Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

SIMILARIDADES DE EVENTOS EXTREMOS NAS SUB-BACIAS DO RIO SÃO FRANCISCO

Similarities of extreme events in the sub-Bains of the São Francisco river

Similitudes de eventos extremos en las sub cuencas del río São Francisco

Iris Layanne Nobre França
Instituto de Ciências Atmosféricas/Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
Iris__franca@hotmail.com

Djane Fonseca da Silva
Instituto de Ciências Atmosféricas/Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
djane.silva@icat.ufal.br

Resumo: O número de ocorrências de eventos extremos de precipitação vem aumentando ao longo dos últimos anos (COSTA, et al., 2015), dando-se, em alguns casos, com maior intensidade e duração, favorecendo assim, desastres naturais como as secas severas. O estudo de eventos extremos de seca na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BHSF) é justificável, visto que, aproximadamente 54 % de sua área encontra-se no semiárido, com registros de períodos críticos de estiagem, com vazões e precipitações abaixo da média e reduções nos níveis de seus reservatórios. Este estudo teve como objetivo analisar a similaridade ou dissimilaridade dos eventos extremos das sub-regiões que compõem a BHSF através da análise de agrupamento aplicada aos valores de SPI de cada sub-região. Na análise de agrupamento foram identificadas regiões com comportamento semelhante. Em relação às médias anuais, formaram-se dois grandes grupos climáticos que se assemelham indiretamente entre si, e em relação às estações do ano, para o verão, formaram-se quatro grupos, para o outono e o inverno, cinco grupos e para a primavera, surgiram três grupos. O conhecimento dos grupos homogêneos na BHSF pode contribuir de maneira essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Análise de agrupamento. Eventos extremos. SPI. Seca.

Abstract: The number of occurrences of extreme precipitation events has increased over the last few years (COSTA, *et al*. 2015), occurring, in some cases, with greater intensity and duration, thus favoring natural disasters such as severe droughts. The study of extreme drought events in the São Francisco River Basin (SFRB) is justifiable, since approximately 54% of its area is in the semi-arid region, with records of critical periods of drought, with flows and rainfall below average and reductions in levels of

their reservoirs. This study aimed to analyze the similarity or dissimilarity of extreme events in the sub-regions that make up the BHSF through cluster analysis applied to the SPI values of each sub-region. In the cluster analysis, regions with similar behavior were identified. In relation to the annual averages, two large climatic groups were formed that are indirectly similar to each other, and in relation to the seasons of the year, for the summer, four groups were formed, for the autumn and winter, five groups and for the spring, three groups emerged. Knowledge of homogeneous groups in BHSF can make an essential contribution to the management of water resources.
Keywords: Cluster analysis. Extreme events. SPI. Drought.

Resumen: El número de ocurrencias de eventos extremos de precipitación ha ido en aumento en los últimos años (COSTA, *et al*., 2015), ocurriendo, en algunos casos, con mayor intensidad y duración, favoreciendo así los desastres naturales como las sequías severas. El estudio de eventos de sequía extrema en la Cuenca del Río São Francisco (CRSF) es justificable, ya que aproximadamente el 54% de su área se encuentra en la región semiárida, con registros de períodos críticos de sequía, con caudales y precipitaciones por debajo del promedio y reducciones en los niveles de su embalses Este estudio tuvo como objetivo analizar la similitud o disimilitud de los eventos extremos en las subregiones que conforman el BHSF a través del análisis de conglomerados aplicado a los valores del SPI de cada subregión. En el análisis de conglomerados se identificaron regiones con comportamiento similar. En relación a las medias anuales se formaron dos grandes grupos climáticos indirectamente similares entre sí, y en relación a las estaciones del año, para el verano se formaron cuatro grupos, para el otoño e invierno cinco grupos y para el la primavera, surgieron tres grupos. El conocimiento de los grupos homogéneos en BHSF puede hacer una contribución esencial para la gestión de los recursos hídricos.
Palabras clave: Análisis de conglomerados. Eventos extremos. SPI. Seco.

Submetido em: 11/08/2022
Aceito para publicação em: 13/04/2023
Publicado em: 01/05/2023

1. INTRODUÇÃO

Um dos fenômenos ambientais que afeta diversas regiões do planeta e provoca impactos nos âmbitos social, econômico e ambiental é a seca. Esse fenômeno é considerado o pior desastre natural em número de pessoas afetadas (RAJSEKHAR, 2015), além dos prejuízos financeiros que provoca. A seca origina-se a partir da atuação de sistemas meteorológicos nas regiões e dos fenômenos climáticos de grande escala que dominam as variáveis que definem o comportamento e a circulação atmosférica.

O conhecimento da quantidade de chuva que cai em uma região é fundamental para o planejamento estratégico dos recursos hídricos e de todas as atividades que fazem uso desses recursos. Essas informações são essenciais para estudos de balanço hídrico, controle de inundações, irrigação de culturas, modelagem hidrológica, monitoramento de seca e de geada, além da caracterização climatológica (LOUZADA, 2016). Por isso, estudos que buscam compreender a dinâmica das secas em reservatórios e como isso afeta diretamente as ações humanas são importantes.

O histórico climático da Terra mostra que o clima tem oscilado entre os extremos quentes e frios ao longo dos períodos, interferindo também nos regimes de chuva pelo globo. De acordo com Masuda (2009), a variabilidade natural do clima está relacionada à variação nos parâmetros climáticos que não são causados por forças humanas, como exemplo, variações no Sol, erupções vulcânicas e mudanças na órbita da Terra, os quais exercem um controle externo sobre a variabilidade climática. A variabilidade natural também é influenciada por fenômenos climáticos naturais do próprio sistema climático global, como por exemplo, o fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENOS) e o Dipolo do Atlântico, sendo, por exemplo, as secas do nordeste brasileiro (NEB) influenciado por esses fenômenos, conforme (Melo, 1999; Alves, 1997).

A BHSF tem significativa importância para o país, não só pelo volume de água que transporta em uma região semiárida, mas, também, pelo potencial hídrico apto para aproveitamento, além de sua contribuição histórica e econômica. Por meio de sistema de irrigação, é possível realizar várias atividades de agropecuária, desde a criação de gado até o cultivo de frutas para exportação e, também, para subsistência (ANA, 2015).

O comportamento climático dessa Bacia é variável devido sua extensão e localização geográfica. Mais da metade de sua área, localiza-se no Nordeste, percorrendo boa parte do semiárido nordestino, estendendo-se por regiões de clima semiárido, árido e úmido. Dessa forma, a falta de água por causa dos episódios de secas, é um dos sérios problemas encontrados no decorrer da Bacia.

Por tanto, o diagnóstico das secas em conjunto com o desenvolvimento e implementação de sistemas voltados para o seu monitoramento, é um trabalho importante, em especial em uma Bacia que abrange tantas regiões. Esse tipo de estudo pode fornecer informações valiosas para avaliar a intensidade e seus possíveis impactos, estimulando o poder público a investir no planejamento e mitigação desses eventos, reduzindo assim a vulnerabilidade das populações atingidas pelas secas.

Um dos índices de categorização de eventos extremos bastante utilizado é o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), desenvolvido por Mckee, Doesken e Kleist (1993). Segundo Hayes (1999), o SPI tem como objetivo classificar eventos extremos de precipitação, sendo capaz de quantificar a escassez ou o excesso de precipitação em várias escalas de tempo, podendo assim, monitorar secas. Sendo assim, a utilização desse índice permite comparações entre regiões com diferentes características climáticas. Diversos trabalhos científicos têm demonstrado o seu potencial no monitoramento do fenômeno das secas em várias regiões do Brasil (Macedo et al.,2010; Guedes et al.,2012, Sousa et al.,2016; Bonfim et al.,2021).

A análise de agrupamento é utilizada no processo de categorização e consiste em determinar o grau de semelhança ou diferença entre os indivíduos usando a função de agrupamento em uma determinada variável. Essa técnica vem sendo bastante utilizada para se classificar regiões homogêneas, como pode-se encontrar nos trabalhos de Gong e Richman (1995) que fizeram comparações entre alguns métodos de agrupamentos e um conjunto de dados de precipitação na região central e leste da América do Norte e em Unal et al. (2003), em que utilizaram a análise de agrupamentos em dados de temperatura para conseguir sete zonas homogêneas na região da Turquia.

