuro), seguindo recomendações do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) para o seu sexto relatório (Ashfaq et al. 2020; Moon & Ha 2020; Reboita et al. 2020). As projeções do clima futuro do RegCM4 e dos modelos do CMIP5 serão analisadas considerando o cenário de mudanças climáticas *Representative Concentration Pathway 8.5* (RCP8.5; Moss et al. 2010). Como o período histórico do CMIP5 termina em 2005, para complementar a série temporal do clima presente até o ano de 2014 foram utilizadas as projeções de um cenário menos pessimista (RCP4.5), por levar em consideração uma forçante radiativa mais similar com o clima presente. Essa metodologia segue a dos estudos desenvolvidos para o IPCC como, por exemplo, o de Ashfaq et al. (2020). Já para os modelos do CMIP6, essa combinação de informações para o clima presente não é necessária, já que o período histórico desses se estende até 2015. As projeções do CMIP6 utilizam cenários com nomes distintos dos utilizados no CMIP5. Entretanto, o cenário *Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5* (SSP5-8.5)

Tabela 1 Modelos utilizados nesse estudo (centro de desenvolvimento de cada modelo, abreviações utilizadas para cada simulação e espaçamento de grade em graus).

Modelo	Centro de Desenvolvimento	Resolução (Lat × Lon)
HadGEM2-ES, CMIP5 (Jones et al. 2011) – HADCMIP5	Centro Meteorológico Hadley, Reino Unido	1,25° x 1,875°
MPI-ESM-MR, CMIP5 (Giorgetta et al. 2013) – MPICMIP5	Instituto Max Planck de Meteorologia, Alemanha	1,8653° x 1,875°
NorESM1-M, CMIP5 (Bentsen et al. 2012) – NORCMIP5	Centro Climático Norueguês, Noruega	1,8947° x 2,5°
HadGEM3-GC31-LL, CMIP6 (Ridley et al. 2019) – HADCMIP6	Centro Meteorológico Hadley, Reino Unido	1,25° x 1,875°
MPI-ESM1-2-LR, CMIP6 (Mauritsen et al. 2019) – MPICMIP6	Instituto Max Planck de Meteorologia, Alemanha	1,8653° x 1,875°
NorESM2-LM, CMIP6 (Seland et al. 2020) – NORCMIP6	Centro Climático Norueguês, Noruega	1,8947° x 2,5°
RegCM4_HadGEM2-ES_CMIP5 (Gutowski et al. 2016) – RegHAD	Centro Internacional de Física Teórica, Itália	0,22° x 0,22°
RegCM4_MPI-ESM-MR_CMIP5 (Gutowski et al. 2016) – RegMPI	Centro Internacional de Física Teórica, Itália	0,22° x 0,22°
RegCM4_NorESM1-M_CMIP5 (Gutowski et al. 2016) – RegNOR	Centro Internacional de Física Teórica, Itália	0,22° x 0,22°

é o correspondente do RCP8.5, e é o cenário utilizado neste estudo nas projeções dos modelos do CMIP6. Mais informações sobre os cenários do CMIP6 podem ser obtidas em O'Neill et al. (2016). Todos os conjuntos de dados foram interpolados com o método bi-linear para uma grade regular de $1^\circ \times 1^\circ$, devido às diferentes resoluções dos modelos (Accadia et al. 2003).

2.2 Análise de Componentes Principais

A metodologia utilizada para determinar os principais padrões de PNMM sobre o domínio da AS durante os meses de verão (DJF), que é o período mais úmido do SMAS, é a ACP. Essa metodologia identifica os campos atmosféricos com padrão espacial similar em um conjunto de dados (Compagnucci & Salles 1997; Escobar 2007; Escobar 2019; Wilks 2011). Como neste estudo, o objetivo é a identificação de padrões sinóticos, os dados diários são organizados de acordo com o Modo-T (Escobar 2019; Green & Carrol 1978; Richman 1986), isto é, a matriz fornecida para a obtenção das CPs é estruturada de forma que cada linha corresponde a um ponto de grade do domínio de estudo e as colunas aos tempos da série. A ACP aqui aplicada considera a matriz de correlação e o cálculo de autovalores e autovetores.

Primeiramente, a ACP é aplicada aos dados diários do verão da ERA5 e, em seguida, nos dados do clima presente de cada modelo. Na etapa seguinte, é realizada uma rotação dos vetores denominada de rotação Varimax (Johnson & Wichern 2007). Esse é um método de rotação ortogonal que redistribui a variância total dos dados, de modo a maximizar a variação dos pesos de cada CP, facilitando o entendimento físico das componentes obtidas (Richman 1986). O número de CPs rotacionadas a ser considerado no estudo é obtido pela regra do autovalor, sendo que esse deve ser maior do que 1.0 (Richman 1986). Neste estudo, só se consideram os principais padrões de PNMM, as CPs com variância explicada acima de 10%.

A interpretação física dos resultados da ACP pode ser compreendida com o exemplo da Figura 2. Suponha que a ACP é aplicada a uma série temporal de dados diários de anomalia de PNMM, em pontos de grade (lat x lon) e com n tempos. A ACP gera, basicamente, dois resultados: (a) uma matriz com os padrões espaciais que explicam a maior parte da variância (isto é, que mais se repetem) do conjunto de dados, o que na literatura também é chamado de *leading patterns*, e (b) uma série temporal associada com cada padrão identificado para indicar se num dado tempo ocorre ou não tal padrão, que também recebe o nome de *factor loading*, *z-score* ou índice.

No caso do exemplo da Figura 2, a ACP identificou dois padrões espaciais que explicam a maior parte da variância do conjunto de dados: (1) presença de uma anomalia de alta pressão centrada no oceano que se reveza com a presença de uma anomalia de baixa pressão (Figura 2A, C, E, F); a distinção entre a presença da alta ou da baixa é feita através da análise da série temporal, e (2) a presença de uma anomalia de baixa pressão que domina o sudeste da AS (Figura 2B, D). Esses dois padrões são identificados respectivamente como CP1 (Figura 2G) e CP2 (Figura 2H) e são considerados como *leading patterns*. A correlação espacial entre a CP1 e cada campo do conjunto de dados fornece a série temporal que é chamada de índice, *factor loadings* ou *z-score* (Figura 2I). Veja que para a CP1, os campos que possuem altos valores de correlação com essa componente são os que apresentam anomalias de pressão sobre o oceano (tempo 0, tempo 2, tempo 4 e tempo 5). O valor de correlação entre o campo do tempo 2 com a CP1 é negativa pois nesse tempo há uma anomalia de baixa pressão sobre o oceano, o que é contrário ao sintetizado pela CP1 (Figura 2G). Para a CP2 (Figura 2H), a análise é semelhante.

