







ANÁLISE MULTIVARIADA DO SPI NO ESTADO DE SÃO PAULO

Multivariate analysis of SPI in the State of São Paulo

Análisis multivariante del SPI en el Estado de São Paulo

Letícia Punski de Almeida  

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental/ Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Universidade Estadual Paulista (UNESP)
leticia.punski@unesp.br

Luana Albertani Pampuch  

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental/Curso de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Departamento de Engenharia Ambiental/ Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Universidade Estadual Paulista (UNESP)
luana.pampuch@unesp.br

Anita Rodrigues de Moraes Drumond  

Departamento de Ciências Atmosféricas/ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), Universidade de São Paulo (USP)
anita.drumond@usp.br

Luiz Felipe Gozzo  

Departamento de Física e Meteorologia/ Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista (UNESP)
luiz.gozzo@unesp.br

Rogério Galante Negri  

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental/Curso de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Departamento de Engenharia Ambiental/ Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Universidade Estadual Paulista (UNESP)
rogerio.negri@unesp.br

Resumo: Eventos extremos climáticos secos e chuvosos podem ser responsáveis por desastres naturais com grande impacto à população e ao meio ambiente. Neste trabalho, foi avaliado os padrões espaciais dominantes do Índice de Precipitação Padronizado (Standardized Precipitation Index - SPI), calculado a partir dos dados mensais de precipitação pluvial (1981-2020) no Estado de São Paulo,

buscando regiões homogêneas deste índice, com apoio de análises estatísticas de Componentes Principais (ACP) e Agrupamentos (AA). Com base na ACP aplicada ao SPI-1 foram selecionadas as cinco primeiras componentes principais (CP) para rotação, que juntas explicaram 97,96% da variabilidade dos dados originais. Após a rotação dos eixos, a ACP indicou condições anômalas em todo o Estado, mais intensas no leste de SP em 42,05% (CP1) dos dados, e no oeste do Estado em 38,31% (CP2). Por sua vez, a AA apontou dois grupos homogêneos, um a leste e outro a oeste do Estado de São Paulo, com comportamentos espaciais concordantes aos dois primeiros modos da ACP rotacionada. Esse tipo de estudo é importante para a compreensão de como os eventos extremos de precipitação ocorrem no Estado de São Paulo e se distribuem espacialmente e temporalmente, ajudando no seu monitoramento e previsão.

Palavras-chave: Eventos extremos hidrológicos. SPI. Análise multivariada. Estado de São Paulo.

Abstract: Extreme dry and wet climate events can be responsible for natural disasters with great impact on the population and the environment. In this work, the behavior of the Standardized Precipitation Index (SPI), calculated from monthly precipitation data, between 1981-2020, in the state of São Paulo, was evaluated to determine homogeneous regions for this index, using statistical methods Principal Components (PCA) and Clustering. With the PCA applied to the SPI-1, the first five principal components (PC) were selected for rotation, which together explained 97,96% of the variability of the original data. After the rotation of the axes, the PCA indicated anomalous conditions throughout the state, more intense to the east in 42,05% (PC1) of the data, and to the west in 38,31% (PC2). The Clustering pointed out two homogeneous groups with spatial behaviors in agreement with the first two modes of the rotated PCA. This type of study can be important for understanding how extreme precipitation events occur in the State of São Paulo and are distributed spatially and temporally, helping to monitor and predict them.

Keywords: Extreme hydrological events. SPI. Multivariate analysis. State of São Paulo.

Resumen: Los eventos climáticos extremos de sequía y lluvia pueden ser responsables por desastres naturales con gran impacto en la población y el medio ambiente. En este trabajo, se evaluó el comportamiento del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI), calculado a partir de datos mensuales de precipitación, entre 1981-2020, en el Estado de São Paulo, buscando regiones homogêneas de este índice, utilizando las análisis estadísticas de Componentes Principales (PCA) y de Agrupamiento. Con el PCA aplicado al SPI-1, se seleccionaron las primeras cinco componentes principales (CP) para la rotación, que en conjunto explicaron el 97,96 % de la variabilidad de los datos originales. Con los datos rotacionados, la PCA indicó condiciones anômalas en todo el Estado, más intensas al este en el 42,05% (CP1) de los datos, y al oeste en el 38,31% (CP2). El Análisis de Agrupamiento señaló dos grupos homogêneos con comportamientos espaciales de acuerdo con los dos primeros modos del PCA rotado. Este tipo de estudio puede ser importante para comprender cómo ocurren los eventos de precipitación extrema en el Estado de São Paulo y cómo se distribuyen espacial y temporalmente, ayudando a monitorearlos y predecirlos.

Palabras clave: Eventos hidrológicos extremos. SPI. Análisis multivariante. Estado de São Paulo.

Submetido em: 09/09/2022

Aceito para publicação em: 10/02/2023

Publicado em: 24/02/2023

1. INTRODUÇÃO

Eventos extremos meteorológicos ou climáticos podem ser definidos como a ocorrência de uma variável climática acima ou abaixo de um limiar na extremidade superior ou inferior da curva de distribuição dos dados (IPCC, 2021). Estes eventos compreendem uma parcela da variabilidade climática. Para o caso da precipitação pluvial, a ocorrência de eventos extremos em regiões vulneráveis pode ser responsável pela ocorrência de desastres naturais, trazendo prejuízos e grande impacto à população e ao meio ambiente (IPCC, 2021). Alguns exemplos de impactos são as secas prolongadas, enchentes e deslizamentos de encostas. Em cenários de mudanças climáticas, podem ser observadas mudanças na intensidade, frequência e duração destes eventos, sendo possível o registro de eventos extremos nunca antes observados (IPCC, 2021).

Secas são eventos que ocorrem a partir da falta de precipitação pluvial, e são classificadas conforme os impactos associados em quatro tipos (HEIM, 2002). As secas podem ser meteorológicas, quando as condições atmosféricas causam deficiência/redução de precipitação pluvial, que podem se desenvolver e se extinguir rapidamente (ou mesmo durar desde meses até anos). As secas agrícolas se configuram quando a escassez de água no solo é suficiente para impactar as necessidades agrícolas da região (isso pode ocorrer a partir de algumas semanas até de alguns meses após o estabelecimento das condições de secas meteorológicas). Secas hidrológicas são percebidas em escalas de tempo maiores (cerca de 12 meses após a configuração da seca meteorológica), e são caracterizadas por baixos níveis de umidade do solo, diminuição da vazão dos rios e das águas subterrâneas. Ainda, existem as secas socioeconômicas, que são associadas à oferta e demanda de bens econômicos e com uma relação complexa entre os demais tipos de seca (HEIM, 2002; YIHDEGO et al., 2019; DE FREITAS et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2022).

Diversos índices são utilizados na identificação de eventos extremos de precipitação, podendo calcular também sua duração e severidade. Índices derivados de dados mensais podem ser calculados através de ajustes baseados em distribuições de probabilidade, como é o caso do PDSI (*Palmer Drought Severity Index*), SPI (*Standardized Precipitation Index*) e SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*). O SPI (MCKEE et al., 1993) é o índice recomendado pela Organização Meteorológica Mundial para a análise de eventos climáticos

extremos (WMO, 2012) e se destaca por ser de fácil cálculo, utilizando apenas dados de precipitação. O SPI é amplamente utilizado na quantificação e análise de condições anômalas associadas às variações da precipitação acumulada em diferentes escalas temporais (como 1, 3, 6, 12, 24 e 48 meses). O PDSI é calculado com dados de temperatura, precipitação e estimativa de umidade no solo. Este último parâmetro dificulta o uso do índice já que ele é determinado empiricamente e pouco testado em diversas regiões do globo (VICENTE-SERRANO et al., 2012). Já o SPEI utiliza dados de precipitação e temperatura do ar em seus cálculos, o que é importante no contexto das mudanças climáticas (VICENTE-SERRANO et al., 2010; VICENTE-SERRANO et al., 2012). O uso de índices padronizados, como é o caso do SPI, permite comparar diferentes condições de extremos através da magnitude de situações anômalas, sejam estas observadas no espaço ou no tempo (HAYES et al., 1999).

Além destes, outros índices que analisam limiares, como percentis, quartis ou decis (p. ex. Morello et al., 2020), o Índice de Porcentagem da Normal (Gois, 2005) e o Índice de Umidade da Colheita (Gonçalves et al., 2021), podem ser utilizados, bem como índices que analisam também a vegetação (como o NVDI - *Normalized Difference Vegetation Index*), umidade do solo (como o CMI - *Crop Moisture Index*), recursos hídricos (como o SWSI - *Sufarce Water Suply Index*), entre outros (GONÇALVES et al., 2021; DE FREITAS et al., 2022). Em De Freitas et al. (2023) é apresentado um resumo desses índices, mostrando sua descrição, vantagens e desvantagens e alguns estudos com suas aplicações.