Portanto, o objetivo deste trabalho é analisar a similaridade ou dissimilaridade dos eventos extremos das sub-regiões que compõem a BHSF através da análise de agrupamento aplicada aos valores de SPI de cada sub-região.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

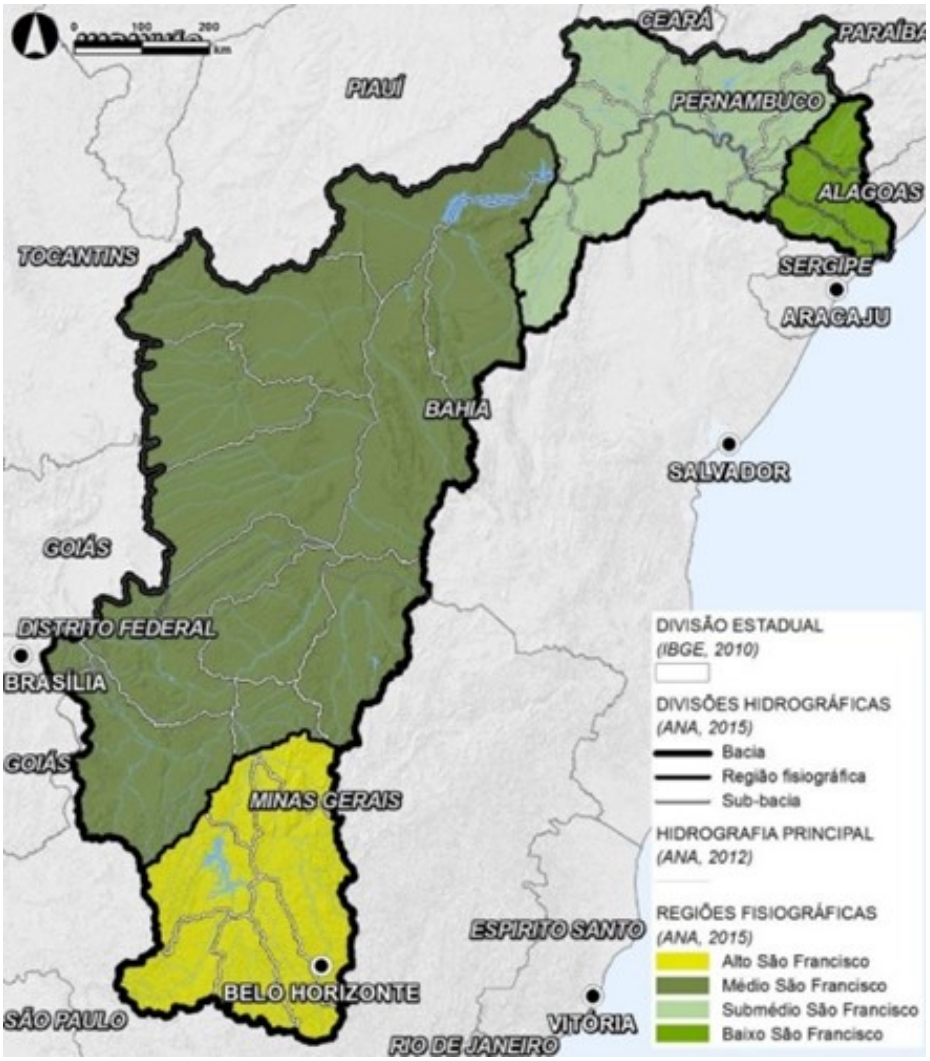
A BHSF (Figura 1), localizada entre as coordenadas 7º17’ a 20º50’ de latitude sul e 36º15’ a 47º39’ de longitude oeste, é formada por diversas sub-bacias que deságuam no rio principal, o São Francisco, e por sua vez, no Oceano Atlântico (Brocca et al., 2013).

Essa Bacia ocupa uma área correspondente a 7,5% do território brasileiro, passando por sete estados: Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Distrito Federal e Goiás. Isso representa cerca de 9% do total de municípios do país e 34 sub-bacias (ANA, 2020).

Desse total de território, em torno de 54% da área encontra-se no semiárido, com registros recorrentes de períodos críticos de estiagem, os quais enfrentam condições hidrológicas adversas, com vazões e precipitações abaixo da média e significativa redução nos níveis de seus reservatórios (CBHSF, 2016; ANA, 2020).

Em virtude de sua grande extensão territorial e das acentuadas diferenças socioeconômicas, com áreas ricas e bastante povoadas e áreas de pobreza crítica e população dispersa, foi proposta a divisão das áreas de drenagem nas quatro sub-regiões mostradas na Figura 1: Alto São Francisco (ASF), Médio São Francisco (MSF), Submédio São Francisco (SMSF) e Baixo São Francisco (BSF) (CBHSF, 2016; Fonseca et al., 2020).

Figura 1 - Divisão da BHSF em quatro sub-regiões.

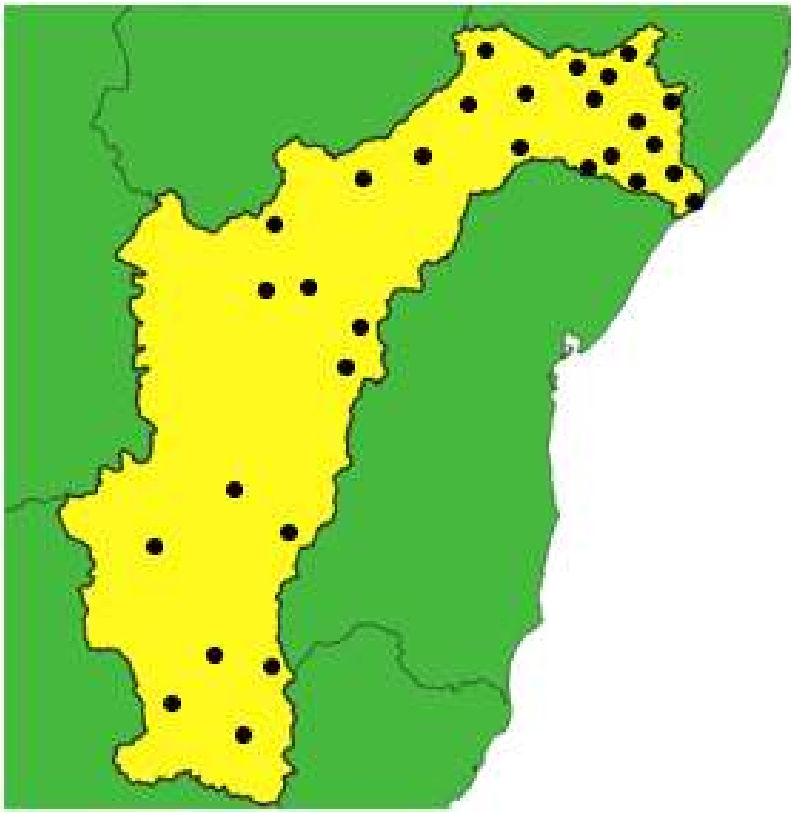


Fonte: ANA (2017).

Foram utilizados dados de precipitação de 30 postos pluviométricos da rede de pluviômetros da BHSF, cujas séries apresentam longo período de registros (no mínimo 30 anos) e contemplam todas as sub-regiões da Bacia. Todos os dados foram obtidos através do portal HidroWeb, ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), da Agência Nacional das Águas (ANA) disponíveis no site www.ana.gov.br/hidroweb.

Foram usados os dados das sub-bacias ASF, MSF, SMSF e BSF, para um mesmo período de tempo, de 1968 a 2020. Para a seleção das estações, o critério utilizado foi a disponibilidade de, pelo menos, 30 anos de observações. A distribuição espacial dos postos pluviométricos está representada na Figura 2.

Figura 2 - Distribuição espacial dos postos pluviométricos usados no estudo.



Fonte: ANA (2017).

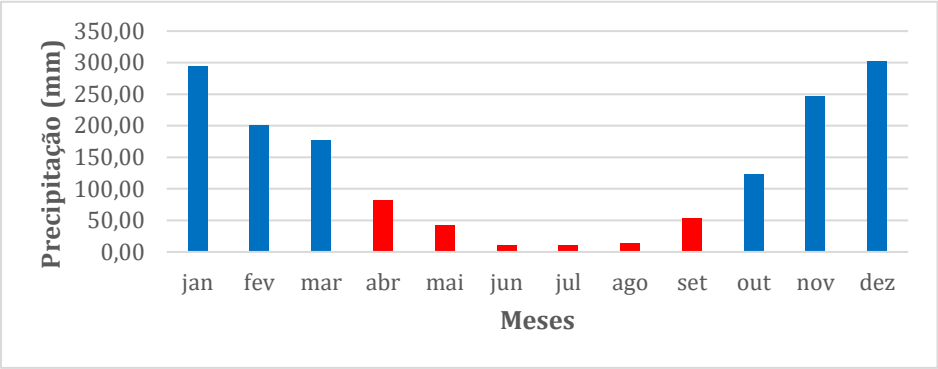
2.2. Climatologia das sub-regiões

Nas Figuras 3, 4, 5 e 6 são apresentadas as médias climatológicas das quatro sub-regiões da BHSF, compreendendo o período entre 1968 e 2020, em que a cor azul indica os meses chuvosos e a cor vermelha, os meses de seca. As sub-regiões ASF, MSF e SMSF apontaram comportamentos similares em relação aos períodos secos. Já a sub-região do BSF procedeu de forma distinta das demais regiões.

Por causa de sua grande extensão e localização geográfica, o comportamento climático da BHSF é bem variável. Da Silva (2004) relata que esse comportamento se dá em virtude da intensa influência de diversos fenômenos atmosféricos que interferem no regime de precipitação na Bacia. Em seu trabalho, Assis (2016) constatou essa característica na mesma região de estudo.

Para sub-região do ASF (Figura 3), os seis meses mais secos verificam-se de abril a setembro, com precipitações mínimas nos meses de junho e julho e sua quadra chuvosa ocorre de novembro a fevereiro devido à atuação da ZCAS.