2.3 Validação do Clima Presente

Como será mostrado nos resultados, a ACP identificou que no conjunto de dados de PNMM da ERA5, a partir da CP4 a variância explicada apresenta valores inferiores a 10%. Sendo assim, este estudo foca na investigação das mudanças das três primeiras CPs (CP1, CP2 e CP3) da ERA5. A metodologia aplicada é descrita aqui e sintetizada na Figura 3. Uma vez conhecidas as três primeiras CPs da ERA5, o passo seguinte é identificar o modelo que possui melhor performance na reprodução desses três primeiros padrões de PNMM da reanálise. Para isso, é calculado o coeficiente de correlação espacial entre as CPs de cada modelo com as CPs da ERA5 (pois nem sempre a primeira CP de um modelo corresponde à primeira CP da ERA5). O valor de correlação é uma medida adimensional e varia de -1 a +1, onde quanto mais próximo de +1 ou -1 maior será a correlação positiva ou negativa, respectivamente. Será considerado como o melhor modelo aquele que apresentar suas CPs mais correlacionadas positivamente com as CPs da ERA5. Neste caso, um modelo que reproduza fielmente os padrões da ERA5 deve apresentar a soma de suas correlações igual a 3. Sendo assim, o modelo com melhor performance será escolhido a partir do quão próximo a soma dos seus valores de correlação está do valor 3. Após definir o modelo que melhor representa as CPs da ERA5, será aplicada a ACP nas projeções deste modelo.

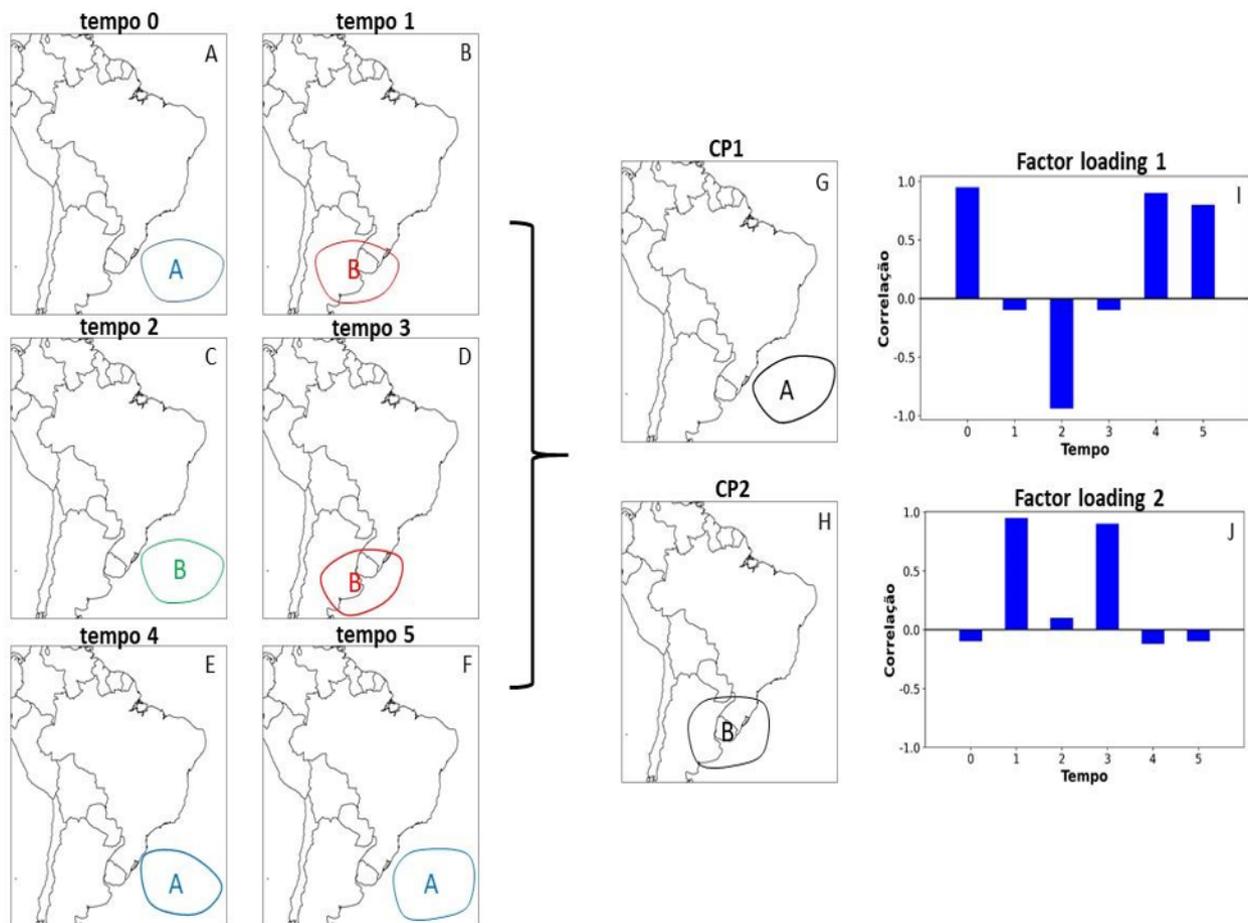


Figura 2 Exemplo ilustrativo para facilitar o entendimento da ACP em Modo-T. Os painéis são: A. Anomalia de PNMM no tempo 0; B. Anomalia de PNMM no tempo 1; C. Anomalia de PNMM no tempo 2; D. Anomalia de PNMM no tempo 3; E. Anomalia de PNMM no tempo 4; F. Anomalia de PNMM no tempo 5; G. CP1 dos campos de Anomalia de PNMM; H. CP2 dos campos de anomalia de PNMM; I. Série de *factor loadings* da CP1; J. Série de *factor loadings* da CP2.