O SPI é utilizado para monitoramento climático operacional em diversos órgãos como o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INEP), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Grupo de Estudos Climáticos (GrEC) da Universidade de São Paulo (USP). Além disso, é um índice extensamente usado no estudo de períodos secos em diversas regiões do Brasil, como a Amazônia (Joetzjer et al., 2013; Chaudhari et al., 2019), o Pantanal (Marengo et al., 2021), o Nordeste (Nascimento et al., 2017; Brito et al., 2018) e o Sudeste e Sul do país (Sobral et al., 2018; Terassi et al., 2018; de Paiva Lima et al., 2022). Especificamente para o estado de São Paulo, o SPI e o SPEI (uma adaptação do SPI que considera no cálculo do balanço hídrico a temperatura do ar e o processo de evapotranspiração) vêm sendo utilizados na caracterização de eventos extremos de seca (Blain e Brunini, 2005; Coelho et al., 2016; Oliveira et al., 2022), e no estudo das tendências de ocorrência (Blain, 2012; Pereira et al. 2018; Gozzo et al., 2019a) e das

forçantes climáticas de grande escala responsáveis por estes eventos (Gozzo et al., 2021; Gozzo et al. 2022). Siqueira e Nery (2017), descrevendo a climatologia do índice SPI sobre São Paulo entre 1970 e 2010, obtiveram diferentes valores médios do SPI sobre o Estado: ao sul e leste, a média do índice é superior a 1,0, enquanto no centro-norte, mais seco, a média fica abaixo de 0,9, chegando a 0 no nordeste. Resultados de Gozzo et al. (2019 a, b), reforçaram esta diferença de comportamento regional, mostrando que as características de períodos de seca severa identificados pelo SPEI em São Paulo durante o século XX apresentaram pequenas, porém importantes, diferenças entre o leste e o centro-oeste do estado.

Técnicas estatísticas multivariadas podem ser utilizadas em climatologia para análise de padrões espaciais e determinação de regiões homogêneas de diversos parâmetros, como é o caso da Análise de Agrupamento e Análise de Componentes Principais. Para o sudeste do Brasil e, especificamente, para o Estado de São Paulo, existem alguns estudos que utilizam técnicas estatísticas multivariadas para analisar a homogeneidade espacial da precipitação (e.g., PAMPUCH et al., 2016; MIRANDA et al., 2022), porém, tais estudos não analisaram índices de extremos climáticos de precipitação pluvial. Este tipo de análise já foi realizado para outras regiões no Brasil, por exemplo, no Maranhão (NASCIMENTO et al., 2017), na Amazônia Oriental (SANTOS et al., 2017) e para outras regiões do mundo, como no Paquistão (OLIVEIRA-JUNIOR et al., 2022).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do SPI no Estado de São Paulo, a fim de identificar regiões homogêneas de variabilidade climática de precipitação pluvial, com o uso de técnicas estatísticas multivariadas. Este tipo de análise é importante para compreender o comportamento de períodos secos e chuvosos na região, identificando como eles se distribuem espacialmente e como ocorreram ao longo dos anos.

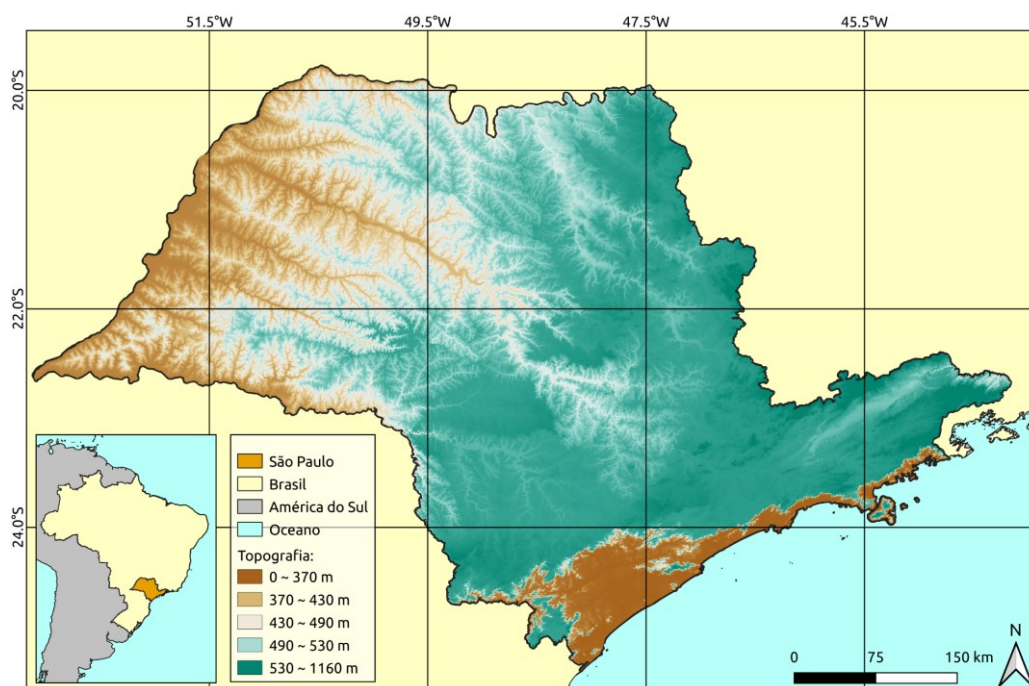
2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A área de estudo compreende o Estado de São Paulo (Figura 1), localizado entre 19°S-26°S e 54°W-44°W. Cabe destacar que esta região foi considerada em todas as análises e discussões da presente investigação. Com área territorial de aproximadamente 248 mil km²,

população estimada em 2021 de aproximadamente 46,6 milhões de pessoas e apresentando o segundo maior Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) do país, o Estado possui o maior Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil, concentrando 32% do PIB nacional (IBGE, 2021).

Figura 1 - Localização e topografia da região de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

São Paulo ocupou em 2020 a 21ª posição no ranking das maiores economias do mundo, sendo responsável por 20% da produção agrícola do país, onde se destaca como o maior produtor mundial de suco de laranja, açúcar e etanol. Segundo dados oficiais, o desempenho da economia paulista foi três vezes maior que a média nacional (GOVERNO DE SÃO PAULO, 2020).

O Estado de São Paulo contém climas tropical e temperado úmido, apresentando regiões sem estação seca definida, como observado ao sul do Estado, e regiões com inverno seco, como a oeste e norte de São Paulo (MARTINELLI, 2010).

2.2. Dados de Precipitação Pluvial e Cálculo do SPI-1

Foram utilizados dados mensais de precipitação pluvial do conjunto de dados do *Climate Research Unit* (CRU), versão ts4.05 (HARRIS et al., 2020), para o período de 1981-2020,

com resolução horizontal de 0,5° de latitude x 0,5° de longitude. Estes dados são uma análise baseada na interpolação de observações de estações meteorológicas sobre o globo terrestre e compreendem uma base de dados sem falhas sobre a região (HARRIS et al., 2020), tendo sido utilizado em diversos outros trabalhos na Região Sudeste do Brasil (e.g., GOZZO et al. 2019 a, b; GOZZO et al., 2022).

A partir dos dados de precipitação pluvial, foi realizado o cálculo do SPI. Este índice, desenvolvido por Mckee et al. (1993), é calculado apenas com a precipitação mensal, que é transformada em uma função distribuição de probabilidade e então padronizada. Valores positivos de SPI indicam precipitação maior do que a mediana (eventos chuvosos) e valores negativos de SPI indicam precipitação menor do que a mediana (eventos secos). Diferentes escalas temporais (de 1 a 48 meses) podem ser utilizadas para avaliar o déficit de precipitação, refletindo o impacto da seca na disponibilidade de diferentes recursos hídricos. Escalas de tempo mais curtas (1 a 6 meses) são interessantes para análises de secas meteorológicas e agrícolas. Já para as secas hidrológicas é necessária a análise em escalas maiores (6 a 24 meses ou mais) (WMO, 2012).

Para os propósitos deste estudo, este índice foi calculado para a escala temporal de acumulação por um mês (SPI-1), uma vez que o objetivo foi avaliar os períodos secos e chuvosos associados às secas meteorológicas. Na Tabela 1 são apresentados valores de desvio do índice SPI em relação à mediana dos dados e respectivas classificações das condições climáticas. Ainda, são exibidas as porcentagens dos dados distribuídos sobre as diferentes classes estabelecidas por Zhang et al. (2009).

Tabela 1- Limiares para a classificação das condições climáticas úmidas e secas com o SPI

SPI	CLASSIFICAÇÃO	PORCENTAGEM DE DADOS NA CATEGORIA (ZHANG ET AL., 2009)
$SPI \geq 2,0$	Úmido Extremo	2,3%
$1,5 \leq SPI < 2,0$	Úmido Severo	4,4%
$1,0 \leq SPI < 1,5$	Úmido Moderado	9,2%
$-1,0 < SPI < 1,0$	Normal	68,2%
$-1,5 < SPI \leq -1,0$	Seco Moderado	9,2%
$-2,0 < SPI \leq -1,5$	Seco Severo	4,4%
$SPI \leq -2,0$	Seco Extremo	2,3%

Fonte: Limiares utilizados pelo INPE (<http://clima1.cptec.inpe.br/spi>).

O cálculo do SPI foi realizado com o pacote SPEI, disponível para a linguagem R (<https://cran.r-project.org/web/packages/SPEI/SPEI.pdf>). Um maior detalhamento de como o SPI é calculado pode ser encontrado em McKee et al. (1993).

2.3. Análises de Componentes Principais e Fatorial

Para a análise do padrão espacial e temporal do SPI-1 no Estado de São Paulo, foi empregada a Análise de Componentes Principais (ACP) (WILKS, 2006). A ACP é uma técnica multivariada amplamente utilizada em Climatologia, que define novas variáveis, denominadas por Componentes Principais (CPs), através de uma combinação linear envolvendo um conjunto de variáveis originais. Ainda, as CPs obtidas são ordenadas de forma decrescente em relação à variabilidade explicada dos dados originais. É possível que uma parcela menor das CPs seja capaz de expressar a maior parte da variabilidade dos dados, permitindo então uma redução na quantidade de variáveis a ser analisada diante de uma perda mínima de informação dos dados originais (JOLLIFFE, 2002; WILKS, 2006).