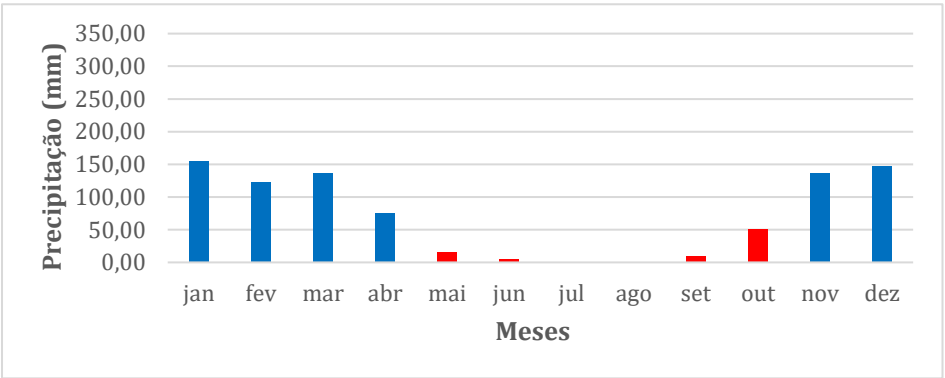
Figura 3 - Média climatológica para o ASF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2022).

Para a sub-região do MSF (Figura 4), verifica-se que os seis meses mais secos vão de maio a outubro e os meses de julho e agosto apresentam as menores precipitações, quase com ausência destas, com a quadra chuvosa transcorrendo de dezembro a março.

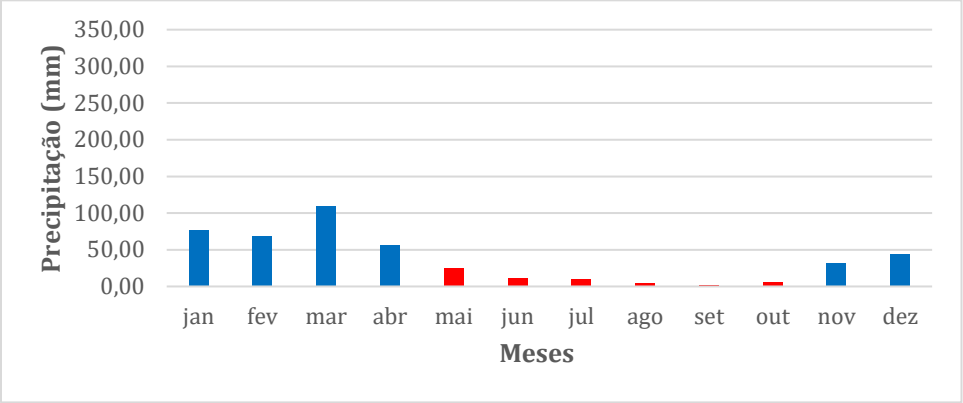
Figura 4 - Média climatológica para o MSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2022).

Na sub-região do SMSF, que se encontra no NEB, em geral, os seis meses mais secos, assim como MSF, verificam-se entre maio e outubro, com precipitações mínimas nos meses de agosto e setembro, como mostra a Figura 5 e a quadra chuvosa ocorre de janeiro a abril, contando com a influência da aproximação da ZCIT.

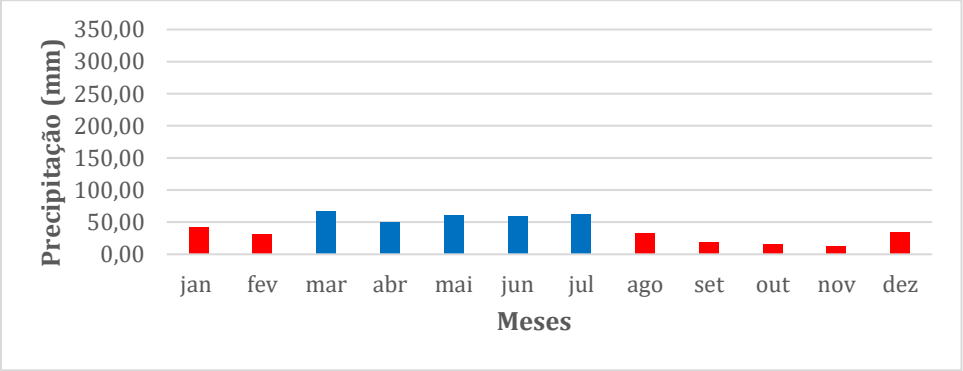
Figura 5 - Média climatológica para o SMSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2022).

Já na sub-região do BSF, observa-se um comportamento diferente das demais. Nela, o período seco compreende o intervalo de agosto a fevereiro, com precipitação mínima nos meses de outubro e novembro, conforme a Figura 6, e o período chuvoso ocorre entre os meses de março e julho, sendo março e maio os meses com maiores valores de precipitação.

Figura 6 - Média climatológica para o BSF de 1968 a 2020.



Fonte: Autor (2022).

2.3. Índice de Precipitação Padronizada (SPI)

O índice de precipitação padronizada (SPI) é um índice de seca meteorológica que foi desenvolvido por Mckee, Doesken e Kleist (1993) com o objetivo de monitorar e analisar a seca, tendo ainda, capacidade de quantificar o déficit ou o excesso de precipitação em várias escalas temporais, destacando-se dentre os índices mais comuns utilizados no monitoramento de secas. A vantagem de sua utilização consiste na possibilidade de identificar qual região se

encontra em situação mais crítica quanto às secas, sem necessitar de maiores informações acerca das condições climatológicas médias dessa região (DA SILVA, 2009).

O SPI utiliza apenas um tipo de informação, os dados mensais de precipitação. Segundo Hayes et al. (1999), esses dados devem ser normalizados de modo que os climas mais úmidos e secos sejam representados de uma maneira similar. Esse índice é largamente utilizado, pois de acordo com Mckee et al. (1993), pode ser aplicado a qualquer região que possua uma série histórica de dados mensais de precipitação de, no mínimo, 30 anos.

O SPI é calculado ajustando uma função de densidade de probabilidade à distribuição de frequência da precipitação somada na escala de tempo de interesse. Neste estudo, a função densidade de probabilidade que será utilizada é a gama (Equação 1), que será, posteriormente, transformada na distribuição normal padronizada.

(1) $$g(x) = \frac{1}{\beta\alpha\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \qquad \alpha = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \qquad \beta = \frac{\bar{X}}{\alpha}$$

Na qual: α > 0 parâmetro de forma; β > 0 parâmetro de escala; x > 0, a quantidade de precipitação (mm) e γ(α) a função gama completa. Sendo, ainda, $\bar{x}$ a precipitação média e A = $\ln(\bar{x})$ - $\frac{\sum \ln(x)}{n}$, onde ln é o logaritmo neperiano e n é número de observações.

Com isso, a distribuição acumulativa será transformada em distribuição probabilidade normal, apresentando média igual a zero e desvio padrão igual a um. Posteriormente, a probabilidade acumulada de acontecimentos de cada valor mensal é estimada. Para que o valor do SPI seja encontrado, aplica-se a essa probabilidade, a função normal inversa. Dessa forma, segundo Santos et al. (2017), o valor do SPI será calculado de acordo com a Equação 2.

(2) $$SPI = Zi = \frac{(Pi - \overline{Pi})}{\sigma i}$$

Em que P_i é a precipitação mensal no período, $\bar{P}_i$, a precipitação média do período que será estudado e σ_i representa o desvio padrão da série histórica de precipitação.

Com isso, a precipitação total mensal para um período de tempo específico receberá um valor adimensional equivalente a uma classe. Segundo Bonfim et al. (2021), SPI com valores positivos caracteriza superioridade à média de precipitação, enquanto valores negativos, descrevem eventos com números menores que a média de precipitação e o valor

zero corresponde à precipitação média. Na Tabela 1 são ilustradas as categorias de SPI, de acordo com as descritas por McKee et al. (1993) e modificadas por Bonfim et al. (2021).

Tabela 1 - Classificação do Índice de Precipitação Padronizada (SPI) e categorias.

SPI	CLASSIFICAÇÃO	SPI	CLASSIFICAÇÃO
< -2,00	Seca Extrema	0,50 a 0,99	Chuva Leve
-1,99 a -1,50	Seca Severa	1,00 a 1,49	Chuva Moderada
-1,49 a -1,00	Seca Moderada	1,50 a 1,99	Chuva Severa
-0,99 a -0,49	Seca Leve	> 2,00	Chuva Extrema
-0,48 a 0,49	Quase Normal		

Fonte: MacKee et al. (1993) adaptada de Bonfim et al. (2021).

2.4. Análise de Agrupamento

Dentre as técnicas que podem ser utilizadas para a análise do comportamento espacial da precipitação, existem as análises estatísticas de agrupamento. Uma dessas técnicas, utilizada para detecção e avaliação de regiões homogêneas, é conhecida como Cluster Analysis (Análise de Agrupamento). Esta análise faz parte de um conjunto de técnicas estatísticas denominada Análise Multivariada. Ela forma agrupamentos de dados com características semelhantes através da minimização da distância euclidiana entre os grupos (ALCÂNTARA, 2020).

Com os dados tratados e organizados, foi utilizado o método de Análise de Agrupamentos, e para isso, foi utilizado o software SPSS® e o método hierárquico. A partir desse software, dendrogramas foram gerados, os quais uniram os indivíduos mais semelhantes e apontaram os não semelhantes, por meio da distância euclidiana. Essa análise foi oportuna para identificar as áreas climatologicamente homogêneas.

Identificadas as áreas homogêneas dentro da BHSF, foram gerados mapas pelo Software Sufer®, que permitiram uma rápida visualização de áreas climatologicamente homogêneas.

