

REGIONALIZAÇÃO DAS ANOMALIAS DE PRECIPITAÇÃO NO SUDESTE DA AMÉRICA DO SUL

Tainã Costa Peres

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Geografia – POSGEA/UFRGS
tainacperes@gmail.com

Francisco Eliseu Aquino

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Geografia – POSGEA/UFRGS
Centro Polar e Climático – CPC/UFRGS
francisco.aquino@ufrgs.br

Denilson Ribeiro Viana

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Centro Polar e Climático – CPC/UFRGS
ribeiro.denilson@gmail.com

RESUMO

O Sudeste da América do Sul apresenta complexa variabilidade climática, que acarreta no estabelecimento de anomalias positivas e negativas de precipitação. Nesse cenário, o objetivo foi identificar Regiões Homogêneas de Anomalias de Precipitação na região (1961-2020) e caracterizar suas climatologias. Aplicou-se estatística multivariada e descritiva nos dados mensais de chuva do *Climatic Research Unit* (CRU). Para a regionalização das anomalias das chuvas empregou-se a Análise de Agrupamento Hierárquico. Após a determinação das regiões, foram elaboradas séries temporais dos totais mensais. Sequencialmente, calcularam-se as médias mensais e as normais climatológicas (1961-1990/1991-2020). Foram identificados seis clusters, sendo que as regiões 1-2 localizam-se entre 32°-40°S; as regiões 3-4 entre 24°-32°S; e as regiões 5-6 entre 20°-27°S. As regiões 1-2-4-5-6 são influenciadas pela circulação regional, favorecendo a configuração de períodos secos (úmidos) no inverno (verão). As regiões 4-5-6 apresentam aspectos climatológicos característicos das monções. A região 3 não apresenta predominância de períodos secos e úmidos. A comparação das normais climatológicas mostrou predominância de maiores magnitudes entre 1991-2020. Adicionalmente, diferenças ocorreram, especialmente, durante a primavera, o verão e o outono. Os resultados contribuem para o melhor entendimento dos padrões da precipitação na região e podem servir de suporte para investigações acerca da variabilidade e mudança climática.

Palavras-chave: Chuvas. Cluster. Regiões Homogêneas. Normais Climatológicas.

REGIONALIZATION OF PRECIPITATION ANOMALIES IN SOUTHEAST OF SOUTH AMERICA

ABSTRACT

Southeast of South America presents complex climatic variability, which leads to the establishment of positive and negative precipitation anomalies. In this scenario, the objective was to identify Homogeneous Regions of Precipitation Anomalies in the region (1961-2020) and characterize their climatologies. Multivariate and descriptive statistics were applied to monthly precipitation data from the *Climatic Research Unit* (CRU). The Hierarchical Cluster Analysis was used to execute the regionalization of precipitation anomalies. After determining the regions, time series of the monthly totals were obtained. Sequentially, monthly averages and climatological normals were calculated (1961-1990/1991-2020). Six clusters were identified: regions 1-2 being located at 32°-40°S; regions 3-4 at 24°-32°S; and regions 5-6 at 20°-27°S. Regions 1-2-4-5-6 are affected by regional circulation, supporting the development of periods of drought (wet) in winter (summer). Regions 4-5-6 present climatological aspects of monsoon precipitation. The comparison of climatological normal showed a predominance of greater magnitudes between 1991-2020. In addition, there were some differences, especially, during spring, summer and autumn. The results contributed to a better understanding of the precipitation patterns in the region and can support further investigations of variability and climatic change.

Keywords: Rainfall. Cluster. Homogeneous Regions. Climatological Normals.

INTRODUÇÃO

A América do Sul é marcada por distintos regimes climáticos e pluviométricos, que variam da extrema aridez (e.g. áreas desérticas), até climas extremamente úmidos (e.g. áreas de florestas tropicais) (FEREIRA e REBOITA, 2022). Essa condição é oriunda da grande extensão territorial do continente, associada a diversificada geografia e a circulação atmosférica regional. Nesse cenário, o Sudeste da América do Sul (SESA, sigla em inglês) localiza-se em latitudes que são favoráveis à atuação de sistemas atmosféricos tropicais e extratropicais que, associado ao relevo diversificado, à variabilidade latitudinal e à maritimidade/continentalidade, contribuem para a ocorrência de contrastes de precipitação nesta região (REBOITA et al., 2010; BETTOLLI et al., 2021).

A distribuição anual das chuvas no SESA varia entre 700-1400 mm no centro-leste da Argentina e Paraguai; entre 1050-1750 mm no Uruguai e sul do Brasil e do Paraguai; e entre 1750-2100 mm no oeste do sul do Brasil (fronteira com o Paraguai) (REBOITA et al., 2010). A região é frequentemente atingida por eventos extremos de precipitação associados, principalmente, à atividade sinótica extratropical durante o inverno austral, à ciclogênese durante as estações de transição e aos Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) durante a estação quente (outubro a maio) (DURKEE; MOTE; SHEPHERD, 2009; CAVALCANTI, 2012; MORAES et al., 2020).

É importante destacar que o SESA apresenta um acentuado adensamento populacional, com grandes aglomerados urbanos, de modo que as economias locais dependem fortemente da agropecuária, a geração de energia tem base na hidrelétrica e o transporte fluvial facilita a integração regional (BARROS; CLARKE; DIAS, 2006). Além disso, a Bacia do Rio da Prata, uma das maiores reservas de água doce do mundo, encontra-se situada no SESA (CAVALCANTI, 2012). Por consequência, o estudo acerca do comportamento e distribuição das chuvas nessa região, tem sido alvo de interesse em diversas investigações (SEAGER et al., 2010; GONZALEZ et al., 2014; GÓMEZ e BARREIRO, 2017; ZHANG et al., 2016). Nesse âmbito, técnicas estatísticas, sobretudo as análises de agrupamento, têm sido amplamente usadas para estudos de climatologia (GONG e RICHMAN, 1995; FERREIRA e REBOITA, 2022), sendo que inúmeras investigações fazem o agrupamento (regionalização) da precipitação para diferentes áreas do SESA.

Viana (2015) com o banco de dados do *Centro Global de Climatologia de Precipitação* (GPCC, sigla em inglês) e do *Unidade de Pesquisa Climática* (CRU) entre 1951 e 2010 para a região centro-sul do Brasil (entre as latitudes 34°S e 10°S) e técnicas de Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH), identificou quatro Regiões Homogêneas (RH) de precipitação, sendo que a RH1 compreende o Rio Grande do Sul (RS), e o sul do Paraná, a RH2 é composta pelo norte do Paraná, São Paulo (SP) e Mato Grosso do Sul (MS), na RH3 encontra-se o Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais, Goiás, o leste de Mato Grosso e o sul de Tocantins e da Bahia e a RH4 compreende o oeste de Mato Grosso. Becker, Braga e Ceballos (1992) aplicaram a AAH em dados mensais de chuva entre 1931 e 1960 em 41 estações meteorológicas do Rio Grande do Sul e identificaram cinco regiões homogêneas de precipitação.