De modo resumido, o método ACP consiste em calcular a matriz de correlação a partir do conjunto de dados após a remoção da tendência central, seguido pelo cômputo dos autovalores e autovetores associados. Os autovetores representam as variáveis que surgem da combinação linear envolvendo as variáveis originais. Ainda, os autovetores de maior importância (*i.e.*, com maior variância explicada dos dados originais) são ordenados segundo a amplitude dos autovalores associados: a primeira componente principal (CP1) explica a maior variância dos dados, seguida pela segunda componente principal (CP2), e assim sucessivamente (WILKS, 2006; HANNACHI et al., 2007).

Posteriormente, foi realizada a Análise Fatorial, que consiste em reter as CPs, que explicam a maior parte da variabilidade dos dados, e calcular os fatores (*i.e.*, correlações entre os dados originais e as CPs encontradas) (VICINI; SOUZA, 2005; WILKS, 2006; HANNACHI et al., 2007). Com isso, foi realizada a rotação nos eixos a fim de melhorar a representação dos fatores em relação às variáveis originais, favorecendo, por sua vez, a interpretação dos resultados. A rotação *varimax* foi empregada para este propósito, garantindo assim a minimização da quantidade de variáveis que concentram altas variabilidades (VICINI; SOUZA, 2005; WILKS, 2006; HANNACHI et al., 2007).

Para selecionar o número de fatores a serem retidos para a rotação, foram utilizados dois critérios: (i) representação gráfica, que exibe o percentual de variação explicada por cada CP e os autovalores associados em ordem decrescente nas abscissas. Quando a porcentagem diminui assintoticamente e a curva acompanha paralelamente o eixo das abscissas, é identificado um número adequado de componentes a ser utilizado (CATTEL, 1966); e (ii) considerando as componentes cujos valores próprios sejam maiores do que 1 e a variância acumulada maior do que 70% (KAISER, 1960).

Para avaliar os erros de amostragem das CPs foi adotada a regra prática proposta por North et al. (1982), que consiste no cálculo de $\delta\lambda_i$, descrito na equação (1).

$$(1) \quad \delta\lambda_i = \lambda_i \cdot \sqrt{\frac{2}{N}}$$

sendo λ_i o i -ésimo autovalor e N o número de graus de liberdade, aqui considerado igual a 40 em referência ao número de anos que compreende a análise. Segundo este critério, os modos serão independentes quando os erros amostrais de um autovalor forem distantes da diferença entre os valores próprios dos autovalores vizinhos. Em termos práticos, ao definir a barra de erros $\lambda_i \pm \delta\lambda_i$ da i -ésima CP, os intervalos dos autovalores vizinhos (*i.e.*, λ_{i-1} e λ_{i+1}) não devem se interceptar.

Um maior detalhamento dos métodos ACP e Análise Fatorial, bem como sua interpretação pode ser encontrado em Wilks (2006), Bjornsson e Venegas (1997), Jolliffe (2002), Vicini e Souza (2005) e Hannachi et al. (2007). O software Octave (EATON et al., 2019) foi utilizado nesta análise.

Com o intuito de exibir padrões espaciais a partir dos fatores rotacionados, foi empregada uma técnica de Análise de Agrupamentos, conforme discutido a seguir.

2.4. Análise de Agrupamento

A fim de investigar a distribuição espacial dos eventos extremos de precipitação pluvial derivados do índice SPI-1, determinando regiões homogêneas dos padrões espaciais do SPI-1 no Estado de São Paulo, foram utilizadas técnicas de Análise de Agrupamento. Este tipo de técnica proporciona uma partição sobre um conjunto de dados, segundo um determinado número de subconjuntos/agrupamentos, de modo que cada agrupamento é composto por

elementos que compartilham determinado nível de similaridade segundo uma medida adotada (WILKS, 2006). Neste estudo, os indivíduos são os 116 pontos de grade sobre o Estado de São Paulo. Os métodos de agrupamento podem ser hierárquicos ou não hierárquicos. Nos métodos hierárquicos é estabelecida uma hierarquia relacional entre elementos e agrupamentos, convenientemente representada por um dendrograma. Já nos métodos não-hierárquicos o objetivo é maximizar a homogeneidade intragrupo, sem considerar a hierarquia entre grupos (GONG; RICHMAN, 1995; VICINI; SOUZA, 2005; WILKS, 2006).

Como o objetivo da análise de agrupamento é reunir objetos semelhantes, é necessária uma medida para avaliar sua semelhança/diferença. A distância euclidiana é adotada como medida de dissimilaridade (diferença) e o método de agrupamento é então aplicado. Dentre as diferentes alternativas existentes na literatura para Análise de Agrupamento, são destacados o método não-hierárquico K-Médias (LLOYD, 1982) e os métodos Hierárquicos de Ward (WARD, 1963), amplamente utilizados em Climatologia. O método de Ward minimiza o quadrado da distância euclidiana às médias dos grupos, e um grupo será reunido a um outro se essa reunião proporcionar o menor aumento da variância intragrupo (VICINI; SOUZA, 2005). Em contraste, o método K-Médias compreende um processo iterativo de particionamento do conjunto de dados em K agrupamentos, de modo que as respectivas variabilidades internas sejam minimizadas ao mesmo tempo em que a separabilidade entre agrupamentos é maximizada (NEGRI, 2021). Mais uma vez, cabe destacar que a noção de variabilidade que rege este processo é usualmente expressa através da distância euclidiana entre os elementos e os respectivos medóides, que representam os agrupamentos.

Para verificar o grau de ajuste de agrupamento associado a métodos hierárquicos pode ser empregado o Coeficiente de Correlação Cofenético (CCC). Ele é calculado através do coeficiente de correlação linear de Pearson entre a matriz com as distâncias euclidianas em cada estágio do agrupamento e a matriz (SOKAL E ROHLF, 1962; DE OLIVEIRA-JÚNIOR et al., 2022). O CCC foi utilizado para verificar se o método de Ward é eficaz para a Análise de Agrupamento na área de estudo (busca-se valores elevados de CCC e significativos com $\alpha=5\%$), assim como em De Oliveira-Júnior et al. (2022).

Uma parte fundamental nos procedimentos de Análise de Agrupamento é a escolha do número de grupos. Wilks (2006) destaca que esta decisão pode ser subjetiva, entretanto

pode-se utilizar alguns métodos para este fim. Neste trabalho foram consideradas duas formas: empírica e baseada em medida estatística de ajuste.

Quando empregado o método Hierárquico de Ward, é utilizado um processo empírico com a inspeção do dendrograma e de um gráfico que exibe a distância entre os medóides dos grupos em cada estágio de agrupamento. A região que apresenta a maior diferença entre os agrupamentos implica em uma escolha adequada para a quantidade de agrupamentos ou mesmo para os agrupamentos formados neste estágio (VICINI; SOUZA, 2005; WILKS, 2006). No caso do método K-Médias, o número de grupos deve ser estabelecido de antemão. Para este propósito, é possível empregar o coeficiente Silhouette, descrito na equação (2).

$$(2) \quad s_i(k) = 1 - (d_{ik}/\gamma_{i-k})$$

onde d_{ik} é a distância intra-agrupamento entre o k -ésimo medóide e o i -ésimo elemento (*i.e.*, informação associada ao ponto de grade i , quando representado no domínio espacial) no conjunto de dados; γ_{i-k} é a menor distância entre o i -ésimo elemento e todos os outros medóides diferentes de k . O valor $s_i(k)$ está no intervalo $[-1,1]$, de modo que valores mais próximos de 1 são soluções ideais, já que neste caso a distância intracluster é muito menor do que a distância intercluster (BERNARD et al., 2013).

Um maior detalhamento dos métodos de Análise de Agrupamento, bem como sua interpretação, pode ser encontrado em Wilks (2006), Vicini e Souza (2005) e Negri (2021). O software Octave foi utilizado nestes cálculos. Cabe destacar que as técnicas discutidas foram aplicadas considerando como conjunto de dados todos os 116 pontos de grade localizados no Estado de São Paulo.