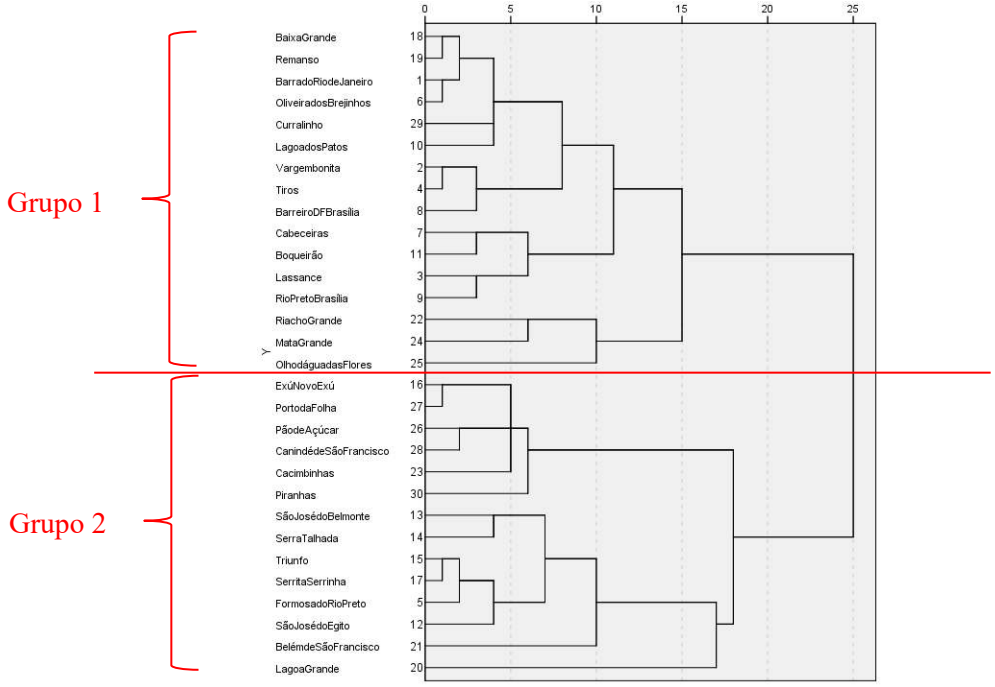
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de Agrupamento

A Análise de Agrupamento foi utilizada para avaliar a semelhança entre as áreas estudadas na BHSF, identificando regiões com comportamento semelhante. A apresentação dos resultados na forma de um dendrograma permite representar hierarquicamente os grupos e suas combinações, indicando o nível de similaridade ou dissimilaridade entre eles, assim como em Santos el al. (2019).

Com isso, o dendrograma da Figura 7 foi gerado, o qual aponta as estações que formam os grupos de maior semelhança dentro de cada sub-região. As informações contidas nesse gráfico, referem-se às médias anuais das estações. Já os dendrogramas das Figuras 9, 11, 13 e 15, referem-se ao comportamento das estações pluviométricas durante as quatro estações do ano. Para isso, utilizou-se o software SPSS® e o método hierárquico. Nesses dendrogramas, o eixo das abcissas indica a distância euclidiana e no eixo das ordenadas estão sinalizadas as estações.

Figura 7 - Dendrograma das médias anuais.



Fonte: Autor (2022).

A partir desse dendrograma (Figura 7), é possível identificar as diversas estações pluviométricas que têm semelhança direta entre si, sejam elas dentro da mesma sub-bacia ou até entre sub-bacias distintas, mostrando o grau de semelhança entre elas.

Dentro de uma mesma sub-região, encontrou-se semelhança direta entre as estações 18 (Baixa Grande) e 19 (Remanso), 2 (Vargem Bonita) e 4 (Tiros), 7 (Cabeceiras) e 11 (Boqueirão), 26 (Pão de Açúcar) e 28 (Canindé de São Francisco), 15 (Triunfo) e 17 (Serrita), indicando que os eventos extremos registrados nessas estações são semelhantes em seu comportamento.

Já as estações 1 (Barra do Rio de Janeiro) e 6 (Oliveira dos Brejinhos), 29 (Curralinho) e 10 (Lagoa dos Patos), 3 (Lassance) e 9 (Rio Preto), 16 (Exú) e 27 (Porto da Folha), 13 (São José do Belmonte) e 14 (Serra Talhada), apresentaram grandes semelhanças entre si, porém estão localizadas em sub-regiões diferentes. Dessa maneira, os valores de SPI referentes a essas estações indicam que os eventos extremos registrados por elas são semelhantes em seu comportamento e causa.

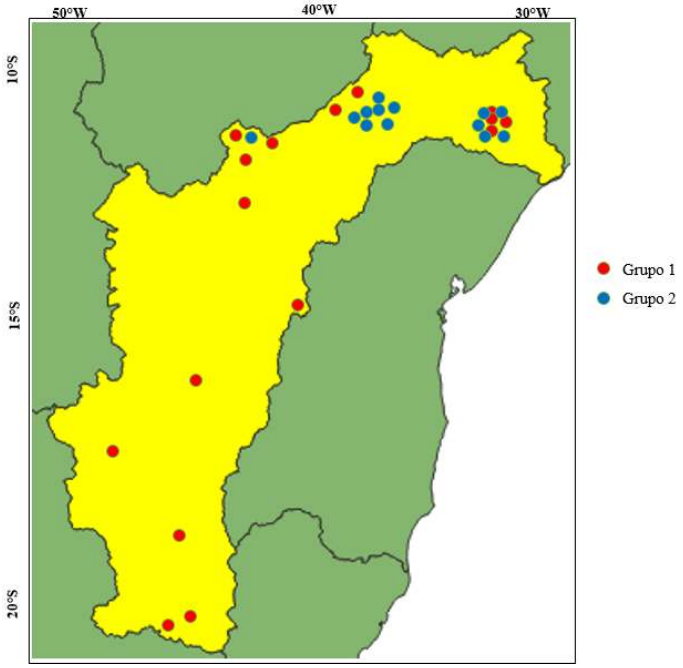
Nesse conjunto de dados, as estações 18 (Baixa Grande) e 16 (Exú), por exemplo, estão localizadas na mesma sub-região (SMSF), no entanto, a semelhança entre elas é muito pequena, não obstante, estão em grupos completamente diferentes no dendrograma. O mesmo ocorre entre as estações 6 (Oliveira dos Brejinhos) e 5 (Formosa do Rio Preto), ambas localizadas no MSF.

Além disso, a estação 20 (Lagoa Grande) se funde a um dos pontos mais altos do dendrograma, o que pode indicar que essa estação apresenta valores atípicos dentro do conjunto de dados. Desse modo, as estações apresentadas no dendrograma da Figura 7 formam dois grupos climáticos homogêneos e distintos entre eles, semelhante ao que Bonfim *et al.* (2021) examinaram nas duas Bacias Hidrográficas, de São Paulo, analisadas em seu trabalho.

Nenhuma estação apresentou-se de forma isolada em relação as demais, ou seja, não foi formado um grupo unitário, indicando que todas elas possuem algum grau de semelhança entre seus dados.

Para uma melhor visualização dos grupos formados em relação às médias anuais dentro da BHSF, foi gerada a Figura 8.

Figura 8 - Mapa de distribuição espacial dos grupos com médias anuais semelhantes. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



Fonte: Autor (2022).

A partir da Figura 8 é possível constatar que apenas a sub-região do ASF não apresentou a ocorrência de representantes de suas estações pluviométricas no grupo 2. Nessa sub-região está presente apenas o grupo 1. Nas demais sub-regiões, MSF, SMSF e BSF, vê-se representantes dos dois grupos, mesmo que em pequena quantidade como no MSF no qual houve a ocorrência de apenas um representante do grupo 2.

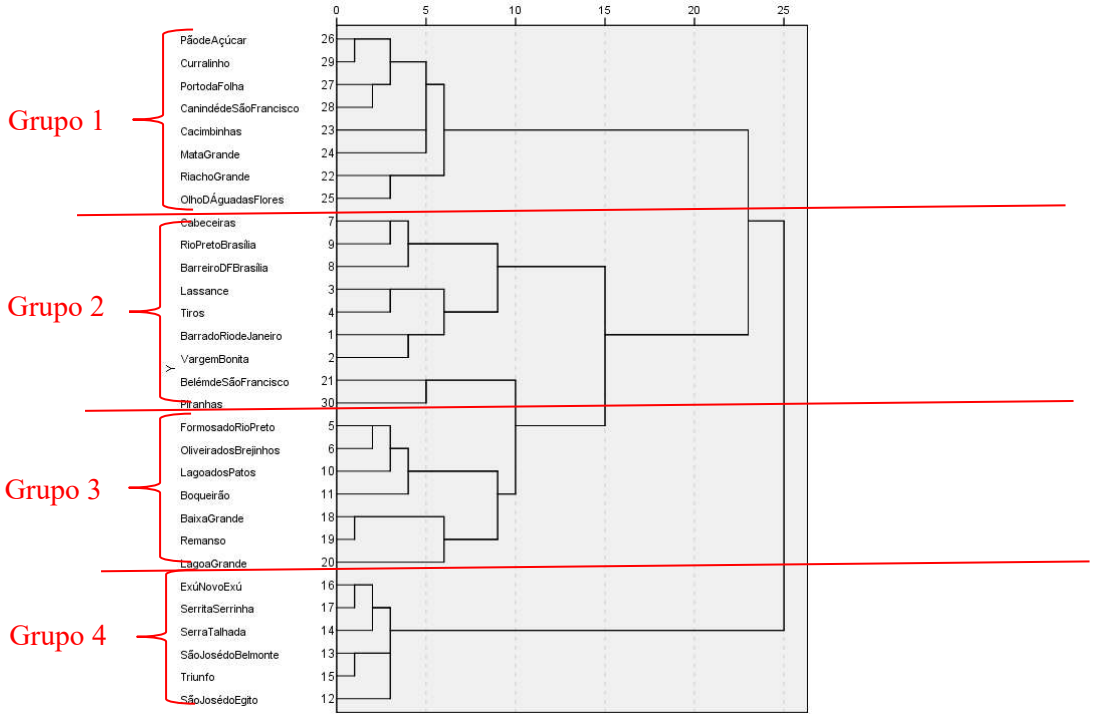
A sub-região BSF é a que se mostra de forma mais heterogenia em relação aos grupos, tendo quatro representantes no grupo 1 e cinco no grupo 2. Por outro lado, no MSF tem-se apenas uma estação pluviométrica pertencente ao grupo 2, as demais fazem parte do grupo 1.