O Pampa Argentino foi clusterizado (1960 -2010) por Aliaga, Ferrelli e Piccolo (2017) resultando em oito regiões climatologicamente homogêneas, tais como: clima subtropical; clima quente-úmido; clima quente do planalto das colinas pampeanas; clima temperado e muito úmido; clima planalto temperado das colinas de Ventania; clima temperado oceânico; clima semiárido; e clima continental. Terassi e Galvani (2017) identificaram três regiões homogêneas de chuva no Paraná, denominadas Bacia Hidrográfica Alto do Iguaçu, Bacia Hidrográfica Ribeira e Bacia Hidrográfica Litorânea. Estudos de regionalização das chuvas também foram feitos para o estado de Mato Grosso do Sul, sendo que foram identificados cinco grupos (TEODORO et al., 2015). Ferreira e Reboita (2022), com o uso de AA não-hierárquica, identificaram oito regiões homogêneas de precipitação para a América do Sul, entre 1993 e 2016, sendo que o SESA se localiza dividido entre duas regiões, com a maior parte na região 4 e uma pequena porção na região 3.

O SESA também tem sido alvo de interesse no que tange a investigações relacionadas às mudanças climáticas e, sobretudo, às mudanças nos padrões de chuvas médias, anômalas e de eventos extremos. Além disso, recentemente, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), indicou o SESA como uma área de alerta em nível global, por apresentar não só tendência de aumento de chuvas na estação quente, mas evidências de aumento na frequência e na intensificação de eventos extremos de chuva (IPCC, 2021). Nesse cenário, se faz necessário aprofundar estudos que considerem a distribuição espaço-temporal das chuvas em todo o SESA, bem como aplicar técnicas estatísticas que permitam a regionalização (agrupamento) das chuvas, principalmente, relacionados a distribuição das anomalias.

Diante do exposto, o objetivo da presente investigação foi identificar Regiões Homogêneas de Anomalia de Precipitação e caracterizar suas climatologias sobre SESA entre 1961-2020. Para isso, foram utilizados dados dos totais mensais de precipitação disponibilizado pelo *Climatic Research Unit* (CRU), e aplicadas técnicas estatísticas multivariadas – como Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH) para a regionalização das anomalias – e descritivas – como as medidas centrais para construção e análise da climatologia da regionalização do SESA.

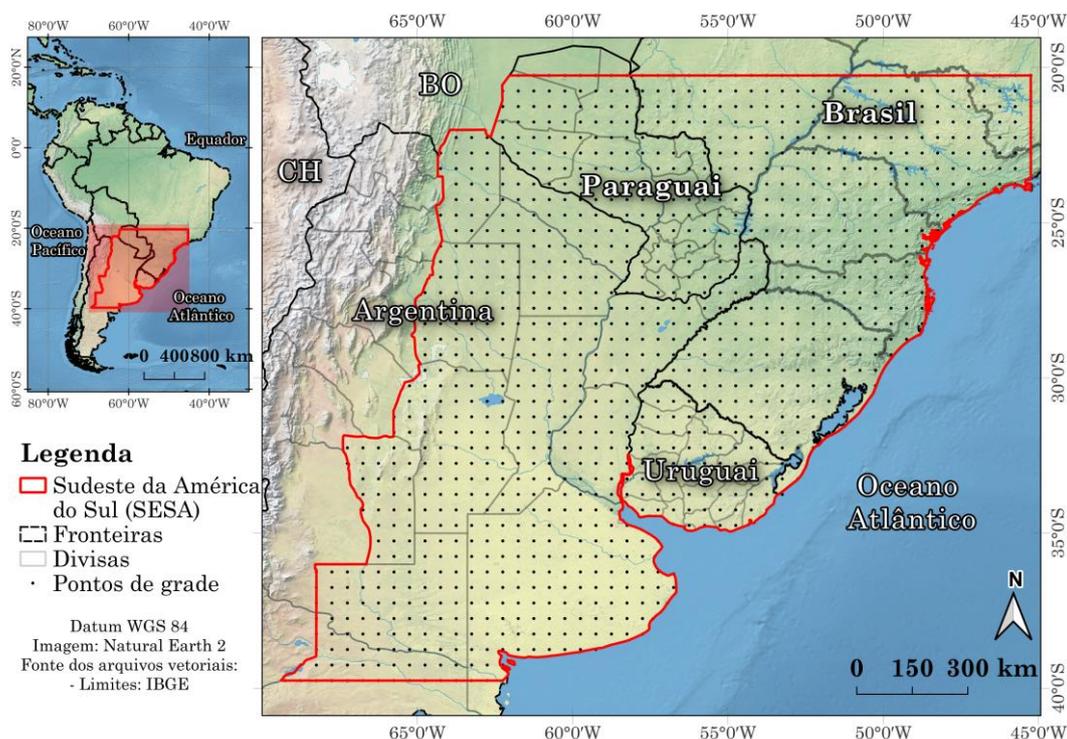
Caracterização da área de estudo

A investigação compreende o SESA, o qual inclui o Brasil, o Paraguai, o Uruguai e o leste da Argentina (Figura 1), com uma população estimada de aproximadamente 230 milhões de habitantes (NAÇÕES UNIDAS, 2022). Diversos estudos indicam que o SESA se localiza entre as latitudes 20°S e 40°S, sendo que o limite longitudinal não é bem definido, embora se entenda que é a leste da Cordilheira dos Andes (ZHANG et al., 2016; BETTOLLI et al., 2021; IPCC, 2021).

Na presente pesquisa, os limites latitudinais abrangeram do sul do Mato Grosso do Sul e de São Paulo no Brasil, e do Paraguai até o norte de Rio Negro na Argentina. Já os limites longitudinais estão entre 45°-65° W, sendo que a leste é delimitado pelo Oceano Atlântico e a oeste pelo Paraguai e pelas províncias argentinas de La Pampa, San Luis, Córdoba, Santiago Del Estero, e uma área de Salta. É importante destacar que foi considerada a máxima extensão territorial sem incluir a Cordilheira dos Andes, para minimizar os efeitos da orografia nas análises, por meio da observação dos valores de altitude da superfície.

A configuração geográfica diversificada do SESA possibilita a atuação e o desenvolvimento de diferentes mecanismos e sistemas atmosféricos, os quais desempenham papéis importantes na distribuição espaço-temporal das chuvas da região (BETTOLLI et al., 2021). Desta maneira, tem-se a atuação e a influência de sistemas atmosféricos como os sistemas frontais (PAMPUCH e AMBRIZZI, 2016), os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) (DURKEE; MOTE; SHEPHERD, 2009; MORAES et al., 2020) e o os centros de alta e baixa pressão (REBOITA et al., 2010; JANTSCH e AQUINO, 2020).

Figura1 – Localização do Sudeste da América do Sul (polígono em vermelho). Os pontos pretos representam a grade da CRU.