3. RESULTADOS

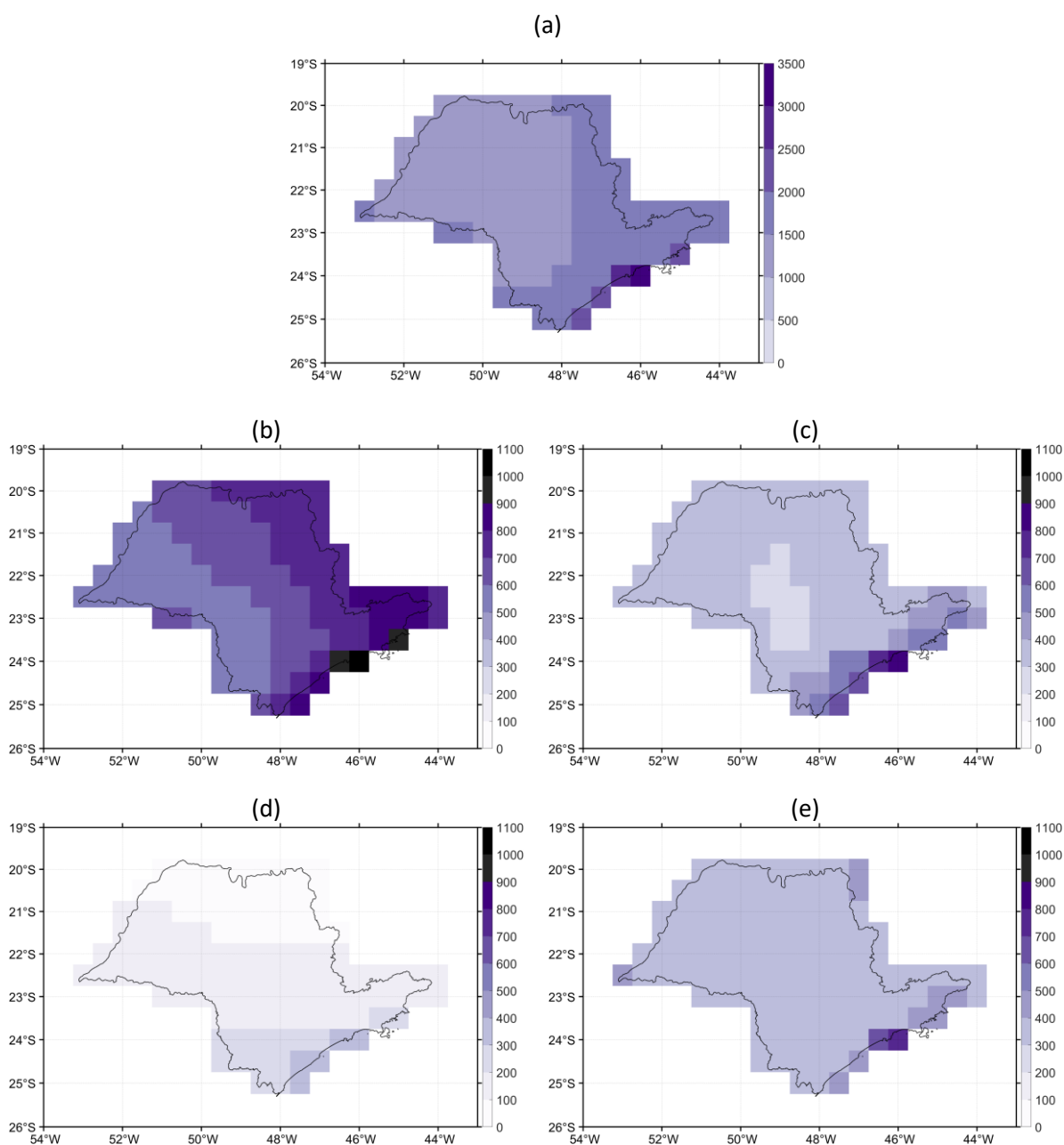
3.1. Climatologia da precipitação pluvial no Estado de São Paulo

A Figura 2 apresenta as climatologias anual e sazonais para o período de estudo (1981-2020). No período anual (Figura 2a) as maiores precipitações acumuladas ocorrem no litoral, com totais próximos de 3500 mm, e as menores na porção oeste, com acumulados anuais médios de até 1500 mm.

O Estado apresenta verões chuvosos, com precipitação pluvial variando entre 500 e 1100 mm, com os maiores valores nas regiões sul e leste (Figura 2b). O inverno seco possui

variação da precipitação entre 0 e 400 mm, e os maiores valores são observados na região sul (Figura 2d). As estações de transição do outono e da primavera (Figuras 2c e 2e) apresentam características semelhantes, com os valores de precipitação e distribuição espacial próximos, variando, respectivamente, entre 200 e 900 mm, e entre 300 e 800 mm.

Figura 2 - Climatologia de precipitação pluvial para o Estado de São Paulo no período de 1981-2020 (mm) (a) anual; (b) verão; (c) outono; (d) inverno; (e) primavera.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A distribuição das chuvas sobre o Estado de São Paulo decorre da natureza tropical e

extratropical de seu clima. No centro-oeste do Estado, o clima é determinado pelo Sistema de Monção da América do Sul (REBOITA et al., 2022), com verão chuvoso e inverno seco bem definidos. No leste, a interação entre a topografia da Serra do Mar e a persistência de ventos do oceano, especialmente associados à passagem de anticiclones pós-frontais, causa grandes volumes de chuva entre a primavera e o outono, e mantém esse padrão mesmo durante o inverno. As características apresentadas aqui concordam com resultados anteriores, como os de Nery et al. (2004) e De Godoy et al. (2021).

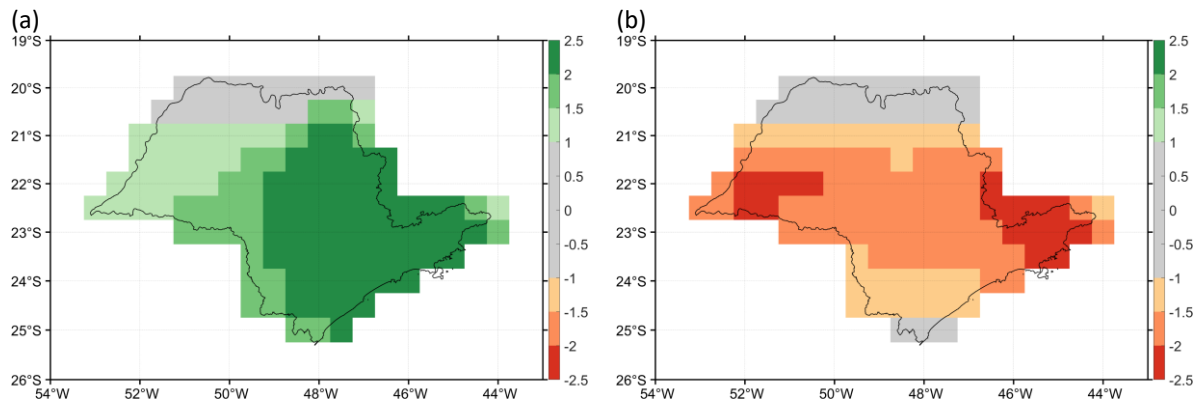
Apesar do Estado de São Paulo apresentar estações seca (inverno) e chuvosa (verão) bem definidas, através do SPI é possível identificar condições extremas independente do regime climático de um dado local. Este índice é padronizado, permitindo analisar como as condições extremas se propagam no tempo e espaço, mesmo apesar de eventuais características climatológicas temporais e espaciais distintas. Por exemplo, uma condição de seca extrema ocorrendo no verão e outra no inverno não apresentarão o mesmo valor absoluto de acumulado de precipitação, mas devido à padronização do SPI, ambas resultarão em valores do índice inferiores a -2.

Dois exemplos de condições climáticas extremas a partir do SPI-1 são mostrados na Figura 3. O mês de janeiro de 2010 apresentou condições úmidas extremas para o centro-leste do Estado, enquanto na região centro-oeste foram observadas condições úmidas severas e moderadas, com exceção do extremo norte do Estado, que exibiu condições de normalidade (Figura 3a). A média anual de precipitação pluvial no Estado de São Paulo é de 1543,4 mm (considerando todo o período de análise deste estudo) e as chuvas de janeiro de 2010 representaram 25,5% desse valor (393,4 mm). Este evento extremo chuvoso no Estado de São Paulo já foi estudado em Valverde et al. (2018) e Oliveira (2021).

O mês de outubro de 2014 apresentou condições secas extremas para o extremo leste e o extremo oeste do Estado, enquanto a porção central apresentou condições de seca moderada e seca severa (Figura 3b). O extremo sul e norte do Estado mostrou condições de normalidade quando considerado os limiares de SPI-1. Para o mês de outubro, a média histórica é de 134,93 mm de precipitação pluvial no Estado (considerando todo o período de análise deste estudo), e outubro de 2014 registrou apenas 67,4 mm (49,68% do esperado para o mês de outubro). A seca registrada entre 2014 e 2015 no Sudeste do Brasil foi estudada em diversos trabalhos (COELHO et al., 2016a,b; MARENGO et al., 2015; OTTO et al., 2015; NOBRE

et al., 2016) devido ao seu grande impacto no abastecimento de reservatórios para consumo e para geração de energia, e por ter sido a pior crise hídrica registrada na região, considerando o período de dados até 2015.

Figura 3 - SPI-1 para o Estado de São Paulo, com período de referência de 1981-2010 para (a) janeiro de 2010 e (b) outubro de 2014.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

3.2. Padrões espaciais dominantes do SPI-1

Inicialmente, os padrões espaciais do SPI-1 e seus coeficientes de expansão (séries temporais) foram determinados a partir do método de ACP. Na Tabela 2 são apresentadas as medidas descritivas para os primeiros dez autovalores da aplicação da ACP para o SPI-1. Os cinco primeiros autovalores atendem às condições impostas pelo critério de Kaiser (1960), sendo, portanto, considerados no processo de rotação para a Análise Fatorial. Além disso, segundo o critério de North et al. (1982), a partir do oitavo modo não ocorre a independência (já que $\delta\lambda_8$ é maior que a diferença entre o valor do sétimo e oitavo autovalor e os intervalos de erros se interceptam).