Assim como neste estudo, Passos *et al*. (2021) empregaram técnicas estatísticas multivariadas em outra importante bacia hidrográfica do Brasil, a bacia do rio Doce, agrupando em seu trabalho, as estações de acordo com a similaridade dos parâmetros selecionados, para as estações seca e chuvosa.

A análise de agrupamento também foi utilizada para avaliar as semelhanças para as estações do ano.

A partir do dendrograma referente ao verão (Figura 9), é possível verificar que as estações pertencentes às seguintes duplas de estações apresentam uma boa semelhança entre si durante essa época do ano: Pão de Açúcar e Curralinho; Baixa Grande e Remanso; Exú e Serrita; e São José do Belmonte e Triunfo, sendo as duas últimas duplas pertencentes ao mesmo grupo.

Figura 9 - Dendrograma para o verão.



Fonte: Autor (2022).

O dendrograma do verão está notadamente dividido em quatro grupos distintos, compostos pelas seguintes estações. Dos quatro conjuntos, o grupo 4 apresenta-se de forma pouco semelhante aos demais grupos, sendo o que está mais distante dos outros, dessa forma, é o que se mostra com o menor grau de semelhança entre suas estações e as demais, no verão.

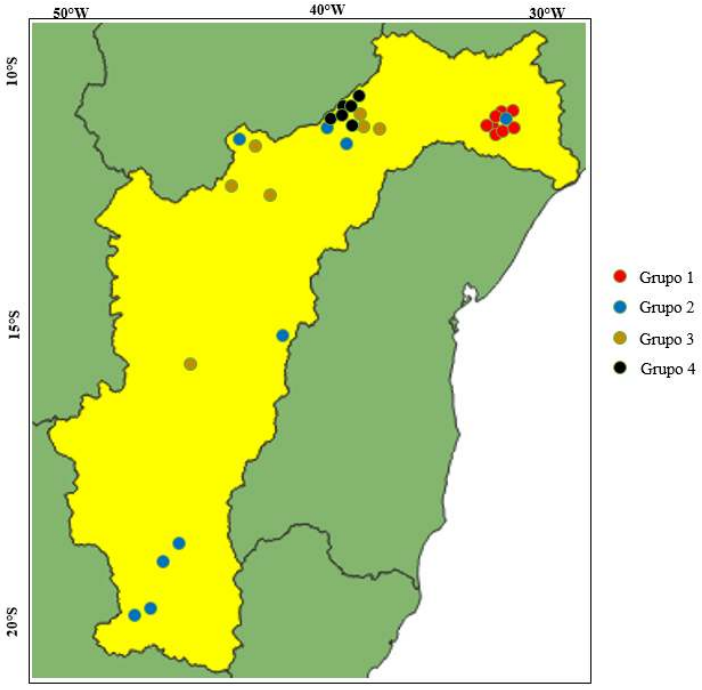
O grupo quatro é composto exclusivamente por estações localizadas no SMSF, região que se distingue das demais nessa estação do ano, sendo o período mais chuvoso (MOURA *et al*., 2006). As grandes secas que afetaram o rio São Francisco estiveram historicamente mais concentradas na região do BSF. No entanto, de acordo com a pesquisa de Paredes-Trejo *et al*.

(2021), há sinais de condições crescentes de seca, nas demais áreas da bacia, como é o caso do ASF e MSF.

Os eventos de seca/chuva que ocorrem nessas estações quase que não têm relação. Por outro lado, os grupos 2 e 3, mostram-se mais semelhantes, já que suas distâncias euclidianas são as menores entre todos os outros grupos. De acordo com Portela e Quintela (2006) e Santos *et al*. (2010), à medida que a precipitação diminui o regime hidrológico torna-se mais irregular e consequentemente mais propenso a secas.

A Figura 10 traz a distribuição espacial dos grupos por toda a Bacia, durante o verão. A sub-região BSF mostra-se menos heterogênea, sendo a maioria de suas estações pertencentes ao grupo 1, tendo apenas uma representante do grupo 2.

Figura 10 – Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao verão. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).

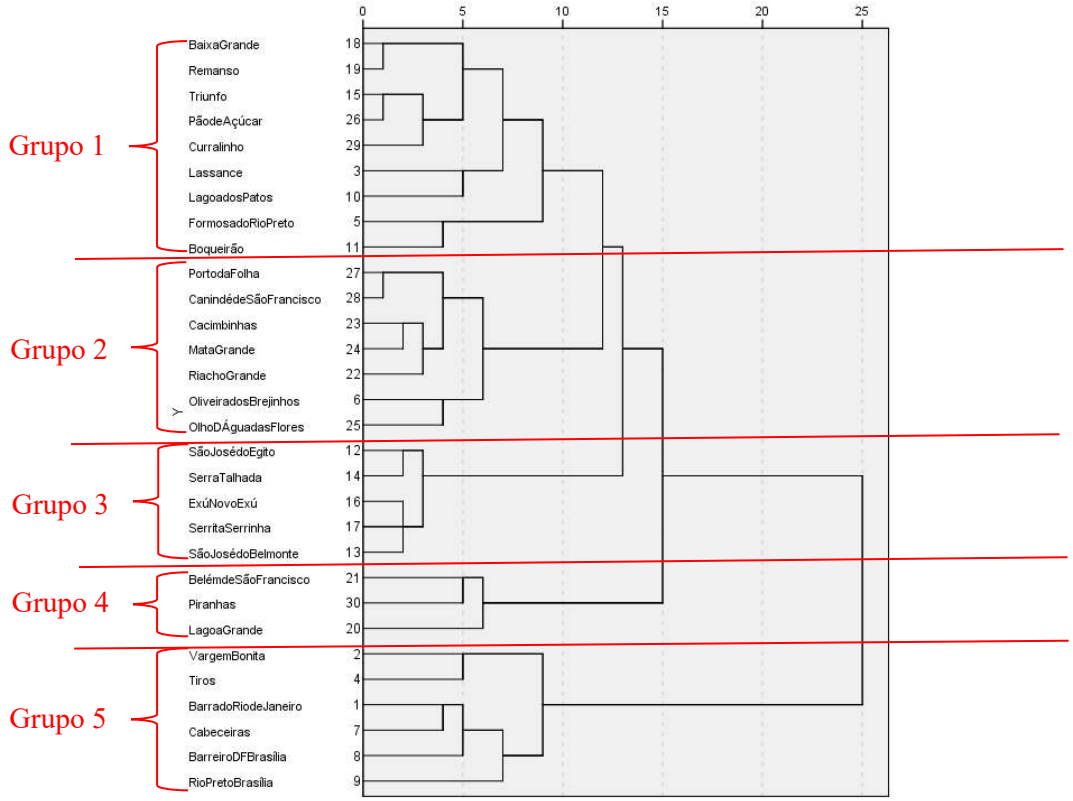


Fonte: Autor (2022).

Por outro lado, percebe-se que todas as estações pluviométricas do ASF pertencem ao mesmo grupo (2), por tanto, as estações pluviométricas dessa sub-região exibem um comportamento semelhante no que diz respeito ao SPI. Já o MSF foi a sub-região que retratou a maior variedade de grupos presentes em seu território, como os grupos 2, 3 e 4, excluindo-se apenas representantes do grupo 1, que ficaram exclusivamente no BSF.

Já a Figura 11 traz o dendrograma referente ao outono. A partir dele é possível verificar a existência de uma maior quantidade de grupos em relação ao dendrograma do verão, neste caso são cinco. Percebe-se, com isso, que durante essa estação do ano, o comportamento nas estações difere de forma visível.

Figura 11 – Dendrograma para o outono.



Fonte: Autor (2022).

Os grupos 1 e 2 (Figura 11) são os que aparecem como os mais semelhantes, portanto, as características dos eventos de chuva ou seca nessas estações são similares. Por outro lado, o grupo 5 é o que se mostra de forma mais isolada, indicando pouca semelhança entre as estações que o compõe e todas as outras.