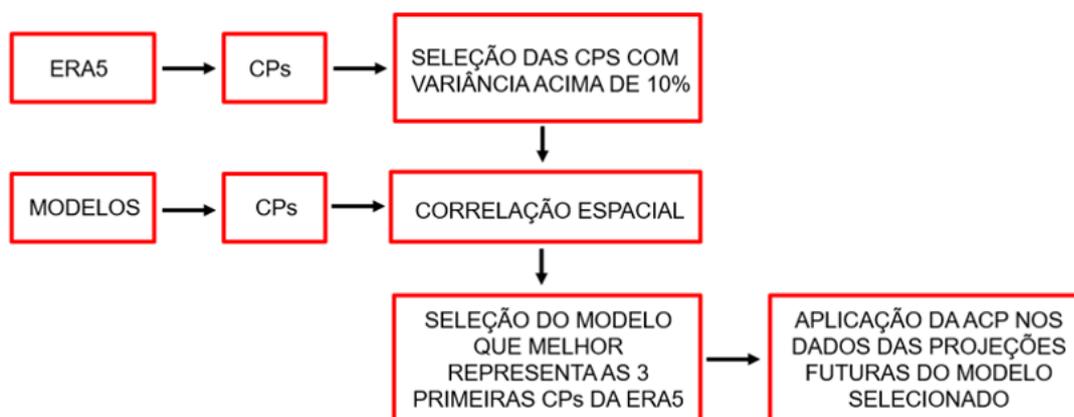


Figura 3 Fluxograma das etapas do estudo.

3 Resultados

3.1 Identificação das CPs do Clima Presente

3.1.1. ACP da ERA5

Aplicando a ACP na reanálise ERA5, apenas as 3 primeiras CPs apresentam porcentagens da variância explicada (Var.Exp) acima de 10% (Tabela 2). A porcentagem da variância acumulada (Var.A; Tabela 2) dessas três CPs é de 56,1%, o que indica que mais da metade dos campos reais de PNMM que ocorrem nos meses de verão estão relacionados com os padrões sintetizados por essas CPs.

Tabela 2 Porcentagens da Var.Exp (coluna do meio) e da Var.A (última coluna) das três primeiras CPs obtidas com a reanálise ERA5 nos meses de verão.

CPs	Var.Exp (%)	Var.A (%)
1	23,7	23,7
2	18,1	41,8
3	14,3	56,1

3.1.2. Seleção do Modelo mais Representativo do Clima Presente

Inicialmente realizou-se uma comparação visual entre as CPs obtidas nos modelos, considerando o clima presente, com as três primeiras CPs da ERA5 (figuras não mostradas). Nessa análise, verifica-se que a maior similaridade com as 3 primeiras CPs da ERA5 ocorre com as 3 primeiras CPs dos modelos climáticos. Portanto, a etapa seguinte consiste no cálculo da correlação espacial entre as 3 primeiras CPs dos modelos e da ERA5, pois nem sempre a primeira componente de um modelo corresponde à primeira componente da ERA5. O passo seguinte é obter a soma dos valores de correlação das CPs para cada modelo. O modelo que apresentar o maior valor dessa soma será classificado como o que melhor representa os padrões de PNMM do clima presente.

A soma das correlações entre as CPs dos modelos com as CPs da ERA5 é mostrada na Figura 4. O HADCMIP6 é o modelo que apresenta a menor soma, o que indica que os campos sintetizados pelas CPs do HADCMIP6 são os que apresentam maiores diferenças em relação aos campos da ERA5. A virtude dessa deficiência é devido à dificuldade do modelo posicionar corretamente os sistemas

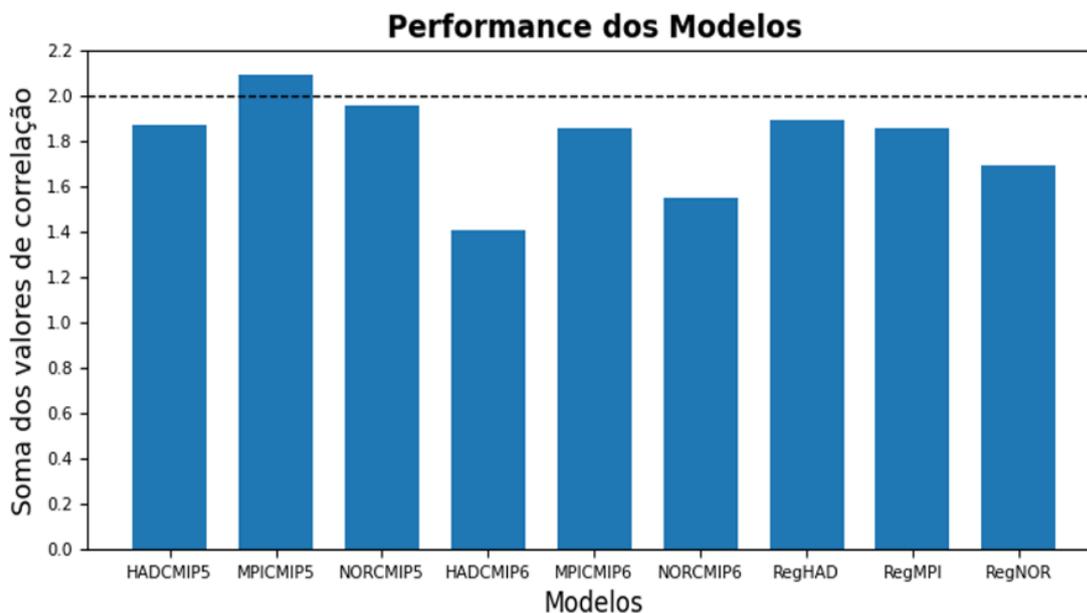


Figura 4 Soma dos valores de correlação para cada modelo do estudo. Esses valores foram obtidos após a identificação da CP de cada modelo que melhor sintetiza cada padrão da ERA5.

de PNMM (ASAS, baixas térmicas, cavados, etc - figuras não mostradas). O modelo que melhor representa a ERA5 é o MPICMIP5 (soma das correlações igual a 2,11). Considerando o MPICMIP5, a CP1 da ERA5 é mostrada pela CP2 do modelo, e a correlação espacial entre esses dois campos é de 0,6. Já a CP2 (CP3) da ERA5 é sintetizada pela CP3 (CP1) do MPICMIP5 com correlação de 0,68 (0,83). Após essa análise, fica definido, portanto, que dentre os modelos analisados neste estudo, o MPICMIP5 é o que melhor representa os 3 padrões que explicam a maior variabilidade da PNMM da ERA5 no período de 1995-

2014. Assim, o estudo do clima futuro será realizado com as projeções do modelo MPICMIP5.

3.2 Padrão Espacial das CPs no Clima Presente e Futuro

Na Figura 5 são mostrados os três padrões espaciais predominantes de PNMM da reanálise ERA5 (Figura 5A-C) e simulados pelo modelo MPICMIP5 no clima presente (Figura 5D-F) e projetados no clima futuro (Figura 5G-I). Nessas figuras, os valores positivos (negativos) representam altas (baixas) pressões.