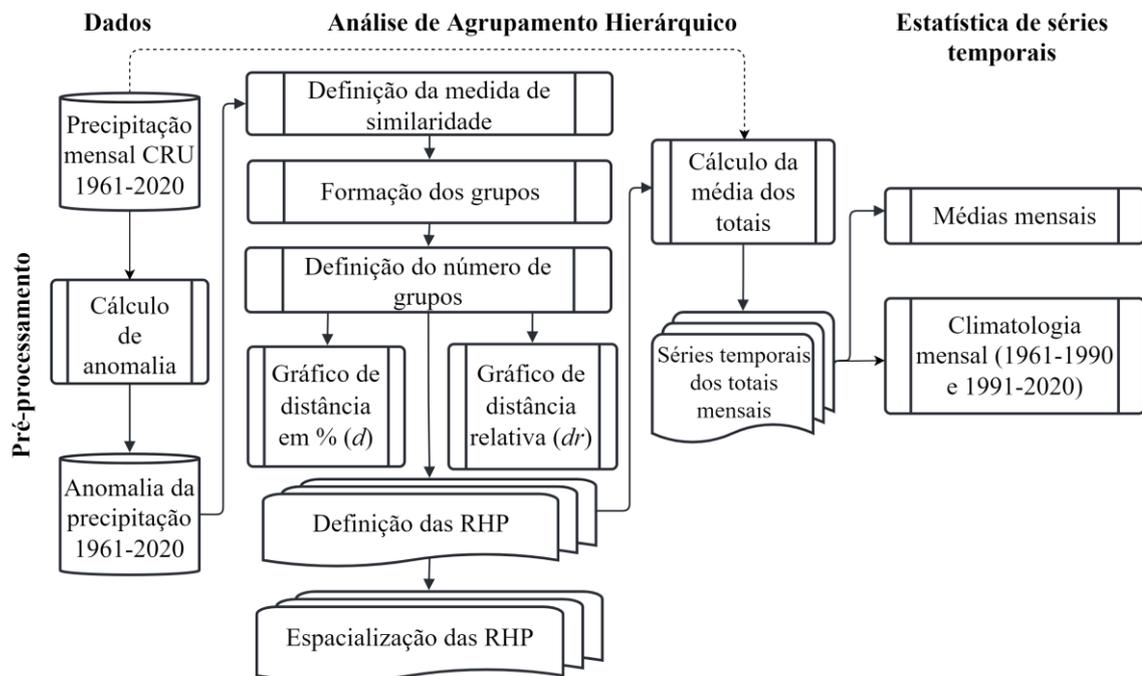
Fonte - Malha territorial – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2022).

Elaboração - Os autores, 2022.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos consistiram em: Dados e pré-processamento; Análise de Agrupamento Hierárquico; e Estatística de séries temporais (Figura 2).

Figura 2 - Fluxograma com as etapas metodológicas.



Elaboração - Os autores, 2022.

Dados e pré-processamento

Os totais mensais da precipitação (1961-2020) são gerados e disponibilizados gratuitamente pelo *Climatic Research Unit* (CRU), versão TS 4.06. São oriundos da compilação e interpolação de observações (estações) históricas de diversas fontes e compõem o banco de dados com grade de alta resolução do CRU. Os valores dos totais mensais de precipitação foram interpolados espacialmente em uma grade de 0,5° de latitude e longitude. A interpolação é feita com valores de anomalia e é denominada *Ponderação de Distância Angular*. Para maiores informações consultar New, Hulme e Jones (1999) e Harris et al. (2020).

A grade selecionada abrange uma área entre 20°-40°S e 65°-45°W, sendo que os limites longitudinais foram definidos conforme a delimitação da costa (leste) e o aumento da altitude (oeste), totalizando em 1.173 pontos (Figura 1). A dimensão temporal é definida entre janeiro de 1961 e dezembro de 2020, totalizando 60 anos (720 meses). É importante destacar que o período possibilitou a elaboração de duas climatologias, sendo 1961-1990 e 1991-2020, conforme o padrão estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (WMO, sigla em inglês), para determinação das normais climatológicas (WMO-N° 100, 2018).

Foram calculadas as anomalias das chuvas, obtidas pela subtração da média mensal das amostras, dividida pelo desvio padrão, conforme equação:

$$a_i = \frac{(x_i - \mu)}{S_i}$$

em que a_i é igual a anomalia, μ é a média mensal de todo o período e S é o desvio padrão mensal.

Esse procedimento visa minimizar a influência do ciclo sazonal e maximizar as variações em outras escalas de tempo. Além disso, a divisão pelo desvio padrão faz a normalização dos dados. Esse processo é útil, pois existem regiões em que a variável precipitação tem uma alta variabilidade (alto desvio padrão), assim como outras regiões apresentam baixa variabilidade (baixo desvio padrão).

Análise de Agrupamento Hierárquico

Para a identificação das Regiões Homogêneas de Anomalias de Precipitação (RHAP) no SESA foi aplicada a AAH também conhecida como clusterização. É importante destacar que a clusterização foi feita com a anomalia dos dados de precipitação (consulte Dados e pré-processamento). A AAH é dada por três etapas: (a) definição da medida de dissimilaridade; (b) definição do método de agrupamento, em que os elementos são divididos em grupos (clusters); e 3) definição do número de grupos a ser considerado. Para o presente estudo, foi utilizado AAH baseada na métrica de Distância Euclidiana e no método de Ward, que serão detalhados na sequência. Esses critérios foram definidos conforme as indicações de diversos estudos, tais como: Becker, Braga e Ceballos (1992), Gong e Richman (1995), Landim (2010), Viana (2015) e Aliaga, Ferrelli e Piccolo (2017).

A Distância Euclidiana permitiu encontrar a distância geométrica entre dois pontos, dada pela raiz quadrada da soma das diferenças quadradas entre os valores dos elementos. O método de Ward possibilitou identificar grupos com aproximadamente o mesmo número de elementos. Esse método é baseado nos seguintes princípios: (a) cada elemento é tido como um grupo isolado; (b) em cada passo do algoritmo, mensura-se a soma de quadrados dentro de cada grupo (GONG e RICHMAN, 1995; MINGOTI, 2005; VIANA, 2015).

Por fim, destaca-se que a escolha do número de grupos final é subjetiva, embora existam diversos métodos que auxiliam nessa determinação. Segundo Mingoti (2005), o objetivo é que o número de grupos esteja relacionado à “partição natural” do conjunto de dados que está sendo agrupado. Nesse sentido, Viana (2015) destaca que conforme o algoritmo avança, vai decrescendo a distância entre grupos, diminuindo a semelhança entre eles. Sendo assim, para a determinação do número de grupos, isto é, do número de Regiões Homogêneas de Anomalia de Precipitação (RHAP), foi feita a interpretação integrada das distâncias (d) e diferenças relativas (dr) em percentuais entre grupos. Consideraram-se os pontos de maiores “saltos” (maiores distâncias) entre grupos, pois esses pontos indicam o momento ideal de parada do algoritmo e o número final de grupos. Os limiares adotados para a determinação do número de grupos, isto é, do número de RHAP, sobre o SESA serão descritos no capítulo de resultados.

Após a definição dos clusters, ou seja, das RHAP para o SESA, foram geradas as séries temporais correspondentes. É importante destacar que para cada região foram elaboradas séries temporais compostas pela média dos totais mensais. As séries foram construídas considerando a média dos quatro pontos centrais de cada grupo para minimizar a influência dos limites entre grupos (área de transição). A determinação dos quatro pontos centrais foi feita por meio da identificação do centroide de cada cluster (polígono) no programa livre QGIS 3.24, em geometria-ferramenta de centroide.