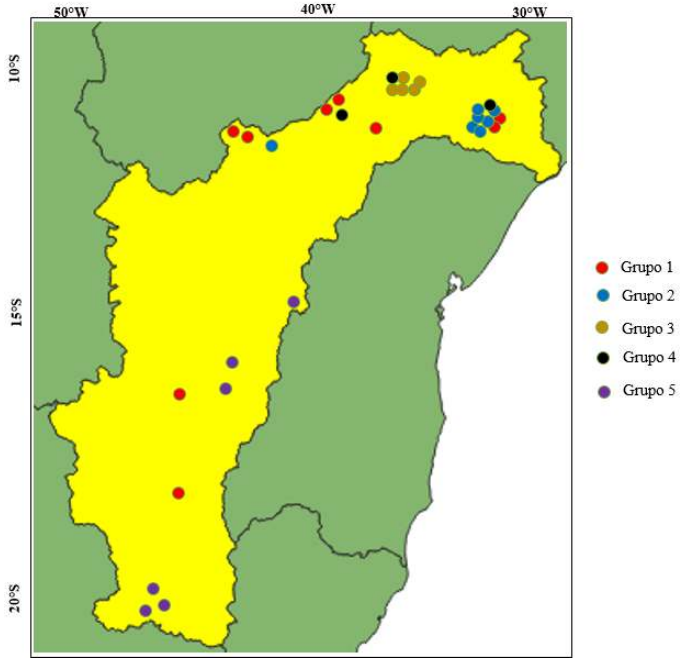
As estações que apresentaram as maiores semelhanças foram: Baixa Grande e Remanso, localizadas no SMSF; Triunfo e Pão de Açúcar, a primeira situada no SMSF e a segunda no BSF; Porto da Folha e Canindé de São Francisco, localizadas no BSF. Nota-se que, mesmo situadas em sub-regiões diferentes, as estações Triunfo e Pão de Açúcar apresentaram grandes semelhanças entre si. Dessa maneira, os valores de SPI referentes a essas estações

indicam que os eventos extremos registrados por elas são semelhantes em seu comportamento e causa.

Nenhuma estação apresentou-se de forma isolada em relação as demais, ou seja, não foi formado um grupo unitário, indicando que todas elas possuem algum grau de semelhança entre seus dados, mesmo sendo mínimo. Em seu trabalho, os resultados de Oliveira (2017) sugerem que as sub-regiões do NEB são menos influenciadas pelo El Niño e La Niña, e as áreas secas apresentam maior variabilidade, com maior número de eventos intensos.

A Figura 12 foi gerada para exibir a distribuição espacial dos grupos por toda a Bacia, durante a estação do outono. Nela, vê-se que há uma maior aparição de grupos distintos em cada sub-região. No BSF é possível identificar estações pluviométricas pertencentes aos grupos 1, 2 e 4, revelando que durante o outono as estações que representam essa sub-região se comportam de formas distintas no que diz respeito ao SPI.

Figura 12 – Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao outono. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



Fonte: Autor (2022).

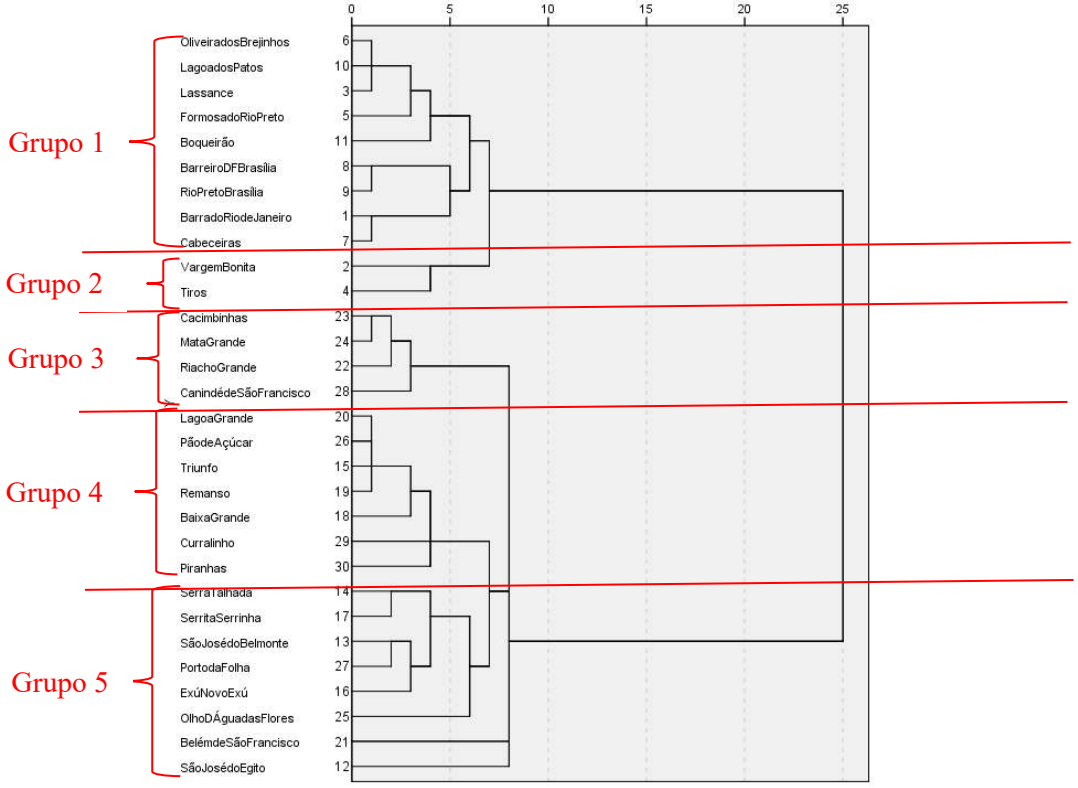
Percebe-se, também que pela primeira vez, no ASF, constatou-se a presença de mais de um grupo. Dessa for, durante o outono, houve a ocorrência do grupo 1 e do grupo 5. Por tanto, nessa estação do ano, a estação Lassance é a que se comporta de forma menos

semelhante em relação as demais estações do ASF, Vargem Bonita, Tiros e Barra do Rio de Janeiro.

O MSF exibe três grupos distintos em seu território, no entanto a estação Oliveira dos Brejinhos (grupo 2) é a que menos se assemelha às demais estações da sub-região, já que as outras pertencem a outros grupos. Todavia, pode-se constatar que os grupos 1 e 5 apresentam mais estações, indicando a semelhança entre as que fazem parte de um mesmo grupo. No SMSF também é constatada uma boa variedade de grupos, sendo eles os grupos 1, 3 e 4.

O dendrograma da Figura 13 permite observar que na estação do inverno, tem-se uma maior quantidade de estações bastante semelhantes, ou seja, com as menores distâncias euclidianas entre elas.

Figura 13 – Dendrograma para o inverno.



Fonte: Autor (2022).

Considerando-se o inverno, a Figura 13 ilustra o comportamento das estações durante essa época do ano. Seu dendrograma mostrou um comportamento particular em relação às demais estações do ano: a considerável distância euclidiana entre os dois primeiros grupos, o primeiro formado pelas estações 6, 10, 3, 5, 11, 8, 9, 1 e 7, e o segundo, bem menor, composto

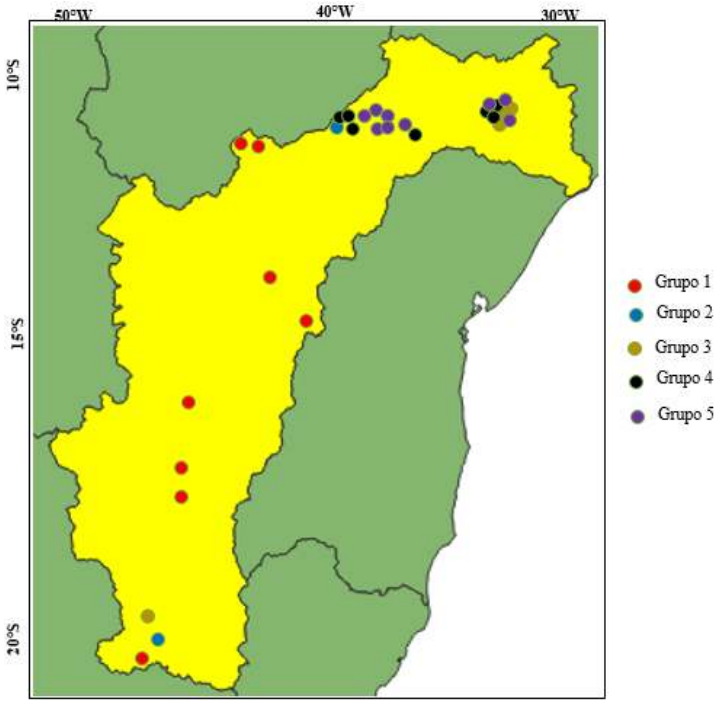
pelas estações 2 e 4. Esses dois primeiros grupos têm um grau de semelhança em relação aos demais grupos, bem pequeno. Ainda assim, os dois apresentam-se bem ligados entre si, indicando comportamentos semelhantes no decorrer do inverno.