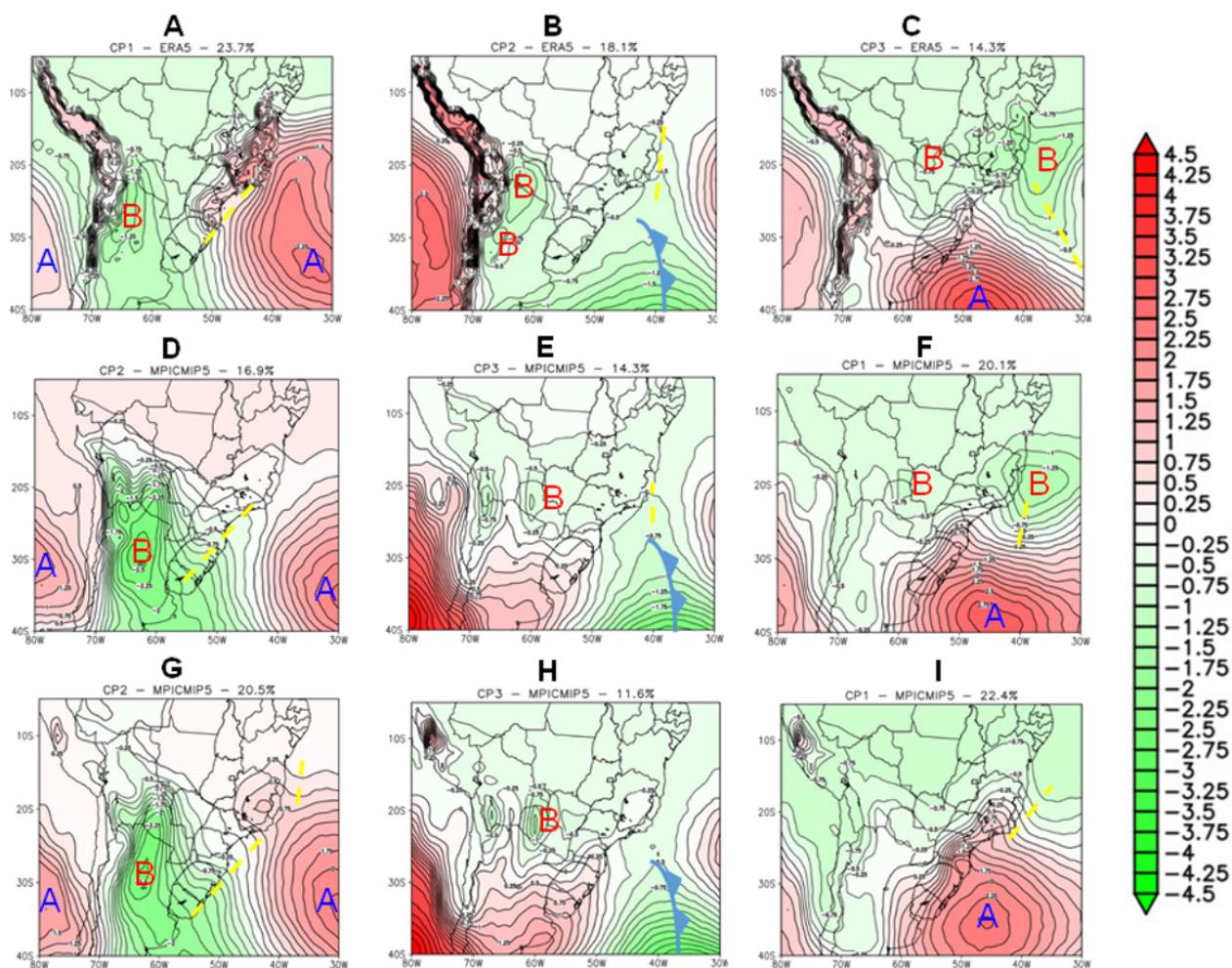


Figura 5 A-C. CPs de PNMM da reanálise ERA5; **D-F.** CPs de PNMM do modelo MPICMIP5 no clima presente; **G-I.** CPs de PNMM do modelo MPICMIP5 no clima futuro. Escala adimensional (linhas pontilhadas em amarelo indicam regiões de cavado; A indica o centro dos anticiclones semipermanentes; B indica os centros de baixas pressões; linha em azul indica frente fria).

3.2.1. Clima Presente

A primeira CP da reanálise ERA5 (Figura 5A) que representa o campo médio climatológico de verão mostra a presença de uma região de baixa pressão se estendendo do sul da Bolívia ao centro-norte da Argentina, que está associada à BCH e à BNOA (Escobar & Seluchi 2012; Seluchi & Saulo 2012), e duas regiões de alta pressão sobre os oceanos subtropicais, que correspondem ao ASAS e ASPS (esse último praticamente não se observa devido ao domínio reduzido da figura). O centro do ASAS está posicionado em cerca de 35°S, 32°W. Nota-se, também, a presença de um cavado no oceano Atlântico, entre a costa do Estado de Santa Catarina e a costa do Estado do Rio de Janeiro. O padrão espacial da CP2 do MPICMIP5 (Figura 5D) é similar à CP1 da ERA5 (correlação espacial de 0,6), porém com o ASAS posicionado mais para leste e com a área de baixa pressão sobre o continente mais intensificada em relação à reanálise. Por outro lado, o cavado sobre o oceano Atlântico aparece mais amplo, se estendendo entre a costa do Estado do Rio Grande do Sul e o interior da região sudeste. A Var.Exp da CP1 da ERA5 (23,7%) é superior ao valor da CP2 do modelo (16,8%), o que indica que o MPICMIP5 utiliza uma menor quantidade de campos reais de PNMM para produzir uma CP similar ao padrão mais dominante da ERA5. Em outras palavras, a frequência dos campos reais de PNMM da ERA5 relacionados a CP1 são subestimados pelo MPICMIP5.