Estatística de séries temporais

Para compreender a climatologia de cada RHAP identificada pelo processo de clusterização, as séries temporais do total mensal foram usadas para mensuração das médias mensais ao longo dos 60 anos analisados. Adicionalmente, para observar possíveis alterações nos padrões mensais médios de chuvas, calcularam-se as médias mensais para os dois períodos (1961-1990 e 1991-2020), isto é, as normais climatológicas (WMO-Nº100, 2018). Ambos os resultados serão apresentados com representação gráfica, evidenciando aspectos da climatologia mensal das RHAP do SESA entre 1961-2020.

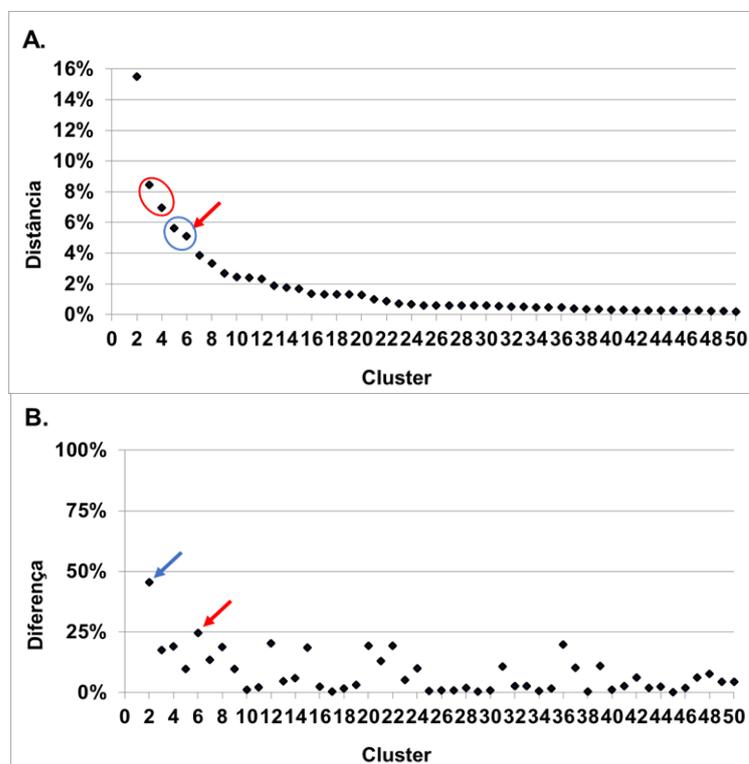
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados serão apresentados a partir da discussão dos seguintes pontos: Regiões Homogêneas de Anomalia de Precipitação no SESA e Climatologia da precipitação nas RHAP no SESA.

Regiões Homogêneas de Anomalia de Precipitação no SESA

Para a determinação do número de grupos que representam as RHAP no SESA, foi analisada a distância existente entre grupos ("saltos") a partir dos últimos 50 estágios da clusterização. A Figura 3-A apresenta as distâncias em percentual (d) entre os grupos, em que se pode observar um salto (maior distância) entre os grupos três-quatro ($d=8\%$ e $d=7\%$), representado pelo círculo vermelho na Figura 3-A, e cinco-seis ($d=6\%$ e $d=5\%$), representado pelo círculo azul da Figura 3-A. Depois do sexto grupo (representado pela seta vermelha na Figura 3-A) as distâncias (saltos entre grupos) possuem a mesma ordem de grandeza, isto é, possuem uma diferença menor do que 1%. As diferenças relativas (dr), indicam que a maior dr pode ser observada no grupo dois ($dr=45\%$, representado pela seta azul na Figura 3-B), seguida pelo grupo 6 ($dr=25\%$, representado pela seta vermelha na Figura 3-B). Contudo, a análise integrada dos gráficos sugere uma divisão em seis clusters, pois a partir do grupo seis ocorre a diminuição das distâncias e das diferenças relativas entre grupos. Portanto, foram definidas seis Regiões Homogêneas de Anomalia de Precipitação para o SESA entre 1961-2020.

Figura 3 - Gráficos com os últimos 50 estágios da clusterização; A) Distância em percentual, o círculo vermelho mostra o salto entre os grupos três-quatro, o círculo azul mostra o salto entre os grupos cinco-seis, a seta vermelha identifica o grupo 6; B) Diferenças relativas, o grupo dois está evidenciado pela seta azul e o seis pela seta vermelha.

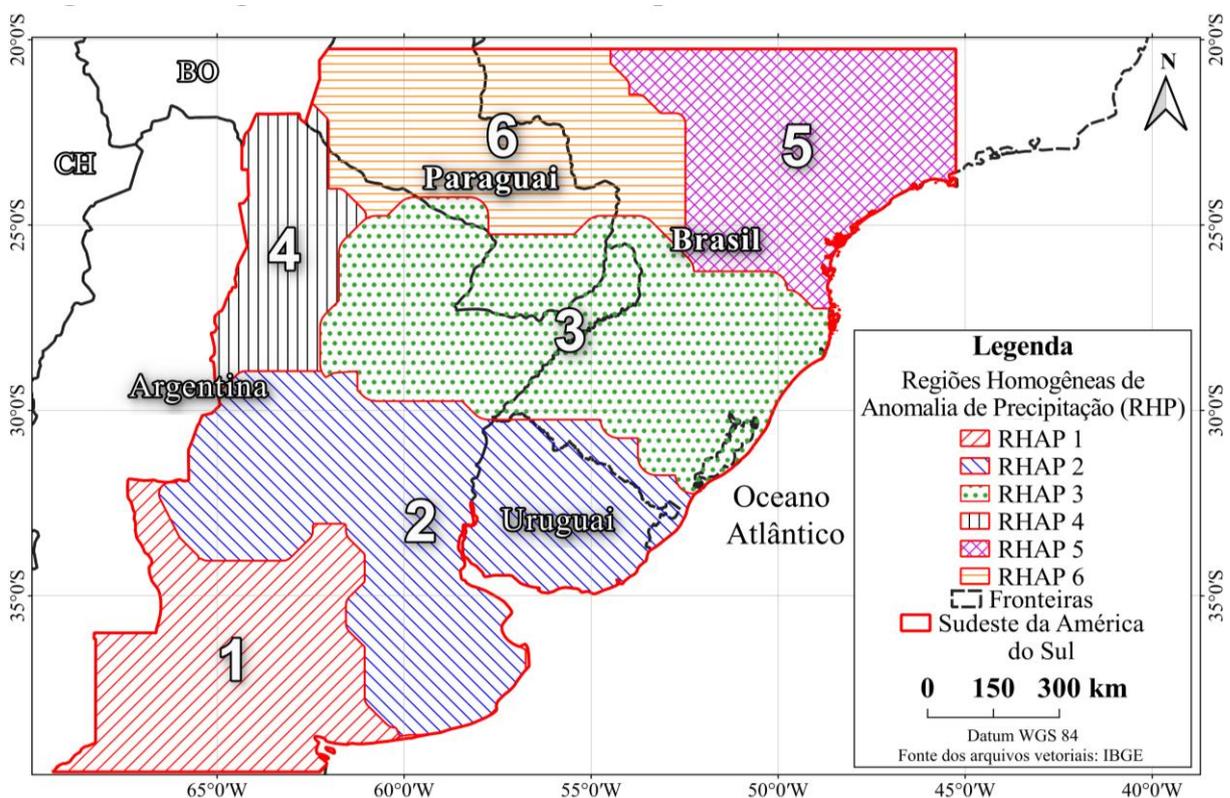


Elaboração - os autores, 2022.