De acordo com a Figura 13, as estações Oliveira dos Brejinho (6), Lagoa dos Patos (10) e Lassance (3) são similares em seus comportamentos durante o inverno, mesmo a estação 3 estando localizada no ASF, diferentemente das estações 8 e 10 situadas no MSF. De forma parecida, têm-se as estações 8 (Barreiro) e 9 (Rio Preto), 1 (Barra do Rio de Janeiro) e 7 (Cabeceiras), 23 (Cacimbinhas) e 24 (Mata Grande), e o quarteto formado pelas estações 20 (Lagoa Grande), 26 (Pão de Açúcar), 15 (Triunfo) e 19 (Remanso) que ressaltam características análogas entre si.

Além disso, as estações 21 (Belém de São Francisco) e 12 (São José do Egito) se fundem a um dos pontos mais altos dentro do seu grupo, no dendrograma, o que pode indicar que essas estações apresentam valores atípicos dentro do conjunto de dados, no entanto, continuam semelhantes o suficiente para permanecerem no grupo.

Durante o inverno, assim como no outono, houve a identificação de cinco grupos de estações pluviométricas com algum grau de semelhança. O BSF continua sendo umas das sub-regiões com as maiores variedades de grupos, no entanto, o ASF e o SMSF apresentaram a ocorrência de três grupos distintos, assim como o BSF, como pode ser visto no mapa da distribuição espacial dessa estação (Figura 14).

Figura 14 – Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação ao inverno. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



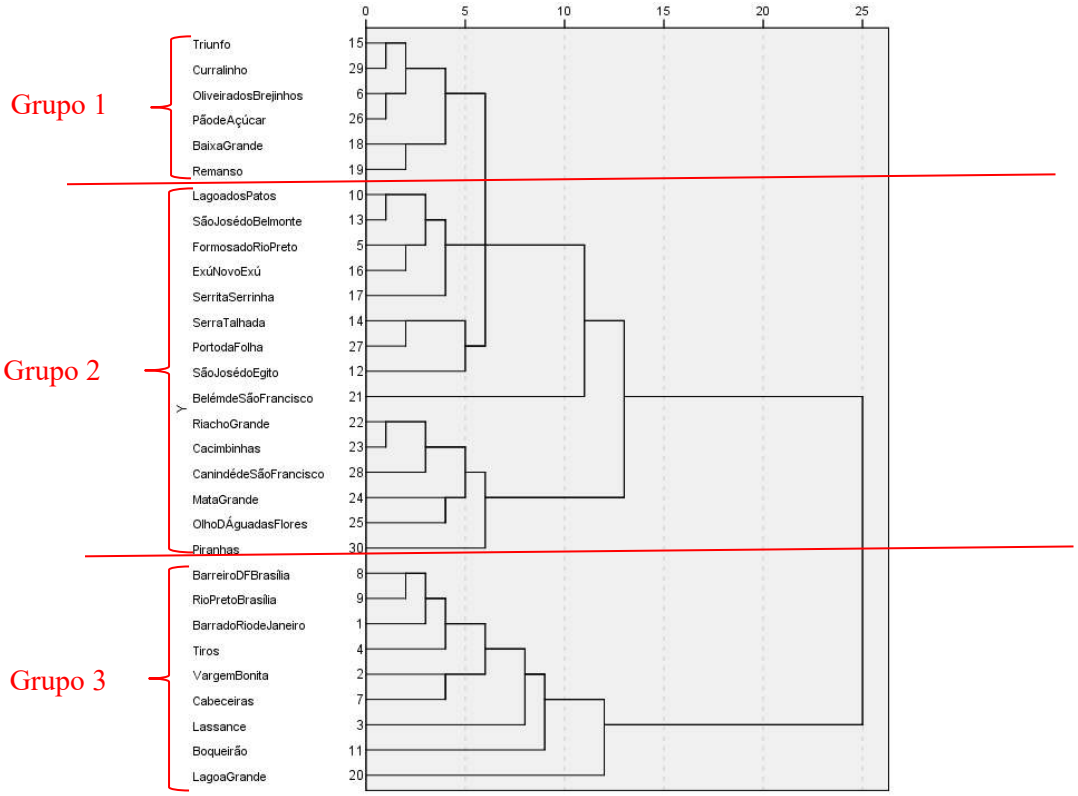
Fonte: Autor (2022).

Apenas o MSF que exibiu um tipo de grupo predominante, ou seja, todas as suas estações mostraram-se semelhantes em seus comportamentos. No entanto, a estação Cabeceiras (grupo 2) é a que menos se assemelha às demais estações da sub-região, estando ela bem próxima à fronteira entre o MSF e o SMSF.

É durante o inverno que o ASF exibe a maior variedade de grupos. Os grupos 1, 2 e 3 foram identificados nessa sub-região durante a estação. Contudo, as estações Lassance e Barra do Rio de Janeiro pertencem ao mesmo grupo (1), assemelhando-se de forma mais direta, e as estações Vargem Bonita e Tiros, pertencentes a grupos distintos, 2 e 3 respectivamente.

Para a primavera, conforme a Figura 15, percebe-se também a nítida separação de grupos de acordo com as similaridades das estações em relação aos episódios de seca ou chuva durante essa estação do ano.

Figura 15 – Dendrograma para a primavera.



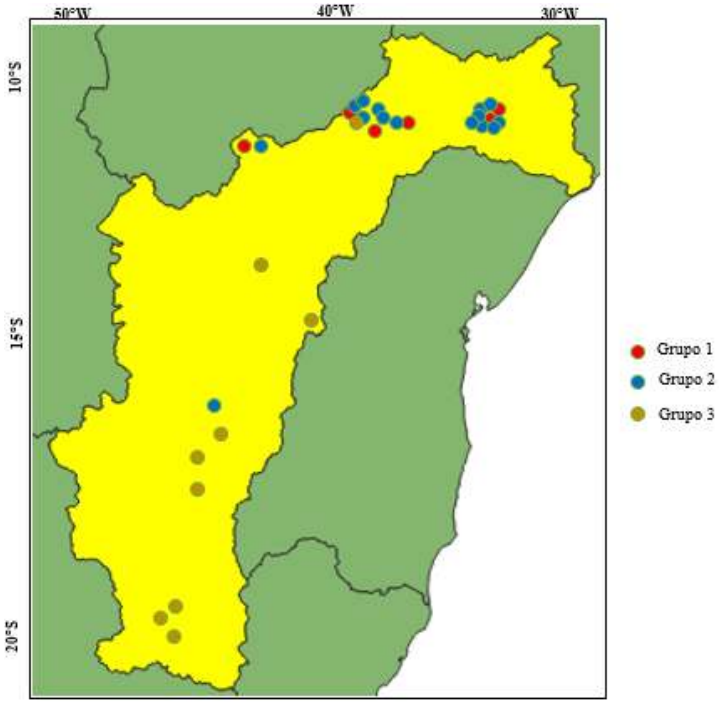
Fonte: Autor (2022).

Destacam-se as estações Belém de São Francisco (21) e Lagoa Grande (20) que não têm ligação direta com nenhuma das outras estações, exibindo uma grande distância para as demais. Além dessas, que são as mais proeminentes, tem-se também as estações 30 (Piranhas), 3 (Lassance) e 11 (Boqueirão).

Os grupos 1, 2 e 3 são os que exibem as maiores proximidades, indicando as grandes similaridades no comportamento dos eventos de chuva ou seca dentro da BHSF. No entanto, o último grupo não se apresenta tão ligado aos demais, apontando as diferenças entre os dados pluviométricos de suas regiões e todas as outras.

Para ilustrar a distribuição espacial dos grupos das estações pluviométricas semelhantes durante a primavera, tem-se a Figura 16. Nela, observa-se o menor número de grupos identificados em relação aos demais mapas nas outras estações do ano, sendo apenas três na primavera. Dessa forma, o SMSF é a sub-região que tem suas estações pluviométricas presentes nos três grupos que foram formados.

Figura 16 – Mapa de distribuição espacial dos grupos semelhantes em relação a primavera. Eixo x são as longitudes (em graus) e no eixo y são as latitudes (em graus).



Fonte: Autor (2022).

Mais uma vez, as estações do ASF mostraram-se presentes apenas em um grupo (3), indicando a grande semelhança entre elas durante a primavera. Em contrapartida, no MSF e no SMSF surgiram os três grupos. A estação Belém de São Francisco, pertencente ao grupo 2, é a que não têm ligação direta com nenhuma das outras estações do grupo. Algo semelhante ocorre no grupo 3, no qual a estação Lagoa Grande não exibi ligação direta à outra estação, no entanto, enquadra-se melhor nesse grupo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversos trabalhos já foram realizados com a finalidade de classificar eventos extremos secos e chuvosos através do SPI, em diferentes lugares do Brasil, como: Paraíba (Macedo et al.,2010); Piauí (Guedes et al.,2012); Piracicaba-SP (Sangiolo, 2014); Espírito Santo (Uliana et al., 2015); Bahia (Sousa et al.,2016); Amazônia (Santos et al.,2017); São Paulo (Bonfim & Da Silva, 2018) e (Bonfim et al.,2021). Em todos esses estudos, os autores corroboram com a afirmativa de que o SPI é uma ferramenta valiosa na verificação de eventos extremos de chuvas e secas.

As sub-regiões mostram configurações de chuva distintas em virtude dos diferentes sistemas e fenômenos meteorológicos atuantes em cada uma delas. De acordo com Da Silva (2008), as razões de ordem física da variabilidade de chuva sobre essas regiões são complexas e estão relacionadas com a circulação atmosférica global.

Fazendo uso da análise de agrupamento, foram identificadas regiões com comportamento semelhante.