O padrão de PNMM da CP2 da ERA5 (Figura 5B) mostra um centro de baixa pressão na região da BCH (22°S, 64°W) e outro menor na região da BNOA, aproximadamente em 30°S, 66°W a sotavento dos Andes. No oceano Atlântico Sul, próximo a 40°S há um outro centro de baixa pressão, cujo cavado associado se estende ao longo do meridiano 40°W. Este cavado permite inferir a presença de uma frente fria localizada a leste da região sudeste do Brasil. O sistema frontal aparece conectado com um cavado não frontal, posicionado mais ao norte e se estendendo na direção do Estado da Bahia. Com relação aos anticiclones, o ASAS localiza-se mais afastado do continente, a leste de 35°W, comparado a sua localização na CP1. Já o ASPS atua mais próximo ao continente e com um núcleo mais intensificado se comparado a CP1. A CP3 do modelo MPICMIP5 (Figura 5E) é a que está mais relacionada com a CP2 da ERA5, porém apresentando algumas diferenças. Em grande parte da Argentina, o modelo mostra a presença de uma área de alta pressão, bastante intensa em relação à mostrada pela CP da ERA5. Isso faz com que a BNOA e a BCH fiquem mais enfraquecidas em relação à CP da ERA5. Além disso,

o modelo não deixa tão evidente os dois cavados sobre o oceano Atlântico identificados na ERA5, pois aparecem quase emendados em um sistema único. A configuração dos anticiclones subtropicais simulados é similar à ERA5. A Var. Exp dessa CP da ERA5 (18,1%) também é superior ao valor da CP do modelo (14,3%), o que indica que os casos reais relacionados a esse campo de PNMM são subestimados pelo MPICMIP5.

A CP3 da ERA5 (Figura 5C) é uma configuração típica da ocorrência de ZCAS de acordo com Escobar & Reboita (2020), uma vez que há predomínio de baixa pressão sobre o continente e oceano Atlântico (altura do Sudeste do Brasil). Essa área de baixa pressão geralmente está associada com a presença de um sistema frontal estacionário ou a atuação de um ciclone (Silva, Reboita & Escobar 2019). Observa-se também uma outra área de baixa pressão sobre o Estado de Mato Grosso do Sul. Esse sistema de baixa pressão pode estar relacionado com a presença da BCH. O centro do ASAS aparece a cerca de 40°S, que é uma posição a sul de sua posição climatológica (Reboita et al. 2019), e o ASPS encontra-se aproximadamente em 28°S. Neste caso, o ASAS atua de forma a dificultar a propagação de sistemas transientes para latitudes mais baixas, provocando o efeito conhecido como “gangorra” no padrão de precipitação (anomalias positivas de precipitação nas regiões centrais do Brasil e anomalias negativas no sul). Essa CP da ERA5 está relacionada com a CP1 do modelo MPICMIP5 (Figura 5F). A CP1 desse modelo indica uma área de baixa pressão entre o Atlântico e a costa do Brasil e o ASAS também é mostrado mais ao sul de sua posição média climatológica, conforme registrado na CP3 da ERA5. A área de baixa pressão associada à BCH também é reproduzida pelo modelo, porém um pouco deslocada para oeste. Com relação ao ASPS, este sistema encontra-se praticamente fora do domínio da figura. A CP1 do MPICMIP5 mostra uma Var.Exp aproximadamente 6% superior ao valor da CP3 da ERA5, o que evidencia superestimativas produzidas por esse modelo na frequência de campos relacionados aos eventos de ZCAS. Como o modelo mostra uma ligeira superestimativa na frequência de ZCAS isso pode ser uma das razões para a superestimativa da precipitação (tanto total como só a parte convectiva) desse modelo estendendo-se da parte central para leste do Brasil quando comparado aos dados do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) por Yin et al. (2013). No entanto, de forma geral, o modelo MPICMIP5 consegue capturar os principais padrões espaciais de PNMM da reanálise ERA5 no domínio da AS, o que dá confiabilidade à utilização desse modelo para o estudo do clima futuro.

3.2.2. Clima Futuro

Conforme mostrado anteriormente, a CP2 do MPICMIP5 é a CP mais bem correlacionada com a CP1 da ERA5, a CP3 do modelo com a CP2 da ERA5 e a CP1 com a CP3 da ERA5. Aqui o objetivo é comparar os cenários presente e futuro (2080-2099) de cada CP (nessa ordem: CP2, CP3 e CP1).

O campo espacial da CP2 do MPICMIP5 no clima futuro (Figura 5G) é similar ao do clima presente (Figura 5D), uma vez que mostra uma área de baixa pressão, ocupando partes da Argentina, Paraguai, centro-sul da Bolívia, Uruguai e partes do sul do Brasil, e os anticiclones (ASAS e ASPs) atuando sobre os oceanos. A diferença mais acentuada dessa CP entre os períodos (Figuras 5D-G) é mostrada na região sudeste do Brasil, onde no clima futuro há persistência de uma área de alta pressão sobre essa região e que está associada com a atuação da ASAS. Essa situação pode contribuir para uma redução da quantidade de precipitação no sudeste brasileiro nos meses de verão, já que a presença de uma área de alta pressão contribui para suprimir o processo de levantamento de umidade da superfície para níveis superiores, dificultando a formação de nuvens de chuva. O estudo de Reboita et al. (2019) também mostra que outros MCGs apresentam tendência de aumento nos valores de pressão sobre o sudeste do Brasil no clima futuro. Além disso, Reboita et al. (2021) mostram que a frequência de dias consecutivos secos é projetada a aumentar em modelos do CMIP5 em diferentes cenários climáticos. O valor da variância explicada dessa CP do modelo no clima futuro é de 20,5%, o que é superior ao valor da simulação do clima presente (16,9%). Esses resultados podem ser um indicativo de que no clima futuro situações de bloqueio como o observado no verão de 2014 possam se tornar mais frequentes.

O padrão espacial da CP3 projetada para o clima futuro pelo MPICMIP5 (Figura 5H) é similar ao clima presente (Figura 5E), porém com diferenças no valor da Var.Exp. Para o clima futuro, o valor da Var.Exp dessa CP (11,6%) é menor do que no clima presente (14,3%), o que é um indicativo da redução do número de casos que sugerem a presença de uma frente fria que se estende até o sudeste do Brasil.

A estrutura espacial do campo da CP1 do MPICMIP5 no clima futuro (Figura 5I) não mostra a área de baixa pressão fechada entre o continente e oceano Atlântico que aparece bem configurada no clima presente (Figura 5F). Nota-se, também, que o centro do ASAS se posiciona aproximadamente em 35°S, 45°W, um pouco mais ao norte do observado no clima presente. Este comportamento permite inferir que a ZCAS pode se posicionar um pouco

mais ao norte no clima futuro. A variância explicada da CP1 do MPICMIP5 no clima futuro é 22,4%, enquanto a encontrada no clima presente é 20,1%. Esse resultado leva a inferir que os casos relacionados a ZCAS podem ocorrer com uma maior frequência no clima futuro. Entretanto, a maior frequência de ZCAS não é uma resposta linear a um aumento no volume da precipitação, já que esses eventos podem se caracterizar por apresentarem totais pluviométricos mais baixos.