A distribuição espacial das seis RHAP do SESA pode ser observada na Figura 4. A RHAP-1 localiza-se no sul do SESA, entre as latitudes ~ 31° S e 40° S, e comporta apenas províncias da Argentina central. A RHAP-2, situa-se entre as latitudes ~ 28° S e 59° S, sendo formada pelas províncias da Argentina, pelo Uruguai, o sudoeste e sul do Rio Grande do Sul (RS). A RHAP-3 é constituída pelo RS, por Santa Catarina (SC), pelo sudoeste do Paraná, pelo sul do Paraguai e pelas províncias do nordeste da Argentina, entre as latitudes ~ 24° S e 32° S.

A RHAP-4 é a mais a continental, sendo formada apenas por províncias do norte da Argentina, situando-se entre as latitudes ~ 21° S e 29° S. A RHAP-5, é a única exclusivamente brasileira, entre ~ 20° S e 27° S, e localizam-se o estado de São Paulo (SP), o centro-leste do Paraná e uma porção do Mato Grosso do Sul (MS). A RHAP-6, situada entre ~ 20°S e 25° S, engloba o sul de MS e o centro-norte do Paraguai. As RHAP identificadas assemelham-se com as encontradas por Viana (2015) para o centro-sul do Brasil e para o continente sul-americano por Gubler et al. (2020) e Ferreira e Reboita (2022). Na sequência, serão discutidos aspectos da climatologia das seis RHAP encontradas para o SESA.

Figura 4 - Espacialização das RHAP sobre o SESA. AS RHAP estão diferenciadas por cores e texturas.



Fonte - Malha territorial - IBGE (2022).

Elaboração: os autores, 2022.

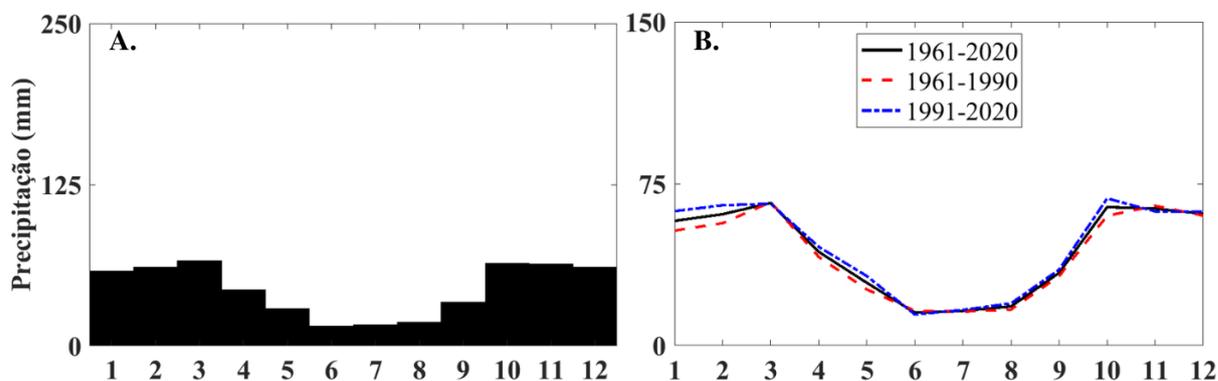
Climatologia da precipitação nas Regiões Homogêneas de Anomalia de Precipitação no SESA

Para a observação e análise da climatologia das seis RHAP, foram elaboradas séries temporais a partir da média dos quatro pontos centrais de cada RHAP. As séries temporais das regiões foram submetidas ao cálculo das médias mensais e da climatologia mensal para os dois períodos (1961-1990 e 1991-2020).

Na Figura 5 pode-se observar a climatologia da RHAP-1 ao longo dos 60 anos estudados. Nota-se que o ciclo de precipitação da RHAP-1 (Figura 5-A) é marcado por magnitudes inferiores a 100 mm. Os maiores (menores) volumes de chuva ocorrem nos meses de verão (inverno), corroborando com Ferreira e Reboita (2022), sendo que a maior (menor) média ocorre em março (junho) e atinge cerca de 66 (15) mm. A comparação das climatologias mensais para os dois períodos (1961-1990/1991-2020) indica que os maiores valores são observados no segundo período, porém não houve diferença significativa do padrão

médio mensal das chuvas (Figura 5-B). Sendo assim, as maiores oscilações são observadas nos meses entre outubro e março, com diferença máxima de ~ 8 mm no mês de janeiro.

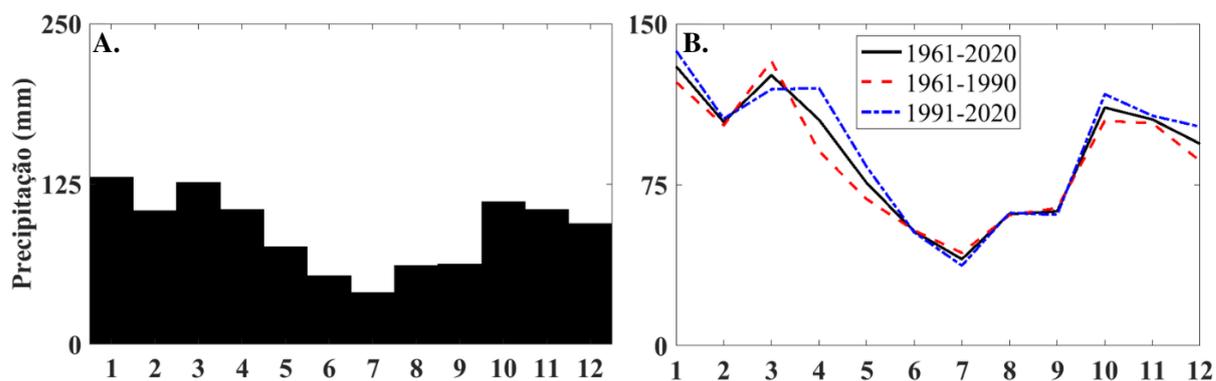
Figura 5 - Climatologia da RHAP-1. A) Médias mensais da precipitação (barra preta); B) Climatologia mensal para os dois períodos, linha preta representa todo o período, linha vermelha o período entre 1961-1990 e a linha azul o período entre 1991-2020.



Elaboração - os autores, 2022.

As médias mensais e a climatologia para os dois períodos da RHAP-2 podem ser observadas na Figura 6. A RHAP-2 (Figura 6-A) também apresenta um ciclo de chuvas em que as maiores (menores) magnitudes encontram-se no verão (inverno), sendo que a maior magnitude ocorre em janeiro (julho), com aproximadamente 130 (40) mm/mês. Destaca-se que, no que se refere a sazonalidade e a magnitude, resultados similares foram encontrados por Gluber et al. (2020). As normais climatológicas (Figura 6-B) indicam que existem oscilações nos padrões mensais médios na primavera, no verão e no outono, com predomínio de maiores valores entre 1991 e 2020. As maiores diferenças são observadas no mês de abril, de ~ 29 mm.