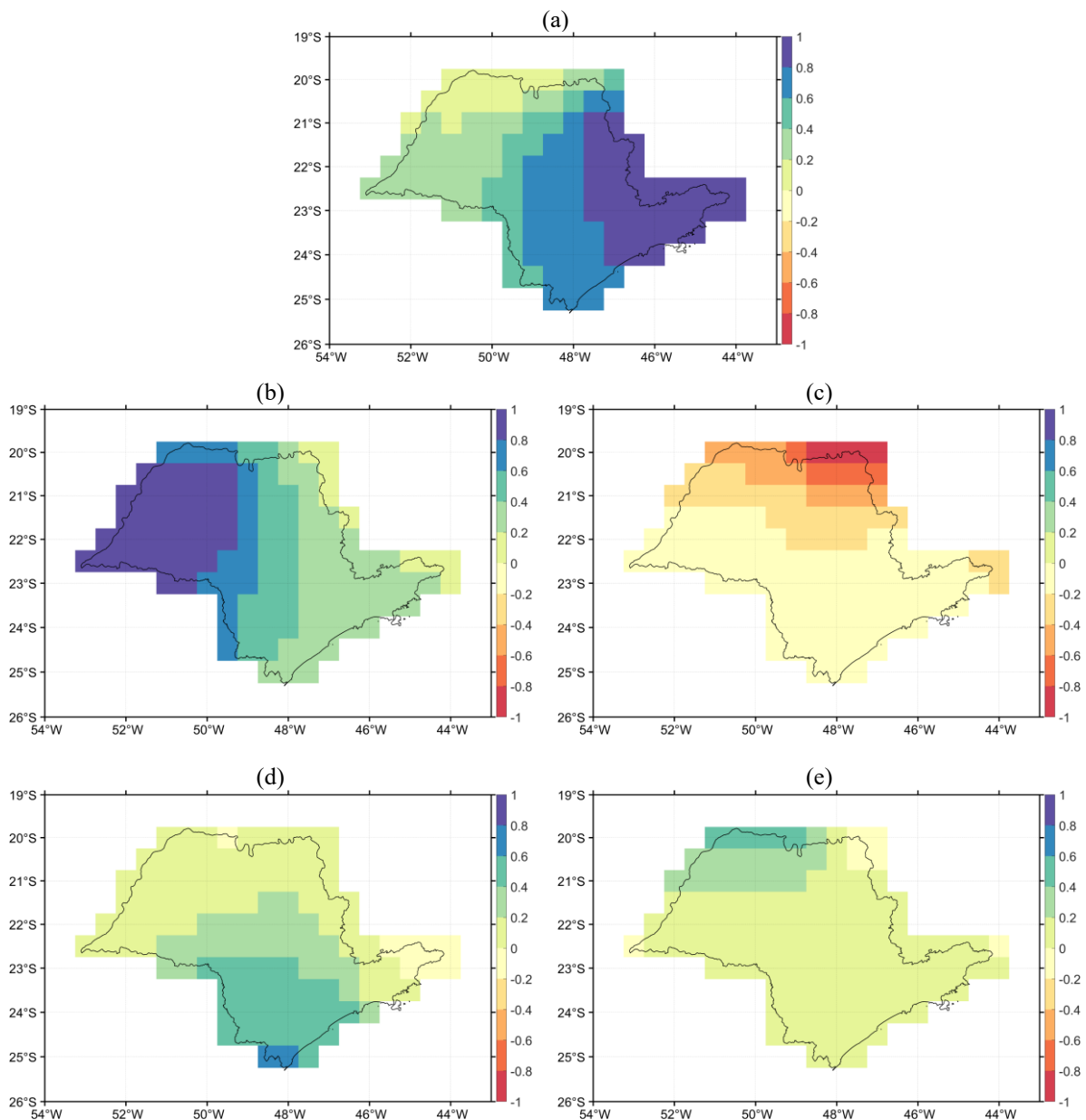
Tabela 2 - Dez primeiros autovalores obtidos da aplicação de ACP sobre o SPI-1, e respectivas medidas descritivas.

AUTOVALOR	VALOR PRÓPRIO	VARIÂNCIA EXPLICADA (%)	VARIÂNCIA ACUMULADA (%)	$\delta\lambda_i$	$[\lambda_i - \delta\lambda_i; \lambda_i + \delta\lambda_i]$
1	86,24	74,35	74,35	19,28	[66,96; 105,53]
2	16,79	14,48	88,82	3,76	[13,04; 20,55]
3	6,95	5,99	94,82	1,55	[5,4; 8,51]
4	2,41	2,07	96,89	0,54	[1,87; 2,94]
5	1,25	1,07	97,96	0,28	[0,97; 1,52]
6	0,72	0,62	98,58	0,16	[0,56; 0,88]
7	0,35	0,30	98,88	0,08	[0,27; 0,43]
8	0,30	0,25	99,14	0,07	[0,23; 0,36]
9	0,23	0,20	99,34	0,05	[0,18; 0,28]
10	0,17	0,15	99,49	0,04	[0,13; 0,21]

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Após aplicar a rotação dos cinco primeiros autovalores, a CP1 rotacionada, representando 42,05% da variabilidade dos dados, indica que, apesar de prevalecer as condições anômalas sobre o Estado, os valores do SPI-1 são mais intensos a leste (Figura 4a). O contrário é observado sobre os dados da CP2 rotacionada (representando 38,31% da variância), a qual apresenta maior intensidade do SPI-1 na região oeste (Figura 4b). A CP3 rotacionada, representando 8,54% da variabilidade dos dados, aponta valores mais intensos nas regiões norte e leste (Figura 4c). A CP4 rotacionada (7,70%) mostra o crescimento da intensidade em direção ao sul (Figura 4d). Já os dados da CP5 (1,38%) apontam maior intensidade dos valores de SPI-1 na região Noroeste (Figura 4e). Assim, a maior parte da variabilidade das condições climáticas anômalas ocorre na região leste ou na região oeste (explicada pelos CP1 e CP2).

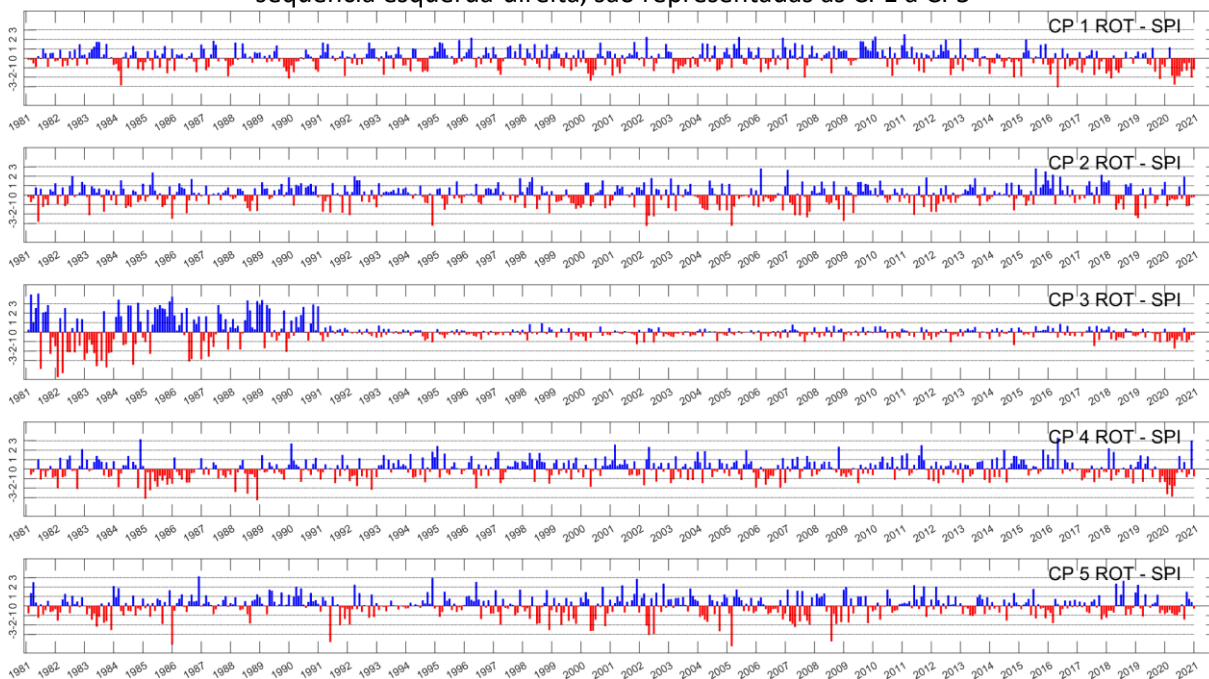
Figura 4 - Padrão espacial das CPs rotacionadas do índice SPI-1 sobre o Estado de São Paulo, para o período de 1981-2020. (a) CP1; (b) CP2; (c) CP3; (d) CP4; (e) CP5.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A série temporal dos modos rotacionados (Figura 5) indica quando os mapas mensais de SPI tiveram padrão semelhante aos mapas espaciais das CPs (Figura 4). Por exemplo, no mês de janeiro de 2010 a CP1 rotacionada apresentou coeficiente de expansão igual a 2,3 (condição úmida extrema). Neste mês, o mapa de SPI-1 (Figura 3a) apresentou valores positivos em todo estado, com maior intensidade na porção leste, indicando, portanto, um padrão espacial de SPI semelhante ao da Figura 5a (modo espacial da CP1 rotacionada).