4 Conclusões

Este estudo investiga a habilidade de um conjunto de MCGs do CMIP5 e CMIP6 e de simulações do RegCM4 em reproduzir os principais padrões sinóticos de PNMM da ERA5 nos meses de verão (DJF) em um domínio da AS, considerando o período de 1995-2014. Além disso, é analisado se no período de 2080-2099, sob um cenário pessimista de mudanças climáticas (RCP8.5/SSP58.5), existem mudanças nos padrões da PNMM projetadas. A obtenção dos principais padrões espaciais de PNMM é realizada através da técnica de ACP. Entre os resultados destacam-se que:

- A CP1 da ERA5 está relacionada ao campo médio climatológico de verão, a CP2 à presença de uma frente fria que se estende do oceano Atlântico Sul em direção a costa do sudeste do Brasil e a CP3 está associada à ocorrência de eventos de ZCAS;
- O modelo MPICMIP5 é o que melhor consegue simular no clima presente os três padrões de PNMM mais dominantes (CP1, CP2 e CP3) da ERA5, sendo a CP2 do MPICMIP5 a CP mais bem correlacionada com a CP1 da ERA5, a CP3 do modelo com a CP2 da ERA5 e a CP1 do modelo com a CP3 da ERA5;
- Considerando o clima futuro, o modelo MPICMIP5 projeta que os casos relacionados a CP1 da ERA5 se tornem ligeiramente mais frequentes. Com relação à CP2 da ERA5 é projetado uma redução dos casos associados a esse campo. Já para a CP3, o modelo indica um aumento dos casos associados à ZCAS. Além disso, os padrões encontrados no presente praticamente persistem no clima futuro;

Espera-se que este estudo contribua para um melhor entendimento do clima na AS no período futuro, já que os resultados encontrados aqui fornecem subsídios relevantes que podem contribuir para um melhor entendimento da distribuição espacial da precipitação. Para complementar este estudo, recomenda-se para trabalhos futuros uma investigação da circulação em níveis médios da atmosfera

já que o que se observa na superfície não deixa de ser um reflexo da circulação de níveis mais altos.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao ERA5 e ao ESGF pelos dados disponibilizados. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6 Referências

- Accadia, C., Mariani, S., Casaioli, M., Lavagnini, A. & Speranza, A. 2003, 'Sensitivity of Precipitation Forecast Skill Scores to Bilinear Interpolation and a Simple Nearest-Neighbor Average Method on High-Resolution Verification Grids', *Weather and Forecasting*, vol. 8, no. 5, pp. 918-32, DOI:10.1175/1520-0434(2003)018<0918:SOPFSS>2.0.CO;2.
- Ashfaq, M., Cavazos, T., Reboita, M.S., Torres-Alavez, J.A., Im, E., Olusegun, C.F., Alves, L., Key, K., Adeniyi, M.O., Tall, M., Sylla, M.B., Mehmood, S., Zafar, Q., Das, S., Diallo, I., Coppola, E & Giorgi, F. 2020, 'Robust late twenty-first century shift in the regional monsoons in RegCM-CORDEX simulations', *Climate Dynamics*, vol. 57, no. 12, pp. 1463-88, DOI:10.1007/s00382-020-05306-2.
- Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J.B., Iversen, T., Kirkevåg, A., Seland, O., Drange, H., Roelandt, C., Seierstad, I.A., Hoose, C & Kristjánsson, J.E. 2012, 'The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M. Part 1: description and basic evaluation', *Geoscientific Model Development Discussions*, vol. 5, no. 3, pp. 2843-931, DOI:10.5194/gmdd-5-2843-2012.
- Compagnucci, R.H. & Salles, M.A. 1997, 'Surface Pressure Patterns during the year over Southern South America', *International Journal of Climatology*, vol. 17, no. 6, pp. 635-53, DOI: 10.1002/(SICI)1097-0088(199705)17:6%3C635::AID-JOC81%3E3.0.CO;2-B.
- Escobar, G.C.J. 2007, 'Padrões Sinóticos associados a ondas de frio na cidade de São Paulo', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 22, no. 2, pp. 240-53. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862007000200009>
- Escobar, G.C.J. 2019, 'Classificação sinótica durante a estação chuvosa do Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 2, pp. 421-36, DOI:10.11137/2019_2_421_436.
- Escobar, G.C.J. & Reboita, M.S. 2022, 'Relationship between daily atmospheric circulation patterns and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events', *Atmosfera*, vol. 35, no. 1.
- Escobar, G.C.J. & Seluchi, M.E. 2012, 'Classificação sinótica dos campos de pressão atmosférica na América do Sul e sua relação com as Baixas do Chaco e do Noroeste Argentino', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 27, no. 3, pp. 365-75, DOI:10.1590/S0102-77862012000300011.
- Escobar, G.C.J., Seluchi, M.E. & Andrade, K. 2016. 'Classificação sinótica de frentes frias associadas a chuvas extremas no leste de Santa Catarina (SC)', *Revista Brasileira de Meteorologia* 31, pp. 649-661, DOI: 10.1590/0102-7786312314b20150156
- Escobar, G.C.J., Vaz, J.C.M. & Reboita, M.S. 2019, 'Circulação atmosférica em superfície associada às friagens no centro-oeste do Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 1, pp. 241-54, DOI:10.11137/2019_1_241_254.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J. & Taylor K.E. 2016, 'Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization', *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 5, pp. 1937-58, DOI:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Fahad, A., Burls, N.J. & Strasberg, Z. 2020, 'How will southern hemisphere subtropical anticyclones respond to global warming? Mechanisms and seasonality in CMIP5 and CMIP6 model projections', *Climate Dynamics*, vol. 55, no. 3, pp. 703-18, DOI:10.1007/s00382-020-05290-7.
- Ferreira, G.W.S., Reboita, M.S. & Rocha, R.P. 2019, 'Vórtices ciclônicos de altos níveis nas cercanias do Nordeste do Brasil: climatologia e análise da vorticidade potencial isentrópica', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 42, no. 3, pp. 568-85, DOI:10.11137/2019_3_568_585.
- Gan, M.A., Kousky, V. & Roupelewski, C.F. 2004, 'The South America Monsoon Rainfall over West-Central Brazil', *Journal of Climate*, vol. 17, no. 1, pp. 47-66, DOI:10.1175/1520-0442(2004)017<0047:TSAMCA>2.0.CO;2.
- Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttlinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, Heinz-Diete, Ilyina, T., Kinne, S., Kornbluh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segsneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, Claudia., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K., Claussen, M., Marotzke, J. & Stevens, B. 2013, 'Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5', *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 572-97, DOI:10.1002/jame.20038.
- Gonçalves, F.L.T., Braun, S., Dias, P.L.S. & Sharovsky, R. 2007, 'Influences of the weather and air pollutants on cardiovascular disease in the metropolitan area of São Paulo', *Environmental Research*, vol. 104, no. 2, pp. 275-81, DOI:10.1016/j.envres.2007.01.004.
- Green, P.E. & Carroll, D.J. 1978, *Analyzing Multivariate Data*, The Dryden Press, Illinois.
- Grimm, A.M. 2004, 'How do La Niña events disturb the summer monsoon system in Brazil?', *Climate Dynamics*, vol. 22, no. 2, pp. 123-38, DOI:10.1007/s00382-003-0368-7.
- Gutowski Jr, W.J., Giorgi, F., Timbal, B., Frigon, A., Jacob, D., Kang, H.-S., Raghavan, K., Lee, B., Lennard, C., Nikulin, G., O'Rourke, E., Rixen, M., Solman, S., Stephenson, T. & Tangang, F. 2016, 'WCRP Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX): a diagnostic MIP for CMIP6', *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 11, pp. 4087-95, DOI:10.5194/gmd-9-4087-2016.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita,