Figura 6 - Climatologia da RHAP-2. A) Médias mensais da precipitação (barra preta); B) Climatologia mensal para os dois períodos, linha preta representa todo o período, linha vermelha o período entre 1961-1990 e a linha azul o período entre 1991-2020.

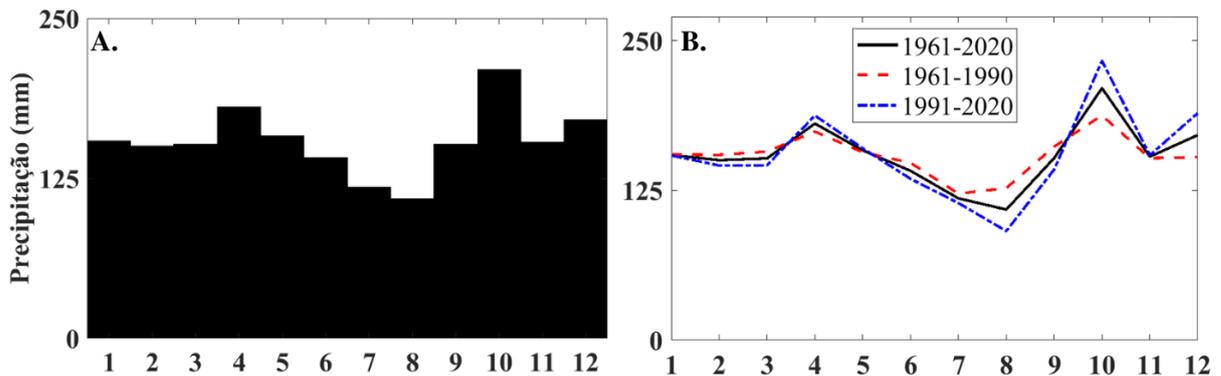


Elaboração - os autores, 2022.

A distribuição das chuvas na RHAP-3 apresenta um comportamento relativamente homogêneo ao longo do ano, isto é, não há presença de períodos secos e úmidos, embora as menores magnitudes ocorram no inverno (Figura 7-A). Sendo assim, os máximos ocorrem no período quente (e.g. outubro ~ 210 mm) e os mínimos no período frio (e.g. agosto ~ 109 mm). Para essa região, resultados semelhantes, no que tange a variabilidade sazonal, foram encontrados por Ferreira e Reboita (2022), e somado a semelhança nas

magnitudes das médias mensais, por Gluber et al. (2020) e por Viana (2015). A climatologia para os dois períodos (Figura 7-B) evidencia oscilações nos padrões médios de chuva, principalmente, no inverno e na primavera, sendo que são observados maiores valores para o inverno entre 1961-1990 e maiores valores na primavera e verão entre 1991-2020. A maior diferença entre as médias dos dois períodos ocorre em outubro de ~ 45 mm.

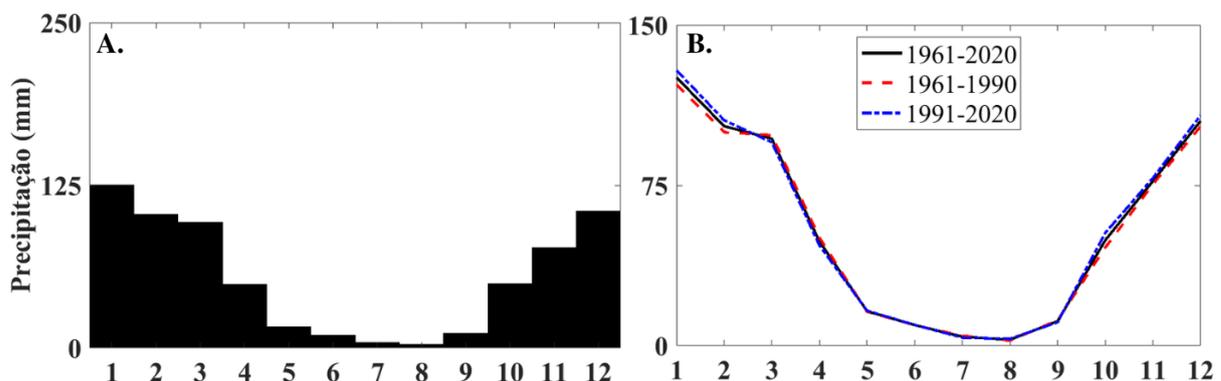
Figura 7 - Climatologia da RHAP-3. A) Médias mensais da precipitação (barra preta); B) Climatologia mensal para os dois períodos, linha preta representa todo o período, linha vermelha o período entre 1961-1990 e a linha azul o período entre 1991-2020.



Elaboração - os autores, 2022.

A RHAP-4 apresenta magnitudes de chuva mensais que não ultrapassam os 130 mm (Figura 8-A). É possível observar que essa região é marcada por verões úmidos e invernos secos. A maior (menor) média ocorre em janeiro (julho) de aproximadamente 125 mm (4 mm). As normais climatológicas não evidenciam oscilações significativas no padrão mensal médio de precipitação, porém as maiores oscilações ocorreram nos meses entre outubro e março, com diferença máxima de ~ 6 mm em janeiro e outubro (Figura 8-B).

Figura 8 - Climatologia da RHAP-4. A) Médias mensais da precipitação (barra preta); B) Climatologia mensal para os dois períodos, linha preta representa todo o período, linha vermelha o período entre 1961-1990 e a linha azul o período entre 1991-2020.

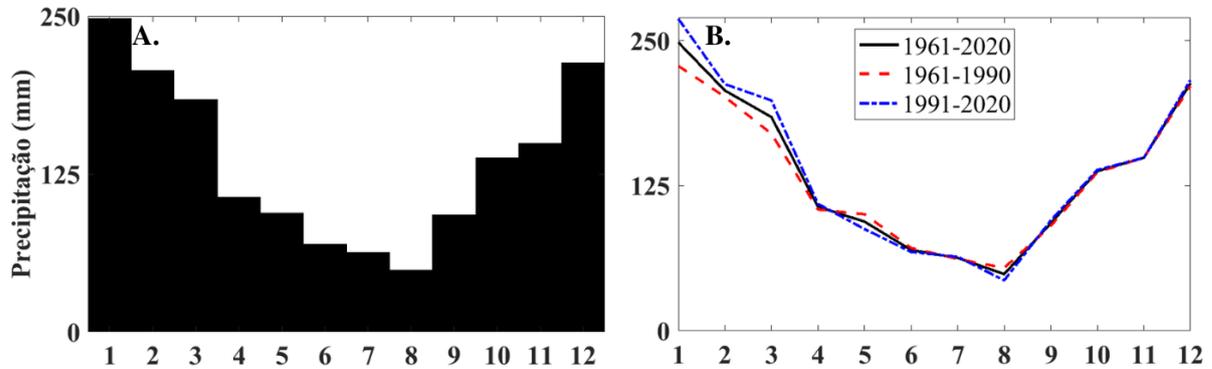


Elaboração - os autores, 2022.