Figura 5 - Série temporal das CPs rotacionadas (normalizadas) do índice SPI-1 sobre São Paulo. Na seqüência esquerda-direita, são representadas as CP1 a CP5



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

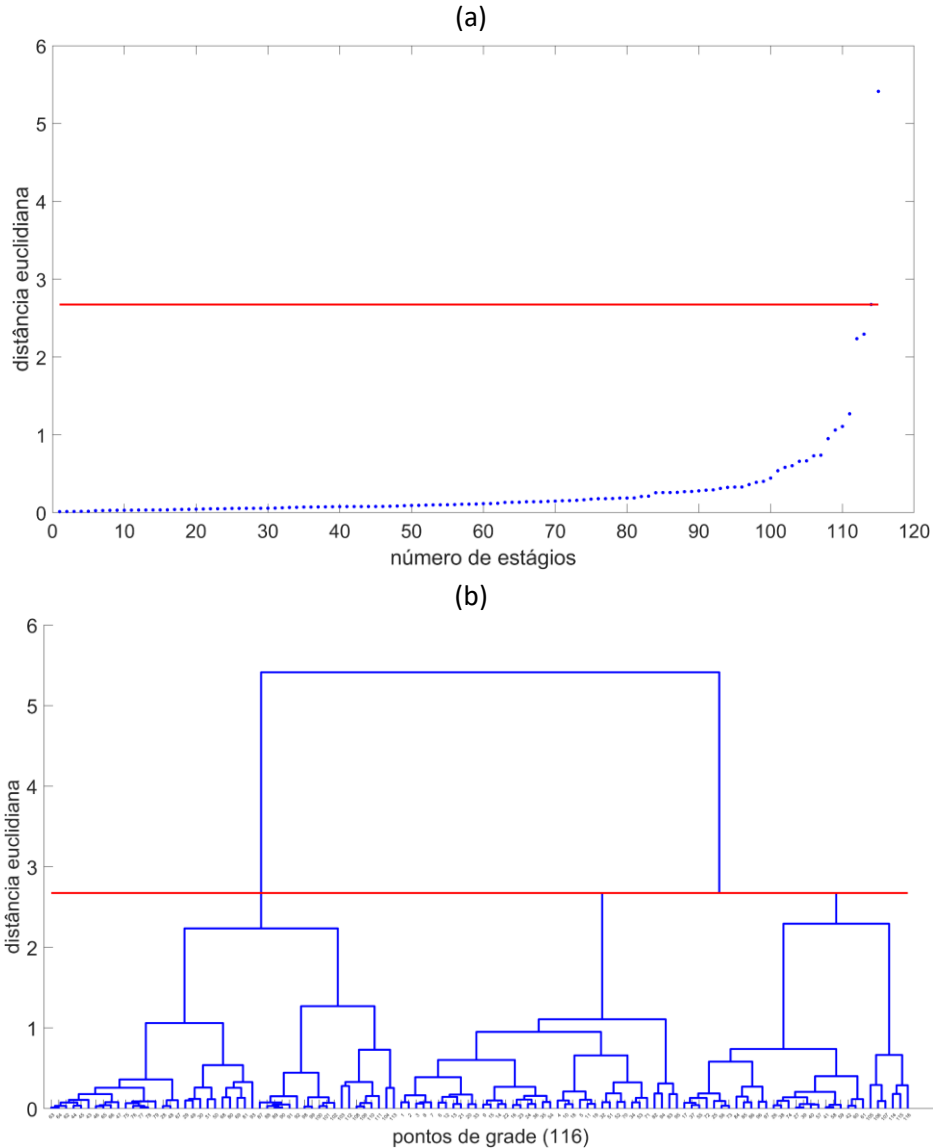
3.3. Regiões homogêneas dos padrões espaciais dominantes do SPI-

1

Para determinar objetivamente regiões homogêneas de comportamento do índice SPI-1 sobre São Paulo, foram utilizados os padrões espaciais das cinco primeiras CPs rotacionadas em um processo de Análise de Agrupamento através dos métodos Hierárquico de Ward e K-Médias. Em relação ao método Hierárquico de Ward, foi encontrado $CCC = 0,7637$, estatisticamente significativos a 5%. Para avaliar os agrupamentos ao passo que são constituídos, analisamos a Figura 6, que mostra a distância euclidiana em cada estágio de agrupamento (Figura 6a) e o dendrograma (Figura 6b). Nestes gráficos, busca-se o estágio de agrupamento, em que a maior distância entre os grupos acontece, o que pode ser identificado com o auxílio da linha horizontal vermelha (altura/dissimilaridade de 2,67). Sendo assim, o dendrograma permite visualizar a formação de dois agrupamentos.

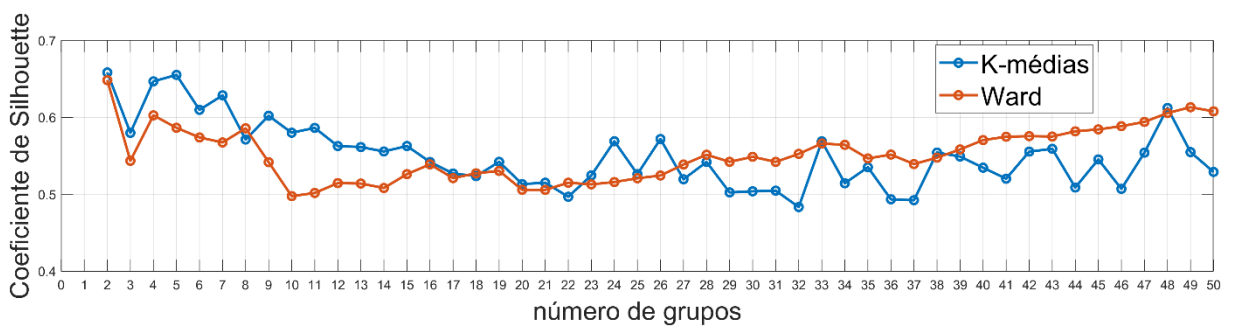
A Figura 7 mostra os valores do Coeficiente de Silhouette, considerando de 2 a 50 agrupamentos. Em ambos os casos, Ward (linha vermelha) e K-Médias (linha azul), a quantidade adequada de agrupamentos equivale a 2, justificado pela proximidade ao valor 1.

Figura 6 – (a) Distância euclidiana em cada estágio do agrupamento e (b) dendrograma para agrupamento de Ward da série temporal da ACP rotacionada do SPI-1 para o Estado de São Paulo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

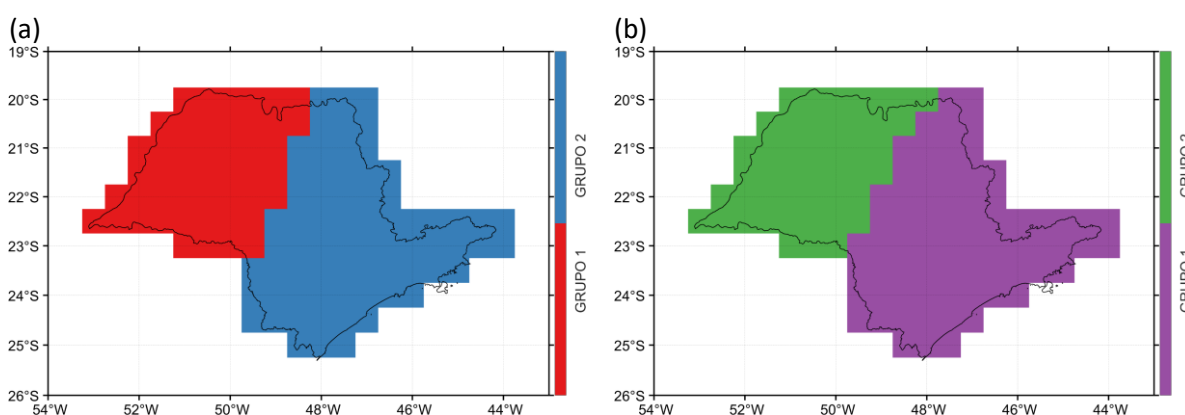
Figura 7 - Coeficiente de Silhouette de 1 a 50 grupos para Agrupamento de Ward (linha vermelha) e K-Médias (linha azul).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

A Figura 8 exibe a divisão espacial em dois grupos homogêneos para o método de agrupamento Hierárquico de Ward e K-Médias. Ambos os métodos mostraram comportamentos espaciais semelhantes, uma divisão leste-oeste do Estado de São Paulo, com pequena variação no centro e norte do Estado. Essa configuração concorda com os resultados da análise rotacionada dos dois primeiros componentes principais, CP1 e CP2, os quais explicam 80,36% da variância total.

Figura 8 - Agrupamento dos 5 primeiros modos rotacionados do SPI-1 com 2 grupos para (a) Agrupamento de Ward e (b) Agrupamento K-Médias.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho avaliou o comportamento do SPI no Estado de São Paulo, a fim de identificar regiões homogêneas de variabilidade climática de precipitação pluvial através da aplicação de diferentes análises estatísticas. A ACP foi aplicada para indicar os padrões espacial e temporais da variabilidade do SPI-1, e a de Agrupamento foi usada para investigar a homogeneidade espacial do SPI-1.