- M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dec., D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. & Thépaut, J.-N. 2020, 'The ERA5 global reanalysis', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, no. 730, pp. 1999-2049, DOI:10.1002/qj.3803.
- Hoyos, I., Cañón-Barriga, J., Arenas-Suárez, T., Dominguez, F. & Rodríguez, B.A. 2019, 'Variability of regional atmospheric moisture over Northern South America: patterns and underlying phenomena', *Climate Dynamics*, vol. 52, no. 2, pp. 893-911, DOI:10.1007/s00382-018-4172-9.
- Johnson, R.A. & Wichern, D.W. 2007, *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Jones, C.D., Hughes, J.K., Bellouin, N., Hardiman, S.C., Jones, G.S., Knight, J., Liddicoat, S., O'Connor, F.M., Andres, R.J., Bell, C., Boo, K.O., Bozzo, A., Butchart, N., Cadule, K.D., Corbin, M., Doutriaux-Boucher, M., Friedlingstein, P., Gornall, J., Gray, L., Halloran, P.R., Hurtt, G., Ingram, W.J., Lamarque, J.F., Law, R.M., Meinshausen, M., Osprey, S., Palin, E.J., Parsons Chini, L., Raddatz, T., Sanderson, M.G., Sellar, A.A., Schurer, A., Valdes, P., Wood, N., Woodward, S., Yoshioka, M. & Zerroukat, M. 2011, 'The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations', *Geoscientific Model Development*, vol. 4, no. 3, pp. 543-70, DOI:10.5194/gmd-4-543-2011.
- Lyra, M.J. & Arraut, J.M. 2020, 'Análise termodinâmica de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Nordeste do Brasil', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 43, no. 4, pp. 302-09, DOI:10.11137/2020_4_302_309.
- Marengo, J.A., Ambrizzi, T., Alves, L.M., Barreto, N.J.C., Reboita, M.S. & Ramos, A.M. 2020, 'Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts', *Frontiers in Climate*, vol. 2, pp. 2-3, DOI:10.3389/fclim.2020.00003.
- Marengo, J.A., Liebmann, B., Grimm, A.M., Misra, V., Dias, P.L.S., Cavalcanti, I.F.A., Carvalho, L.M.V., Berbery, E.H., Ambrizzi, T., Vera, C.S., Saulo, A.C., Nogueira-Paegle, J., Zipser, E., Seth, A. & Alves, L.M. 2012, 'Recent developments on the South American monsoon system', *International Journal of Climatology*, vol. 32, no. 1, pp. 1-21, DOI:10.1002/joc.2254.
- Mauritsen, T., Bader, J., Becker, T., Behrens, J., Bittner, M., Brokopf, R., Brovkin, V., Claussen, M., Crueger, T., Esch, M., Fast, I., Fiedler, S., Fläschner, D., Gayler, V., Giorgetta, M., Goll, D.S., Haak, H., Hagemann, S., Hedemann, C., Hohenegger, C., Ilyina, T., Jahns, T., Jimenez-de-la-Cuesta, D., Jungclaus, J., Kleinen, T., Kloster, S., Kracher, D., Kinne, S., Kleberg, D., Lasslop, G., Kornbluh, L., Marotzke, J., Matei, D., Meraner, K., Mikolajewicz, U., Modali, K., Möbis, B., Müller, W.A., Nabel, J.E.M.S., Nam, C.C.W., Notz, D., Nyawira, S.-S., Paulsen, H., Peters, K., Pincus, R., Pohlmann, H., Pongratz, J., Popp, M., Raddatz, T.J., Rast, S., Redler, R., Reick, C.H., Rohrschneider, T., Schemann, V., Schmidt, H., Schnur, R., Schulzweida, U., Six, K.D., Stein, L., Stemmler, I., Stevens, B., Storch, J.-S., Tian, F., Voigt, A., Vrese, P., Wieners, K.-H., Wilkenskjaeld, S., Winkler, A. & Roeckner, E. 2019, 'Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPIESM1.2) and Its Response to Increasing CO₂', *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, vol. 11, no. 4, pp. 998-1038, DOI:10.1029/2018MS001400.
- Meehl, G.A. & Bony, S. 2011, 'Introduction to CMIP5', *Clivar Exchanges*, vol. 16, no. 56, pp. 4-5.
- Montini, T.L., Jones, C. & Carvalho, L.M.V. 2019, 'The South American Low-Level Jet: a New Climatology, Variability, and Changes', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 124, no. 3, pp. 1200-18, DOI:10.1029/2018JD029634.
- Moon, S. & Ha, K.-J. 2020, 'Future changes in monsoon duration and precipitation using CMIP6', *Climate and Atmospheric Science*, vol. 3, no. 45, pp. 1-7, DOI:10.1038/s41612-020-00151-w.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. & Wilbanks, T.J. 2010, 'The next generation of scenarios for climate change research and assessment', *Nature*, vol. 463, no. 7282, pp. 747-56, DOI:10.1038/nature08823.
- Moura, C.R.W., Escobar, G.C.J. & Andrade, K.M. 2013, 'Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 28, no. 3, pp. 267-80, DOI:10.1590/S0102-77862013000300004.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C.T., Van Vuuren, P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M. 2016, 'The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6', *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 9, pp. 3461-82, DOI:10.5194/gmd-9-3461-2016.
- Pascale, S., Carvalho, L.M.V., Adams, D.K., Castro, C.L. & Cavalcanti, I.F.A. 2019, 'Current and Future Variations of the Monsoons of the Americas in a Warming Climate', *Current Climate Change Reports*, vol. 5, no. 3, pp. 125-44, DOI:10.1007/s40641-019-00135-w.
- Reboita, M.S., Ambrizzi, T., Silva, B.A., Pinheiro, R.F. & Rocha, R.P. 2019, 'The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate', *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, pp. 8, DOI:10.3389/feart.2019.00008.
- Reboita, M.S., Campos, B., Santos, T., Gan, M.A. & Carvalho, V.S.B. 2017, 'Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil', *Revista Brasileira de Geografia Física*, vol. 10, no. 1, pp. 41-59, DOI:10.5935/1984-2295.20170004.
- Reboita, M.S., Escobar, G.C.J. & Lopes, V.S. 2015, 'Climatologia sinótica de eventos de ondas de frio sobre a região sul de Minas Gerais', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 16, pp. 72-92, DOI:10.5380/abclima.v16i0.40327.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010, 'Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, no. 2, pp. 185-204, DOI:10.1590/S0102-77862010000200004.
- Reboita, M.S., Kuki, C.A.C., Marrafon, V.H., Souza, C.A., Ferreira, G.W., Teodoro, T.A. & Lima, J.W.M. 2021, 'South America Climate Change Revealed Through Climate Indices Projected by GCMs and Eta-RCM Ensembles', *Climate Dynamics*, vol. 58, no. 24, pp. 459-85, DOI:10.1007/s00382-021-05918-2.