A RHAP-5 apresenta as maiores magnitudes mensais de precipitação de todo o SESA (Figura 9-A), sendo que os meses de verão (inverno) apresentam as maiores (menores) magnitudes, atingindo 248 mm em janeiro e 48 mm em agosto. A comparação da climatologia para os dois períodos (Figura 9-B) evidencia

oscilações nos padrões médios de chuva, principalmente no verão e no outono, com maiores magnitudes entre 1991-2020. A maior diferença é de ~40 mm no mês de janeiro.

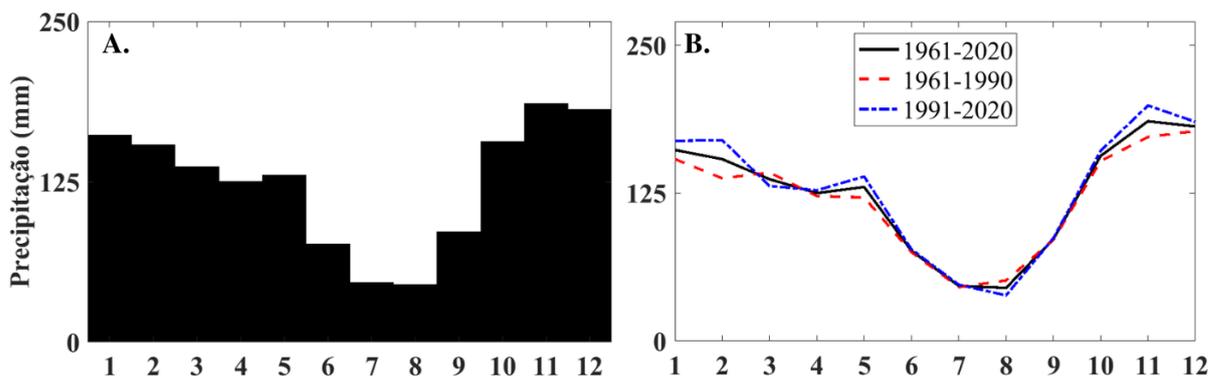
Figura 9 - Climatologia da RHAP-5. A) Médias mensais da precipitação (barra preta); B) Climatologia mensal para os dois períodos, linha preta representa todo o período, linha vermelha o período entre 1961-1990 e a linha azul o período entre 1991-2020.



Elaboração - os autores, 2022.

Na RHAP-6 observa-se um ciclo marcado por verões (invernos) úmidos (secos), com máximo em novembro (~ 185 mm) e mínimo em agosto (~ 44 mm) (Figura 10-A). Os resultados dessa região corroboram com a sazonalidade apontada por Ferreira e Reboita (2022) e, somado a semelhança na magnitude, com Gluber et al. (2020). As normais climatológicas (Figura 10-B) evidenciam oscilações nos padrões médios de chuva, principalmente, entre a primavera e o outono, com predomínio de maiores valores no segundo período (1991-2020). A maior diferença é de ~ 32 mm no mês de fevereiro.

Figura 10 - Climatologia da RHAP-6. A) Médias mensais da precipitação (barra preta); B) Climatologia mensal para os dois períodos, linha preta representa todo o período, linha vermelha o período entre 1961-1990 e a linha azul o período entre 1991-2020.



Elaboração - os autores, 2022.

As regiões 1 e 2, que se localizam entre as latitudes 30°-40°S, apresentam médias mensais de chuvas inferiores a 130 mm, com os mínimos no inverno, em que as baixas temperaturas, dadas pela circulação atmosférica regional-global, não favorecem o estabelecimento das chuvas. Ao se verificar a distribuição das médias mensais da RHAP-3, situada entre 24°-32°S, não se observa uma variabilidade temporal das chuvas com ocorrência de períodos secos e chuvosos, e sim uma distribuição homogênea ao longo do ano em torno de aproximadamente 150 mm. Contudo, a climatologia encontrada nessas regiões é resultado da atuação de sistemas atmosféricos como os sistemas frontais (PAMPUCH e AMBRIZZI, 2016) e os centros de baixas e altas pressões (REBOITA et al., 2010; JANTSCH e AQUINO, 2020).

Adicionalmente, a RHAP-3 também é fortemente influenciada pela atuação dos CCM, abordados por Moraes e Aquino (2018) e Moraes et al. (2020).

As regiões 4-5-6, entre as latitudes 20°-30°S, apresentam um ciclo de precipitação mensal característico do Sistema de Monções da América do Sul (SMAS), que é marcado por verões (invernos) chuvosos (secos) (GRIMM et al., 2020). Essa condição é resultado das convergências tropicais, em função do transporte de umidade das latitudes baixas para as médias, estabelecidos, por exemplo, pelos Jatos de Baixos Níveis (JUNQUAS et al., 2013) e pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SILVA; REBOITA; ESCOBAR, 2019). Outro fator importante de ser destacado é que as regiões 1, 2 e 4 podem apresentar um volume precipitado com menores magnitudes em função da continentalidade.

Contudo, as RHAP do SESA, com exceção da RHAP-3, apresentam predomínio de períodos chuvosos (secos) na estação quente (fria). Nesse âmbito, há evidências de que é na primavera, no verão e no outono austrais que podem se estabelecer as variabilidades mais significativa das chuvas, isto é, associado ao processo de aquecimento e resfriamento do sistema terrestre. Nas RHAP 1 e 2, isso ocorre com a configuração das maiores temperaturas, nas RHAP 4, 5 e 6 acontece com o estabelecimento das convergências tropicais no período chuvoso e na RHAP-3 nas estações transicionais, também associada, sobretudo, ao processo de aquecimento.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As seis RHAP sobre o SESA foram identificadas a partir da AAH, com o uso do banco de dados mensal da CRU (1961-2020). As RHAP 1 e 2 são as que se localizam nas latitudes entre 32°-40°S e englobam a Argentina central e o Uruguai. A RHAP 3 e 4 se situam no centro do SESA (24°-32° S) e englobam o RS, SC, o norte da Argentina e o sul do Paraguai. As RHAP 5 e 6 são as que estão entre as latitudes 20°-27°S e compreendem o Sudeste do Brasil e o Paraguai. É importante destacar que, a AAH possibilitou o agrupamento de elementos similares (dissimilares) entre si. Em outros termos, foi possível agrupar regiões climatologicamente homogêneas, sendo que as seis regiões representam de forma satisfatória a variação das chuvas no SESA.

A observação das médias mensais e das climatologias mensais para os dois períodos sugerem que: a) as RHAP 1 e 2 estão sob a influência da circulação regional que estabelece as variações sazonais da temperatura, favorecendo a configuração de períodos secos (úmidos) no inverno (verão); b) a RHAP-3 possui uma variabilidade sazonal sem predominância de períodos secos e chuvosos, como resultado da alta complexidade dos mecanismos atmosféricos, visto que são oriundos de latitudes tropicais e extratropicais; e c) as RHAP-4-5-6 apresentam aspectos climatológicos característicos do sistema monçônico, com estação seca (inverno) e úmida (verão) bem definidas. Além disso, as magnitudes das chuvas nas RHAP 1, 2 e 4 podem estar sob influência da continentalidade.