A ACP rotacionada foi realizada a fim de uma melhor representação dos dados originais. Para a rotação, foram selecionadas as cinco primeiras CPs, que representaram 98,96% da variância e apresentaram autovalores maiores que 1. Após a rotação dos eixos, a ACP indicou condições anômalas para todo o Estado em 80,36% dos dados, exibindo maior intensidade, ou seja, apresentando maiores concentrações dessas condições, no leste (CP1, 42,05%) ou no oeste (CP2, 38,31%). Com esse padrão espacial é possível observar que o leste

e o oeste podem ser afetados de forma diferente em relação à intensidade dos eventos extremos. Isso ocorreu em janeiro de 2010, que apresentou maior intensidade das condições úmidas no leste do Estado. Apesar disso, não são todos os eventos extremos que apresentaram esse comportamento espacial leste-oeste, já que aproximadamente 20% dos dados não mostraram essa configuração. Um exemplo é outubro de 2014, que apresentou condições secas concentradas no centro, leste e oeste do Estado, diminuindo ao norte e ao sul.

A análise de agrupamento, utilizando o Método Hierárquico de Ward e não-hierárquico K-Médias, foi aplicada aos cinco primeiros modos rotacionados da ACP do SPI-1. Os dois métodos mostraram que o SPI-1 sobre o Estado de São Paulo apresenta uma divisão espacial em dois grupos homogêneos, confirmando a configuração espacial leste-oeste. Na análise de agrupamento, o Coeficiente de Correlação Cofenético mostrou que o método de Ward é adequado para análise de agrupamento na região e o Coeficiente Silhouette foi utilizado para a decisão do número de grupos.

Este trabalho evidencia que o padrão espacial de extremos climáticos secos e chuvosos possui significativas diferenças regionais sobre o Estado de São Paulo. Os resultados obtidos indicam que é preciso levar em conta estas diferenças, a fim de melhor descrever e compreender o comportamento e os mecanismos climáticos relacionados aos extremos de seca e chuva em São Paulo.

Os resultados deste estudo são importantes para entender o comportamento de eventos extremos de precipitação no Estado de São Paulo, como eles se distribuem espacialmente e ao longo dos anos. Essa compreensão pode ser importante para ajudar no monitoramento e previsões climáticas, e minimizar os impactos relacionados aos extremos para a sociedade.

AGRADECIMENTOS

LAP agradece CNPQ Projeto Universal 426530/2018-7; RGN agradece FAPESP projeto 2021/01305-6.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, T. M. A., MENDES, C.A.B. Avaliação do processo de gestão de seca: estudo de caso no Rio Grande do Sul. **REGA** – Vol. 6, no. 1, p. 17-29, jan./jun. 2009.

ALLEY, W.M. The Palmer drought severity index: Limitations and assumptions. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**. v. 23, 1100–1366, 1984

BERNARD, E., NAVEAU, P., VRAC, M., & MESTRE, O. Clustering of maxima: Spatial dependencies among heavy rainfall in France. **Journal of Climate**, 26(20), 7929-7937. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00836.1>

BJORNSSON, H.; VENEGAS, S.A. **A Manual for EOF and SVD. Analyses of Climatic Data**, 1997. Disponível em: <http://www.geog.mcgill.ca/gec3/wp-content/uploads/2009/03/Report-no-1997-1.pdf>. Acesso em: 8 set. 2022.

BLAIN, G.C.; BRUNINI, O. Avaliação e adaptação do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) e do Índice Padronizado de Precipitação (SPI) às condições climáticas do estado de São Paulo. **Agrometeorologia**, vol. 64, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052005000400020>

BLAIN, G.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; PEZZOPANE, J.E.M.; BONOMO, R. Índice Padronizado de Precipitação aplicado às condições de seca no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 10, p. 1067-1073, 2010.

BLAIN, G.C. Monthly values of the standardized precipitation index in the State of São Paulo, Brazil: Trends and spectral features under the normality assumption. **Bragantia**. v.71, 122–131, 2012.

BRITO, S.S.B.; CUNHA, A.P.M.A.; CUNNINGHAM, C.C.; ALVALÁ, R.C.; MARENGO, J.A.; CARVALHO, M.A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**. v. 38, 517–529.2018.

CATTELL, R. B. The scree test for the number of factors. **Multivariate Behavioral Research**, vol. 1, p. 245–276, 1966. DOI: https://doi.org/10.1207/s15327906mbr0102_10.

CHAUDHARI, S., POKHREL, Y., MORAN, E., & MIGUEZ-MACHO, G. Multi-decadal hydrologic change and variability in the Amazon River basin: understanding terrestrial water storage variations and drought characteristics. **Hydrology and Earth System Sciences**, 23(7), 2841-2862. 2019.

COELHO, C.A.S., DE OLIVEIRA, C.P., AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S ; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S. ; TOMAZIELLO, A. C. N. ; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P. ; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics** 46, 3737–3752. 2016a. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>

COELHO, C.A. S.; CARDOSO, D.H.F.; FIRPO, M.A.F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, p. 769-784, 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>

DE FREITAS, A.A.; REBOITA, M.S.; CARVALHO, V.S.B.; DRUMOND, A.; FERRAZ, S.E.T.; DA SILVA, B.C.; DA ROCHA, R.P. Atmospheric and Oceanic Patterns Associated with Extreme Drought Events over the Paraná Hydrographic Region, Brazil. **Climate**, 11, 12. 2023 <https://doi.org/10.3390/cli11010012>

DE FREITAS, A. A.; DRUMOND, A.; CARVALHO, V. S. B.; REBOITA, M. S.; SILVA, B. C.; UVO, C. B. Drought Assessment in São Francisco River Basin, Brazil: Characterization through SPI and Associated Anomalous Climate Patterns. **Atmosphere**. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13010041>

DE GODOY, R. M. P., GOZZO, L. F., LLOPART, M., PERON, B. L., REBOITA, M. S., REPINALDO, H. F. B., & DE ALMEIDA MARRAFON, V. H. Projeções Climáticas de Temperatura do Ar e Precipitação para o estado de São Paulo Utilizando o Modelo Regional RegCM4. **Anuário do Instituto de Geociências**, 44. 2021. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_39850.

DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F., SHAH, M., ABBAS, A., IQBAL, M. S., SHAHZAD, R., DE GOIS, G., DA SILVA, M. V., JARDIM, A. M. R. F., DE SOUZA, A. Spatiotemporal analysis of drought and rainfall in Pakistan via Standardized Precipitation Index: homogeneous regions, trend, wavelet, and influence of El Niño-southern oscillation. **Theoretical and Applied Climatology** 149, 843–862. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04082-9>

DE PAIVA LIMA, E., DE GOIS, G., & DO NASCIMENTO GARRITANO, F. Análise da variabilidade ambiental da chuva no município de Chapada Gaúcha, Minas Gerais. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, 5(2), 2308-2326. 2022.

EATON, J. W., BATEMAN, D., HAUBERG, S., WEHBRING, R. **GNU Octave version 5.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations**. 2019. Disponível em: <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v5.2.0/>. Acesso em: 8 set. 2022.

GOIS, G. D. **Caracterização da seca e seus efeitos na produção da cultura do milho para as diferentes regiões do estado de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado, UFV. 2005.

GONÇALVES, S.T.N.; DAS CHAGAS VASCONCELOS JUNIOR, F.; SAKAMOTO, M.S.; DA SILVA SILVEIRA, C.; MARTINS, E.S.P.R. Índices e Metodologias de Monitoramento de Secas: Uma Revisão. **Revista Brasileira de Meteorologia** [online]. 2021, v. 36, n. 3 suppl [Acessado 15 Dezembro 2022], pp. 495-511. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0102-77863630007>>. Epub 02 Jul 2021. ISSN 1982-4351. <https://doi.org/10.1590/0102-77863630007>.

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**. 8, 897–931. 1995. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1995\)008<0897:OTAOCA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1995)008<0897:OTAOCA>2.0.CO;2)

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **São Paulo é o 21º colocado no ranking das maiores economias do mundo. 2020.** Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/spnoticias/sao-paulo-e-o-21o-colocado-no-ranking-das-maiores-economias-do-mundo/>. Acesso em: 8 set. 2022.

GOZZO, L. F., PALMA, D. S., CUSTODIO, M. S., & MACHADO, J. P. Climatology and trend of severe drought events in the state of São Paulo, Brazil, during the 20th century. **Atmosphere**, 10(4), 190. 2019a. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos10040190>

GOZZO, L. F., DRUMOND, A., PALMA, D. S., CUSTODIO, M. D. S. Climatology of Meteorological Drought Events in Sao Paulo (Brazil) and its Representation in ERA5 Reanalysis. **AGU Fall Meeting**, 2019b, H21K-1895, 2019b. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFM.H21K1895G/abstract> Acesso em: 8 set. 2022.

GOZZO, L. F.; PALMA, D. S.; CUSTÓDIO, M.S.; DRUMOND, A. Padrões Climatológicos Associados a Eventos de Seca no Leste do Estado De São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, Vol. 28, 2021. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/76268/43238>. Acesso em: 8 set. 2022.