Em relação às médias anuais, formaram-se dois grandes grupos climáticos que se assemelham indiretamente entre si. Além das médias anuais, a análise de agrupamento foi utilizada para avaliar as semelhanças para as estações do ano, na qual cada estação apresentou uma organização de grupos distinta.

Para o verão, formaram-se quatro grupos, para o outono e o inverno, cinco grupos e para a primavera, surgiram três grupos. A distribuição espacial dos grupos mostrou que o ASF é a sub-região em que as estações pluviométricas exibem o comportamento mais semelhante entre si, no que diz respeito ao SPI, sobretudo nos meses de verão e inverno. Em relação à distribuição espacial dos valores de SPI, as sub-regiões BSF e ASF, mostraram-se com os menores valores em todas as estações do ano.

O conhecimento dos grupos homogêneos na BHSF pode contribuir de maneira essencial para o gerenciamento dos recursos hídricos, buscando controlar o uso e proteger esses recursos vitais. Os métodos hierárquicos de análise de clusters oferecem um meio de extrair maior compreensão de diferentes séries temporais, sendo um dos instrumentos mais adequados para definir regiões pluviometricamente homogêneas. A variabilidade da precipitação e a disponibilidade hídrica de cada região homogêneas podem impactar nas atividades socioeconômicas, agrícolas e industriais. As regiões hidrográficas que compõem a Bacia possuem características peculiares, justificando a diferença na distribuição espacial da precipitação entre essas regiões.

REFERÊNCIAS

ANA - Agência Nacional de Águas; MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Brasília. 2015. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos. Acesso em: 20 ago. 2020.

ANA - Agência Nacional de Águas. **São Francisco**. Disponível em: https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/sao-francisco/saiba-mais. Acesso em: 20 ago. 2020.

ALCÁNTARA, L. R. P.; BISERRA, J. L. A.; COSTA, L. F.; ALVES, A. T. A.; VILA NOVA, A. A.; SANTOS NETO, S. M.; COUTINHO, A. P.; ANTONINO, A. C. D. Pluviometria espaço-temporal da Bacia hidrográfica do Una. **Geociencias**, v. 39, n. 3, p. 803-815, 2020. Disponível em: https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/14266/11828. Acesso em: 12 nov. 2020.

ALVES, J. M. B. Aspectos climatológicos do nordeste brasileiro com ênfase a região semiárida: principais causas da variedade pluviométrica interanual. *In*: Simpósio sobre Captação de Água de Chuva no Semi-Árido Brasileiro, 1., Petrolina, 1997. **Resumos** [...] Petrolina: Associação Brasileira de Capitação e Manejo de Água de Chuva, 1997.

BONFIM, O. E. T.; DA SILVA, D. F.; KAYANO, M. T.; ROCHA, L. H. S. Análise dos Eventos Climáticos Extremos e de Suas Causas Climáticas para Redução de Riscos nas Bacias Hidrográficas Aguapeí e Peixe, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. SPE, p. 755-768, 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/vqQTJrVVkqvqfcZjTKGVqWv/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 15 out. 2021.

BROCCA, L.; MORAMARCO, T.; DORIGO, W.; WAGNER, W. Assimilation of satellite soil moisture data into Rainfall-runoff modelling for several catchments worldwide. *In:* International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). **Anais** [...]. 2013.

CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **A Bacia**. 2016. Disponível em: https://cbhsaofrancisco.org.br/a-bacia/. Acesso em: 26 jul. 2020.

COSTA, M. S.; LIMA, K. C.; ANDRADE, M. M.; GONÇALVES, W. A. Tendências observadas em extremos de precipitação sobre a região Semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V. 08, n. 05, p. 1321-1334, 2015. DOI 10.5935/1984-2295.20150071. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233598. Acesso em: 19 dez. 2020.

DA SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, ambientais, agroeconômicos e de seus efeitos sobre a Bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE)**. 2009. 209 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

FONSECA, E. R.; MODESTO, F. Á.; CARNEIRO, G. C. A.; LIMA, N. F. S.; MONTE-MOR, R. C. A. Conflitos pelo uso da água na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco – Estudos de caso no Estado da Bahia. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e823997929-e823997929, 2020. DOI https://doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7929. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/7929/7090. Acesso em: 14 dez. 2020.

GONG, X.; RICHMAN, M. R. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America East of the Rockies. **Journal of Climate**, v. 8, p. 897-924, 1995.

GUEDES, R. V. S.; MACEDO, M. J. H.; SOUSA, F. A. S. Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, São Paulo, v. 23, p. 55-65, 2012. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/332/281. Acesso em: 17 jan. 2022.

MASUDA, K., NAGAYA, K., MIYAHARA, H., MURAKI, Y., NAKAMURA, T. Cosmogenic Radiocarbon and the Solar Activity. **Journal of the Physical Society of Japan**, 78(Supl. A):1-6, 2009. DOI: http://dx.doi. org/10.1143/JPSJS.78SA.1. Disponível em: https://journals.jps.jp/doi/10.1143/JPSJS.78SA.1. Acesso em: 15 jan. 2021.

HAYES, M.; SVOBODA, M. D.; WIIHITE, D.; VANYARKHO, O. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. **Bulletin of the American meteorological society**, v. 80, n. 3, p. 429-438, 1999. DOI https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/80/3/15200477_1999_080_0429_mtduts_2_0_co_2.xml?tab_body=pdf. Acesso em: 15 jan. 2021.

LOUZADA, F. R. O. **Balanço hídrico climatológico com dados estimados pelo satélite Tropical Rainfall Measuring Mission para a bacia hidrográfica do Rio Doce**. 2016. Tese (Doutorado em produção vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2016.

MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; DE SOUSA, F. A. S.; DANTAS, F. R. C. Analysis of the standardized precipitation index for the Paraíba state, Brazil. **Ambiente e Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010.

MCKEE, T.; DOESKEN, N.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. *In*: CONFERENCE ON APPIED CLIMATOLOGY, Boston. **Anais** […]. Boston: [s.n.], 1993. p. 179–184. 1993.

MELO, J. A. O fenômeno El Niño e as secas no nordeste do Brasil. **Raízes: Revista De Ciências Sociais E Econômicas**, v. 20, p. 13-21, 1999. DOI https://doi.org/10.37370/raizes.1999.v.162. Disponível em: http://raizes.revistas.ufcg.edu.br/index.php/raizes/article/view/162/147. Acesso em: 25 jan. 2021.

MOURA, M. S. B.; SÁ, I. I. S.; DA SILVA, T. G. F.; GALVINCIO, J. D.; RIBEIRO, J. G.. Variação espacial da precipitação e temperatura do ar no Submédio São Francisco. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 14., 2006, Florianópolis. **Anais** [...]. Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006., 2006.

OLIVEIRA, P. T.; SILVA, C. M. S.; LIMA, K. C. Climatologia e análise de tendências de precipitação extrema em sub-regiões do Nordeste do Brasil. **Climatologia Teórica e Aplicada**, v. 130, n. 1, pág. 77-90, 2017.

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; GIOVANNETTONE, J.; KUMAR, T. V. L.; THAKUR, M. K.; BURITI, C. O.; UZCÁTEGUI-BRICEÑO, C. Drought Assessment in the São Francisco River Basin Using Satellite-Based and Ground-Based Indices. **Remote Sensing**, v. 13, n. 19, p. 3921, 2021.

PASSOS, J. B. M. C.; TEIXEIRA, D. B. S.; CAMPOS, J. A.; LIMA, R. P. C. L.; FILHO, E. I. F. F.; DA SILVA, D. D. Multivariate statistics for spatial and seasonal quality assessment of water in the Doce River basin, Southeastern Brazil**. Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 3, p. 1-16, 2021. DOI https://doi.org/10.1007/s10661-021-08918-1. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10661-021-08918-1. Acesso em: 15 ago. 2021.

PORTELA, M. M.; QUINTELA, A. C.; PAIS, A. R. Preliminary design of the storage capacity of reservoirs based on a flow regionalization parameter. *In*: **Int. Conf. on Water Observation and Information Systems for Decision Support**. 2006. p. 1-12.

RAJSEKHAR, D.; SINGH, V.; MISHRA, A. Multivariate drought index: An information theory based approach for integrated drought assessment. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 164-182, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.031. Acesso em: 20 set. 2021.

SANTOS, J. F.; PULIDO-CALVO, I.; PORTELA, M. M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal. **Water Resources Research**, v. 46, n. 3, 2010.

SANTOS, C. A. G.; NETO, R. M. B.; DA SILVA, R. M.; COSTA, S. G. F. Cluster analysis applied to spatiotemporal variability of monthly precipitation over Paraíba state using tropical rainfall measuring mission (TRMM) data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 637, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/rs11060637. Acesso em: 18 mar. 2021.

SOUSA, F. A. S.; MACEDO, M. J. H.; GUEDES, R. V. S.; DA SILVA, V. P. R. O Índice de Precipitação Padronizada (IPP) na identificação de extremos de chuvas e secas na bacia do rio Paraguaçu (BA). **Ambiência Guarapuava (PR)**, v. 12, n. 2, pág. 707-719, 2016.

UNAL, Y.; KINDAP, T.; KARACA, M. Redefining the climate zones of Turkey using cluster analysis. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 9, p. 1045–1055, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1002/joc.910. Acesso em: 18 fev. 2021