Ao comparar as normais climatológicas, para os períodos entre 1961-1990 e 1991-2020, de cada RHAP, observaram-se a predominância de maiores magnitudes da precipitação no segundo período, entre 1991-2020. Adicionalmente, as maiores diferenças foram registradas e observadas na primavera, no verão e no outono (estação quente). Sendo assim, há indícios de que essas diferenças possam estar associadas às mudanças nos padrões de chuvas destacadas pelo IPCC (2021), o qual afirma que há evidências de aumento das chuvas no SESA, sobretudo, na estação quente.

Contudo, compreender as diferentes RHAP no SESA e os padrões médios mensais da precipitação de cada grupo, pode servir de suporte para um aprofundamento nas questões relacionadas a variabilidade e as mudanças climáticas. Além do SESA ser indicado como referência para as mudanças climáticas pelo IPCC (2021), comporta mais de 200 milhões de habitantes, os quais são dependentes da distribuição das chuvas, pois tem a economia baseada na agropecuária e a produção de energia baseada na hidrelétrica. Ademais, a precipitação é a principal fonte de entrada de água nos sistemas ambientais, de maneira que sua variabilidade influencia na manutenção da vida e dos recursos naturais dos quais os seres humanos são dependentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — Brasil (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX).

REFERÊNCIAS

- ALIAGA, V. S.; FERRELLI, F.; PICCOLO, M. C. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1237-1247, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5079>.
- BARROS, V.; CLARKE, R.; DIAS, P. S. (Ed.). **Climate Change in the La Plata Basin**. 2006, 221p.
- BECKER, C. T.; BRAGA, C. C.; CEBALLOS, J. C. Regionalização da precipitação e temperatura no estado do Rio Grande do Sul a partir de análise de agrupamento. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7., 1992. São Paulo, SP. **Anais [...]** Rio de Janeiro: SBMET, v. 1, p. 225-232, 1992.
- BETTOLLI, M. L. *et al.* The CORDEX Flagship Pilot Study in southeastern South America: a comparative study of statistical and dynamical downscaling models in simulating daily extreme precipitation events. **Climate Dynamics**, v. 56, p. 1589-1608, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05549-z>.
- CAVALCANTI, I. F. A. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. **Atmospheric Research**, v. 118, p. 27-40, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.012>.
- CRU - Climatic Research Unit. **High-resolution gridded datasets (and derived products)**. Disponível em: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>. Acesso em: 20 ago. 2021.
- DURKEE, J. D.; MOTE, T. L.; SHEPHERD, J. M. The Contribution of Mesoscale Convective Complexes to Rainfall across Subtropical South America. **Journal of Climate**, v. 22, p. 4590-4605, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2858.1>.
- FERREIRA, G. W. S.; REBOITA, M. S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and forecast. **Atmosphere**, v. 13, p. 1-33, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>.
- GÓMEZ, V. M.; BARREIRO, M. Effect of future climate change on the coupling between the tropical oceans and precipitation over Southeastern South America. **Climatic Change**, p. 1-15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1888-6>.
- GONG, X.; RICHMAN, M. B. On the Application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the rockies. **Journal of Climate**, v. 8, p. 897-931, 1995.
- GONZALEZ, P. L. M. *et al.* Stratospheric ozone depletion: a key driver of recent precipitation trends in South Eastern South America, **Climate Dynamics**, v. 42, p. 1775-1792, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1777-x>.
- GRIMM, A. M. *et al.* South and North American monsoons: characteristics, life cycle, variability, modeling, and prediction. *In*: CHIH-PEI, C. *et al.* (Org.). **The Multiscale Global Monsoon System**. Singapore: World Scientific, 2020. p. 49-66. DOI: https://doi.org/10.1142/9789811216602_0005.
- GUBLER, S. *et al.* Assessment of ECMWF SEAS5 Seasonal Forecast Performance over South America. **Weather and Forecasting**, v. 35, p. 561-584, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0106.1>.
- HARRIS, I. *et al.* Version 4 of CRU TS Monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, p. 1-18, 2020. DOI: <https://doi.org/ggg4fw>.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas territoriais** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html>. Acesso em: 10 jul. de 2022.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. *In*: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I [Masson-Delmotte, V. *et al.* (eds.)]. Cambridge University Press. In Press, 2021.
- JANTSCH, M.; AQUINO, F. E. Ocorrência e distribuição espacial de ciclones extratropicais na Região Sul do Brasil em 2018. **Para onde?**, v. 13, n.1, p. 234-249, 2020. DOI: <https://doi.org/10.22456/1982-0003.102544>.

JUNQUAS, C. et al. Impact of projected SST changes on summer rainfall in southeastern South America. **Climate Dynamics**, v. 40, p. 1569-1589, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1695-y>.

LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados**. Rio Claro: UNESP, 2010.

MINGOTI, S. A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte, MG: Editora UFMG, 2005.

MORAES, F. D. S.; AQUINO, F. E. Desastres no Rio Grande do Sul associados a Complexos Convectivos de Mesoescala: estudo de caso do evento que ocorreu entre 22 e 23 de abril de 2011. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7. N. especial, p. 111-134, 2018. DOI: 10.19177/rgsa.v7e02018111-134.

MORAES, F. D. S. et al. Atmospheric characteristics favorable for the development of mesoscale convective complexes in southern Brazil. **Climate Research**, v. 8, p. 43-58, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01595>.

NAÇÕES UNIDAS. Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). **World Population Prospects 2022**, Online Edition. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 29 jul. 2022.

NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing Twentieth-Century Space–Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961–90 Mean Monthly Terrestrial Climatology. **Journal of Climatology**, v. 12, p. 829-856, 1999.

PAMPUCH, L. A.; AMBRIZZI, T. Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte II: Monitoramento Mensal em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. **Ciência e Natura**, v. 8, p. 105-10, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X19811>.

QGIS - Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. 2022. Disponível em: <https://qgis.org/en/site/>. Acesso em: 03 set. 2022.

REBOITA, M. S. et al. Regimes de precipitação pluviométrica na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.

SEAGER, R. et al. Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century, **Journal of Climatology**, v. 23, p. 5517-5539, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3578.1>.

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, n. 15, p. 335-377, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v25i0.64101>.

TEODORO, P. E. et al. Cluster analysis applied to the spatial and temporal variability of monthly rainfall in Mato Grosso do Sul State, Brazil. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 128, p. 197-209, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-015-0408-y>.

TERASSI, P. M. B.; GALVANI, E. Identification of Homogeneous Rainfall Regions in the Eastern Watersheds of the State of Paraná, Brazil. **Climate**, v. 5, p. 1-13, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli5030053>.

VIANA, D. R. **Sistema de reconhecimento de padrões estatísticos aplicado à previsão climática de temperatura e precipitação no centro-sul do Brasil**. 2015. 248 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

WMO n°100. **Guide to Climatological Practices**. Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, 2018.

ZHANG, H. et al. Detection, Attribution, and Projection of Regional Rainfall Changes on (Multi-) Decadal Time Scales: A Focus on Southeastern South America. **Journal of Climatology**, v. 29, p. 8515-8534, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0287.1>.

Recebido em: 05/10/2022

Aceito para publicação em: 14/03/2023