GOZZO, L. F., DRUMOND, A., PAMPUCH, L. A., AMBRIZZI, T., CRESPO, N. M., REBOITA, M. S., BIER, A. A., CARPENEDO, C. B., BUENO, P. G., PINHEIRO, H. R., CUSTODIO, M. S., KUKI, C. A. CO, TOMAZIELLO, A. C. N., GOMES, H. B., DA ROCHA, R. P., COELHO, C. A. S., PIMENTEL, R. M. Intraseasonal Drivers of the 2018 Drought Over São Paulo, Brazil. **Frontiers in Climate**, v.4, 2022. DOI:10.3389/fclim.2022.852824

HANNACHI, A., JOLLIFFE, I.T., STEPHENSON, D.B.. Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review. **International Journal of Climatology**. 27, 1119–1152. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.1499>

HARRIS, I., OSBORN, T. J., JONES, P., & LISTER, D. Version 4 of the CRU TS Monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific data**, 7(1), 1-18. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

HAYES, M., D.A. WILHITE, M. SVOBODA, VANYARKHO, O. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. **Bulletin of the American Meteorological Society** 80, 429-438. 1999.

HEIM, R.R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. **Bulletin of the American Meteorology Society**. 83, 1149-1163, 2002.

IBGE **Cidades e Estados**, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp.html>. Acesso em: 8 set. 2022.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: **The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**[Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock,

T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, DOI:10.1017/9781009157896.

JOETZJER, E.; DOUVILLE, H.; DELIRE, C.; CIAIS, P.; DECHARME, B.; TYTECA, S. Evaluation of drought indices at interannual to climate change timescales: A case study over the Amazon and Mississippi river basins. **Hydrology and Earth System Science**. 17 (12), 4885–4895. 2013. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-4885-2013>, 2013.

JOLLIFFE, I.T. **Principal Component Analysis**, second ed. Springer. 487 pp. 2002.

KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, vol. 20, p. 141–151, 1960. DOI: <https://dx.doi.org/10.1177/001316446002000116>

KARL, T.R., N. NICHOLLS, AND A. GHAZI. CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary. **Climatic Change**, 42, 3-7. 1999.

LLOYD, S., "Least squares quantization in PCM," in **IEEE Transactions on Information Theory**, vol. 28, no. 2, pp. 129-137, March 1982, DOI: 10.1109/TIT.1982.1056489.

MARENGO, J. A., NOBRE, C. A., SELUCHI, M. E., CUARTAS, A., ALVES, L. M., MENDIONDO, E. M., OBREGÓN, G., SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, vol. 106, p. 31-44, 2015. DOI: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>

MARENGO, J. A., CUNHA, A. P., CUARTAS, L. A., DEUSDARÁ LEAL, K. R., BROEDEL, E., SELUCHI, M. E., MICHELIN, C. M., DE PRAGA BAIÃO, C. F., CHUCHÓN ANGULO, E., ALMEIDA, E. K., KAZMIERCZAK, M. L., MATEUS, N. P. A., SILVA, R. C., AND BENDER, F. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. **Frontiers in Water**, 3, 639204. 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.63920

MARTINELLI, M. Clima do estado de São Paulo. **Revista franco-brasileira de geografia**, 2010. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/6348>. Acesso em: 8 set. 2022.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. **The Relationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales**. Eighth Conference on Applied Climatology, 1993. Disponível em: https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf. Acesso em: 8 set. 2022.

MIRANDA, B. G., NEGRI, R. G., PAMPUCH, L. A. Using clustering algorithms and GPM data to identify spatial precipitation patterns over southeastern Brazil. **Atmosfera**. 2022 DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.53155>

MORELLO, T.F.; RAMOS, R.M.; ANDERSON, L.O.; OWEN, N.; ROSAN, T.M.; STEIL, L. Predicting fires for policy making: Improving accuracy of fire brigade allocation in the Brazilian Amazon. **Ecological Economics**, Volume 169, 106501. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.106501>.

NASCIMENTO, F. C. A., BRAGA, C. C., ARAÚJO, F. R.. Análise Estatística dos Eventos Secos e Chuvosos de Precipitação do estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**. Vol. 32, p 375-386. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863230005>

NEGRI, R. G. **Reconhecimento de padrões: um estudo dirigido**. Primeira Edição, Blucher, 2021.

NERY, J. T., SILVA, E. S., & CARFAN, A. C. **Distribuição da precipitação pluvial no estado de São Paulo**. VI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 6.2004.

NOBRE, C., MARENGO, J., SELUCHI, M. , CUARTAS, L. AND ALVES, L. Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. **Journal of Water Resource and Protection**, 8, 252-262. 2016. DOI: 10.4236/jwarp.2016.82022.

NORTH, G.R., T.L. BELL, R.F. CAHALAN, MOENG, F.J. Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. **Monthly Weather Review**, 110, 699-706. 1982.

OLIVEIRA, M. **Eventos Climáticos Extremos no Abc Paulista: Identificação Via Índice Padronizado de Precipitação, Condições Oceânicas Associadas e Impactos no Nível do Reservatório Rio Grande**. 2021, TCC. Disponível em: https://repositorio.unifesp.br/bitstream/handle/11600/61912/TCC_Marina_de_Oliveira_final_pdfa.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 8 set. 2022.

OLIVEIRA, M. DE, DO ROSÁRIO, N. M. ÉVORA, RIZZO, L. V., REBOITA, M. S., & DRUMOND, A. R. DE M. Identificação e caracterização de eventos climáticos secos e úmidos no ABC Paulista no período de 2000-2020 usando o SPI. **Revista Brasileira De Climatologia**, 31(18), 457–485. 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15485>

OTTO, F.E.L.; COELHO, C.A.S.; KING, A.; DE PEREZ E.C.; WADA, Y.; OLDENBORGH, G.J.V.; HAARSMA, R.; HAUSTEIN, K.; UHE P.; AALST M.V.; ARAVEQUIA J.A.; ALMEIDA W.; CULLEN H. Factors Other Than Climate Change, Main Drivers of 2014/15 Water Shortage in Southeast Brazil [in “Explaining Extremes of 2014 from a Climate Perspective”]. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 96 (12), S35–S40. 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-EEE_2014_ch8.1

PAMPUCH, L.A., DRUMOND, A., GIMENO, L. AND AMBRIZZI, T. Anomalous patterns of SST and moisture sources in the South Atlantic Ocean associated with dry events in southeastern Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 15, p. 4913–4928, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4679>.

PEREIRA, V.R.; BLAIN, G.C.; AVILA, A.M.; PIRES, R.C.; PINTO, H.S. Impacts of climate change on drought: Changes to drier conditions at the beginning of the crop growing season in southern Brazil. **Bragantia**, 77, 201–211. 2018.

REBOITA, M. S., TEODORO, T. A., DE SOUZA FERREIRA, G. W., & DE SOUZA, C. A. Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 15(01), 343-358. 2022

SANTOS, S.R.Q.; BRAGA, C.C; SANSIGOLO, C. A.; SANTOS, A. P. P. et al. Determinação de Regiões Homogêneas do Índice de Precipitação Normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**. Vol. 32, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778632120160013>

SILVA, D.F DA.; LIMA, M.J.S.; SOUZA NETO, P.F.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ALMEIDA, H.R.R.C.A.; COSTA, R.L.; PEREIRA, M. P. S. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice Padronizado de Precipitação Para o Leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020.

SIQUEIRA, B., & NERY, J. T. Análise do Índice Padronizado de Precipitação para o estado de São Paulo (Analysis of the Standardized Precipitation Index for the State of São Paulo). **Revista Brasileira de Geografia Física**, 10(6), 1775-1783. 2017.

SOBRAL, B.S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; DE GOIS, G.; PEREIRA-JÚNIOR, E.R. Spatial variability of SPI and RD1st drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil. **International Journal of Climatology**. 38, 3896–3916. 2018.

TERASSI, B.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.D.; GÓIS, G.D.; GALVANI, E. Standardized Precipitation Index Variability in the Northern Region of Paraná State Associated with the El Niño-Southern Oscillation. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 33, 11–25. 2018.

VALVERDE, M. C.; CARDOSO, A. D. O.; BRAMBILA, R. O Padrão de chuvas na região do ABC Paulista: os extremos e seus impactos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.45929>

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., & LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, 23(7), 1696-1718. 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M., BEGUERÍA, S., LORENZO-LACRUZ, J., CAMARERO, J. J., LÓPEZ-MORENO, J. I., AZORIN-MOLINA, C., REVUELTO, J., MORÁN-TEJEDA, E., & SANCHEZ-LORENZO, A. Performance of Drought Indices for Ecological, Agricultural, and Hydrological Applications, **Earth Interactions**, 16(10), 1-27.2012. Retrieved Nov 29, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/eint/16/10/2012ei000434.1.xml>

VICINI, L.; SOUZA, A. M. **Análise Multivariada Da Teoria À Prática**. UFSM, 2005. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/adriano/livro/Caderno%20dedatico%20multivariada%20-%20LIVRO%20FINAL%201.pdf>. Acesso em: 8 set. 2022.

WARD, J. H., JR. Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. **Journal of the American Statistical Association**, 58, 236–244. 1963.

WILKS, D. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. International Geophysics Series, Second Edition, Elsevier, 2006.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Standardized Precipitation Index User Guide**. Org.: SVOBODA, M.; HAYES, M.; WOOD, D. (WMO-No. 1090), Geneva, 2012.

YIHDEGO, Y., VAHEDDOOST, B. & AL-WESHAH, R.A. Drought indices and indicators revisited. **Arabian Journal of Geoscience**, vol. 12, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4237-z>

ZHANG, Q., XU, CY. & ZHANG, Z. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the standardized precipitation index and aridity index. **Theor Appl Climatol** 98, 89–99 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0095-4>