- Reboita, M.S., Reale, M., Rocha, R.P., Giorgi, F., Giuliani, G., Coppola, E., Nino, R.B.L., Llopart, M., Torres, J.A. & Cavazos, T. 2020, 'Future changes in the wintertime cyclonic activity over the CORDEX-CORE southern hemisphere domains in a multi-model approach', *Climate Dynamics*, vol. 57, no. 2, pp. 1533-49, DOI:10.1007/s00382-020-05317-z.
- Richman, M. 1986, 'Rotation of Principal Components', *Journal of Climatology*, vol. 06, no. 3, pp. 293-335, DOI:10.1002/joc.3370060305.
- Ridley, J., Menary, M., Kuhlbrodt, T., Andrews, M. & Andrews, T. 2019, 'MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical', *Earth System Grid Federation*. DOI:10.22033/ESGF/CMIP6.6109.
- Santos, D.F. & Reboita, M.S. 2018, 'Jatos de baixos níveis a leste dos Andes: Comparação entre duas reanálises', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 22, pp. 340-62, DOI:10.5380/abclima.v22i0.47595.
- Seland, Ø., Bentsen, M., Graff, L.S., Olivie, D., Toniazzo, T., Gjermundsen, A., Debernard, J.B., Gupta, A.L., He, Y., Kirkevåg, A., Schwinger, J., Tjiputra, J., Aas, K.S., Bethke, I., Fan, Y., Griesfeller, J., Grini, A., Guo, C., Ilicak, M., Karset, I.H.H., Landgren, O., Liakka, J., Moseid, K.O., Nummelin, A., Spensberger, C., Tang, H., Zhang, Z., Heinze, C., Inversen, T. & Schulz, M. 2020, 'The Norwegian Earth System Model, NorESM2 - Evaluation of the CMIP6 DECK 655 and historical simulations', *Geoscientific Model Development Discussions*, vol. 378, pp. 1-68, DOI:10.5194/gmd-2019-378.
- Seluchi, M.E., Beu, C.M.L. & Andrade, K.M. 2016, 'Características das frentes frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana de Rio de Janeiro', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 18, pp. 361-76.
- Seluchi, M.E. & Saulo, A.C. 2012, 'Baixa do Noroeste Argentino e baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 27, no. 1, pp. 49-60, DOI:10.5380/abclima.v18i0.45369.
- Sena, A.C.T. & Magnusdottir, G. 2020, 'Projected End-of-Century Changes in the South American Monsoon in the CESM Large Ensemble', *Journal of Climate*, vol. 33, no. 18, pp. 859-874, DOI:10.1175/JCLI-D-19-0645.1.
- Silva, J.P., Reboita, M.S. & Escobar, G.C.J. 2019, 'Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 25, pp. 355-77, DOI:10.5380/abclima.v25i0.64101.
- Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C.R., Nogues-Paegle, J., Dias P.L.S. & Zhang C. 2006, 'Toward a Unified View of the American Monsoon Systems', *Journal of Climate*, vol. 19, no. 20, pp. 4977-5000, DOI:10.1175/JCLI3896.1.
- Wang, B., Jin, C. & Liu, J. 2020, 'Understanding Future Change of Global Monsoons Projected by CMIP6 Models', *Journal of Climate*, vol. 33, no. 15, pp. 6471-89, DOI:10.1175/JCLI-D-19-0993.1.
- Wilks, D. 2011, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 3rd edn, Elsevier Academic Press, Amsterdam, Boston.
- Yin, L., Fu, R., Shevliakova, E. & Dickinson, R.E. 2013, 'How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America?', *Climate Dynamics*, vol. 41, no. 11-12, pp. 3127-43, DOI:10.1007/s00382-012-1582-y.
- Zhou, J. & Lau, K.M. 1998, 'Does a Monsoon Climate Exist Over South America?', *Journal of Climate*, vol. 11, no. 5, pp. 1020-40, DOI:10.1175/1520-0442(1998)011<1020:DA MCEO>2.0.CO;2.

Como citar:

Teodoro, T.A., Reboita, M.S. & Escobar, G.C.J. 2022, 'Principais Padrões de Verão da Pressão ao Nível do Mar sobre a Região da América do Sul no Clima Presente e em Projeções Futuras', *Anuário do Instituto de Geociências*, 45:40597. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_40597

Contribuições dos Autores

Thales Alves Teodoro: conceitualização; análise formal; metodologia; validação; rascunho original escrito; visualização. **Michelle Simões Reboita:** conceitualização; análise formal; metodologia; validação; rascunho original escrito; redação – revisão e edição; visualização e supervisão. **Gustavo Carlos Juan Escobar:** conceitualização; metodologia e supervisão.

Conflito de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Declaração de disponibilidade de dados

Os conjuntos de dados de referência podem ser baixados em: <https://climate.copernicus.eu/climate-reanalysis> e <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/>. Scripts e código estão disponíveis mediante solicitação.

Financiamento

Não aplicável

Editora chefe

Dra. Claudine Dereczynski

Editora Associada

Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos