



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Análise estatística multivariada de variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Pajeú - PE

Jocimar Coutinho Rodrigues Junior¹, Daniela Maria Fernandes Tavares¹, Vanine Elane Menezes de Farias¹, Alexandre Carlos Araújo de Santana¹, Suzana Maria Gico Lima Montenegro², Leidjane Maria Maciel de Oliveira², Anderson Luiz Ribeiro de Paiva²

¹ Doutorandos em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550. (81) 2126-8200. jocimar.junior@ufpe.br (autor correspondente), daniela.fernandes@ufpe.br, vanine.menezes@ufpe.br, alexandre.sustentat@hotmail.com.

² Professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Av. da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550. (81) 2126-8200. anderson.paiva@ufpe.br, leidjane.oliveira@ufpe.br, suzana.montenegro@ufpe.br.

Artigo recebido em 02/06/2023 e aceito em 16/12/2023

RESUMO

O estudo de variáveis hidrológicas em bacias hidrográficas consiste em uma análise importante para o conhecimento da variabilidade pluviométrica e climática do local. Assim, o objetivo deste trabalho consiste em aplicar uma análise multivariada de agrupamentos na bacia hidrográfica do rio Pajeú, em Pernambuco, para constatar o comportamento espacial da precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial. Para isso, averiguou-se o comportamento dessas 3 variáveis hidrológicas, a fim de classificar as 80 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU) que compõem a bacia em questão, considerando uma série histórica de 51 anos, entre 1966 e 2016, que foi obtida a partir do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPer). Foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados e aplicada uma análise multivariada de agrupamento, a partir do método de Ward, para identificar os agrupamentos formados. Desse modo, foi permitido classificar as HRUs em grupos que possuem características mais similares, com menor variância de valores, englobando as variáveis em estudo. Para as variáveis de precipitação, foram obtidos 4 agrupamentos, para a evapotranspiração 5 agrupamentos e, para o escoamento superficial, 5 agrupamentos. Ao analisar a média anual dessas 3 variáveis em conjunto, foram obtidos 3 agrupamentos, revelando que não houve um padrão espacial específico nos grupos gerados, com a reunião das variáveis. Diante disso, com os dados hidrológicos adquiridos a partir do SUPer, possibilita-se estudar em longo prazo o comportamento de variáveis relevantes em bacias hidrográficas, indicando que essa ferramenta é bastante útil para monitoramento e planejamento de recursos hídricos em Pernambuco.

Palavras-chave: precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração.

Multivariate statistical analysis of hydrological variables in the Pajeú river basin - PE

ABSTRACT

The study of hydrological variables in watersheds constitutes an important analysis for the knowledge of the rainfall and climate variability of the location. Thus, the objective of this work is to apply multivariate cluster analysis to the Pajeú river watershed, in Pernambuco, to verify the spatial behavior of precipitation, evapotranspiration and runoff. To achieve this, the behavior of these 3 hydrological variables was examined to classify the 80 Hydrological Response Units (HRU) within the basin, considering a historical series of 51 years, from 1966 to 2016, which was obtained from the Hydrological Response Units System for Pernambuco (SUPer). The data underwent descriptive statistical analysis, followed by multivariate cluster analysis using Ward's method to identify the formed clusters. Thus, it was possible to classify the HRUs into groups that have more similar characteristics, exhibiting reduced variance in values for the variables under study. Four clusters were obtained for precipitation, five for evapotranspiration, and five for runoff variables. When analyzing the annual average of these 3 variables together, 3 clusters were obtained, revealing that there was no specific spatial pattern in the groups generated, with the gathering of these 3 variables. Therefore, with the hydrological data acquired from the SUPer, it is possible to study the long-term behavior of relevant variables in watersheds, indicating that this tool is highly useful for monitoring and planning water resources in Pernambuco.

Keywords: precipitation, runoff, evapotranspiration.

Introdução

A compreensão e entendimento de variáveis hidrológicas em bacias hidrográficas é de grande importância para a tomada de decisões, planejamento e gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, é possível identificar padrões temporais e espaciais que são cruciais no entendimento de toda a variabilidade de uma bacia, sendo possível avaliar desde a precipitação (ganho), evapotranspiração (perda), escoamento superficial e demais variáveis (Makarigakis e Jimenez-Cisneros, 2019).

O comportamento hídrico, bem como a sua disponibilidade, é uma temática de relevância em escala global e, esse conhecimento é imprescindível para o desenvolvimento urbano e industrial das nações. Para estudar a disponibilidade dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, do ponto de vista climático, variáveis como precipitação e evapotranspiração se destacam, podendo sofrer interferência expressiva em detrimento das alterações climáticas e antrópicas (Shamir et al., 2016; Jaramillo e Nazemi, 2018; Chen et al., 2019).

As modificações ocorrentes no ciclo hidrológico constituem uma discussão relevante na atualidade, sendo pauta para diversos estudos. O ciclo hidrológico consiste em um processo complexo e amplo, que é influenciado em suas características pelo clima local, características fisiográficas e atividades antrópicas nas bacias hidrográficas (Chokkavarapu e Mandla, 2019). Nesse sentido, as mudanças no ciclo hidrológico são ocasionadas em detrimento da variação nas entradas e saídas de seus componentes, como a precipitação, a evapotranspiração e o escoamento superficial, que ao longo do tempo e do espaço, sofrem variabilidade significativa em uma bacia hidrográfica.

Para estudos nesta perspectiva, um conjunto de dados hidrométricos e meteorológicos, contendo as referidas variáveis hidrológicas são essenciais para a realização de análises específicas (Zanandrea et al., 2021). Neste caso, para obtenção dos dados, faz-se necessário à coleta de informações espaciais e temporais, em bancos de dados de estações de monitoramento ou via sensoriamento remoto ou modelagem. Com uma série histórica contendo essas informações, adquire-se conhecimento significativo para o planejamento e o gerenciamento de recursos hídricos (Anandhi e Kannan, 2018).

A água é um dos recursos naturais mais essenciais para a manutenção da vida humana no

planeta, possuindo usos múltiplos que dependem da sua disponibilidade e qualidade. Em vista da possível variação das variáveis hidrológicas, a demanda hídrica no futuro poderá ter restrições para importantes usos, como produção agropecuária, industrial, serviços e até abastecimento humano (Anandhi et al., 2016; Lakshmi et al., 2018). Nessa perspectiva, a demanda de água para os diversos usos apresenta particularidades, que também influenciam relevantemente o estado natural das águas superficiais e subterrâneas.

A compreensão do sistema de recursos hídricos e do ciclo hidrológico, englobando os fatores que coloquem em risco ou modifiquem a disponibilidade hídrica, é a base para assegurar conhecimentos que auxiliem no gerenciamento sustentável. Dentre os muitos fatores que impactam no ciclo hidrológico, fatores como altitude e mudanças no uso e cobertura do solo, são os principais que exercem pressão nas bacias hidrográficas, influenciando a precipitação, a evapotranspiração, a produção de sedimentos e o escoamento superficial (Oliveira Serrão et al., 2020).

Nesse sentido, em Pernambuco, a bacia hidrográfica do rio Pajeú é uma das estudadas pelo Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), com alguns trabalhos acadêmicos sendo gerados pela equipe. O SUPER é um projeto que vem sendo desenvolvido em parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP) e a *Texas A&M University*, com o objetivo de auxiliar e dar suporte as decisões econômicas e políticas (SUPER, 2023). O SUPER disponibiliza dados diários e mensais de simulações hidrológicas e tem o modelo *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) como base para os resultados (Galvinctio, 2021).

Com o uso do SUPER, é possível obter dados das variáveis hidrológicas no foco deste estudo: precipitação (mm), evapotranspiração (mm) e escoamento superficial (mm). Esses dados viabilizaram realizar o estudo estatístico de Análise Multivariada, neste caso a Análise de Agrupamentos (AA). Sabendo disso, a AA consiste em determinar o nível de similaridades ou dissimilaridade entre indivíduos de um determinado grupo de variáveis, através da função de agrupamento, transformando um grupo

heterogêneo em grupos distintos com similaridades acentuadas (Souza et al., 2012). Desse modo, pode-se comprovar ou não hipóteses de que sub-bacias ou localidades da bacia hidrográfica possuem similaridades hidrológicas entre si e quais fatores ambientais e climáticos podem intervir nisso, espacialmente e de maneira temporal.

Perante o exposto, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento espacial das variáveis hidrológicas na bacia hidrográfica do rio Pajeú, através da Análise de Agrupamentos aplicada à precipitação, evapotranspiração real e escoamento superficial, entre os anos de 1966 e 2016, envolvendo as 80 Unidades de Resposta Hidrológica (HRU, sigla do inglês Hydrological Response Units) que compõem a referida bacia.

Material e métodos

Área em estudo

A área de estudo consiste na bacia hidrográfica do rio Pajeú, situada no Sertão do estado de Pernambuco, na região Semiárida do

Nordeste do Brasil. A bacia é classificada como estadual, pertencendo apenas ao estado de Pernambuco, e localizada entre as coordenadas UTM de 9.195.661,57 e 9.012.487,37 m de latitude sul e 722.656,13 m e 504.122,52 m de longitude a oeste de Greenwich. A referida bacia engloba as microrregiões do Pajeú, do Sertão do Moxotó, do Salgueiro e de Itaparica (Pernambuco, 2006).

O rio Pajeú nasce na Serra do Balanço, município de Brejinho, a uma altitude de 800 m e percorre uma distância de 353 km até desaguar no lago Itaparica, formado pela barragem no rio São Francisco (França et al., 2019). Sendo assim, a bacia hidrográfica do rio Pajeú é caracterizada como uma sub-bacia do rio São Francisco e considerada uma das principais bacias hidrográficas do Nordeste. Sua área de drenagem corresponde a maior bacia do Estado de Pernambuco (Figura 1), possuindo uma área de 16.686 km², representando 17% da área do estado e situa-se na zona fisiográfica do Sertão de Pernambuco (Diaz et al., 2018).

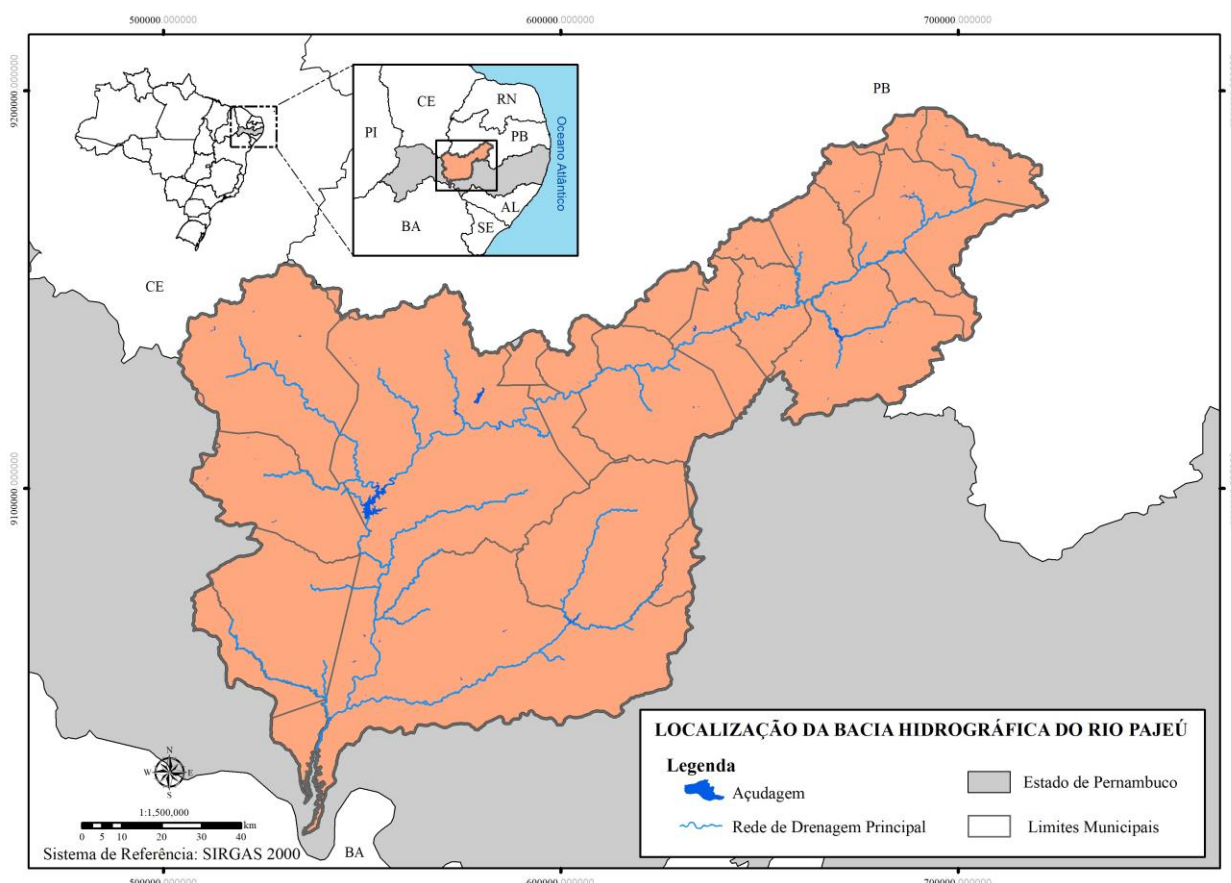


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio Pajeú, com divisão dos municípios dentro da bacia.

Em relação a classificação climática de Köppen, a bacia é caracterizada como clima

semiárido com período chuvoso entre o verão e o outono e período seco entre os meses de inverno

(Pernambuco, 2022). A temperatura média anual na bacia varia entre 27°C a 34 °C e seus totais pluviométricos anuais oscilam, geralmente, entre 400 e 1200 mm (Pernambuco, 2022).

Coleta de dados e análise estatística multivariada

Foram selecionados dados das variáveis hidrológicas precipitação (mm), evapotranspiração (mm) e escoamento superficial ou chuva efetiva (mm), para a bacia do rio Pajeú. Os referidos dados foram coletados no Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco (SUPER), que consiste em um sistema interativo de modelagem hidrológica, sedimentos, qualidade de água e outras variáveis, que utiliza como mecanismo de modelagem a Ferramenta de Avaliação do Solo e da Água – *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)* (Galvinctio, 2021).

Em geral, o SUPER consiste em um projeto cuja finalidade é a criação de uma plataforma, que visa contribuir com as decisões políticas, econômicas e sociais do estado de Pernambuco. Com isso, é possível a realização de diversos estudos englobando o gerenciamento de recursos hídricos, frente aos dados hidrológicos, climáticos e de qualidade de água (SUPER, 2023).

Segundo Araújo (2019), o SUPER eleva de forma significativa a utilidade do SWAT, para simular os efeitos das práticas de gestão em bacias hidrográficas, com base em uma ampla variedade de culturas, solos, tipos de vegetação natural, usos da terra e cenários de mudanças climáticas para hidrologia e parâmetros de qualidade de água. Para isso, são fornecidas séries históricas de variáveis diversas como sedimentos, vazão, escoamento superficial, parâmetros de qualidade e nutrientes, entre outros.

Sendo assim, a partir dos dados que estão disponíveis na interface do SUPER, há 80 Unidades

de Resposta Hidrológica (HRU) na bacia hidrográfica do Pajeú. Com isso, foram coletados dados de evapotranspiração, escoamento superficial e precipitação dessas HRUs, com uma série histórica mensal entre os anos de 1966-2016, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Dados coletados de 80 HRUs no SUPER

Variável (mm)	Série histórica	Total (anos)
Precipitação	1966 – 2016	51
Evapotranspiração	1966 – 2016	51
Escoamento superficial ou chuva efetiva	1966 – 2016	51

A partir da coleta de dados mensais da série histórica de 51 anos, calculou-se os totais anuais das variáveis precipitação (mm), evapotranspiração (mm) e escoamento superficial (mm), para cada ano da série. Estas variáveis foram escolhidas em razão de representar 3 importantes etapas do ciclo hidrológico, contribuindo para entender o comportamento hídrico da área. Além disso, foram realizadas análises de estatística descritiva para cada variável em estudo, a fim de verificar a dispersão dos dados gerados, sendo: média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação e amplitude da amostra.

Para o estudo do comportamento das variáveis hidrológicas, foi utilizada a técnica de Análise de Agrupamento, que consiste em um método que objetiva separar os objetos analisados em grupos, com base nas características (variáveis) que eles possuem. Neste caso, buscou-se estudar os agrupamentos gerados pelas 80 HRUs da bacia do Pajeú (Figura 2), em relação as variáveis hidrológicas selecionadas, com a série anual gerada de 50 anos.

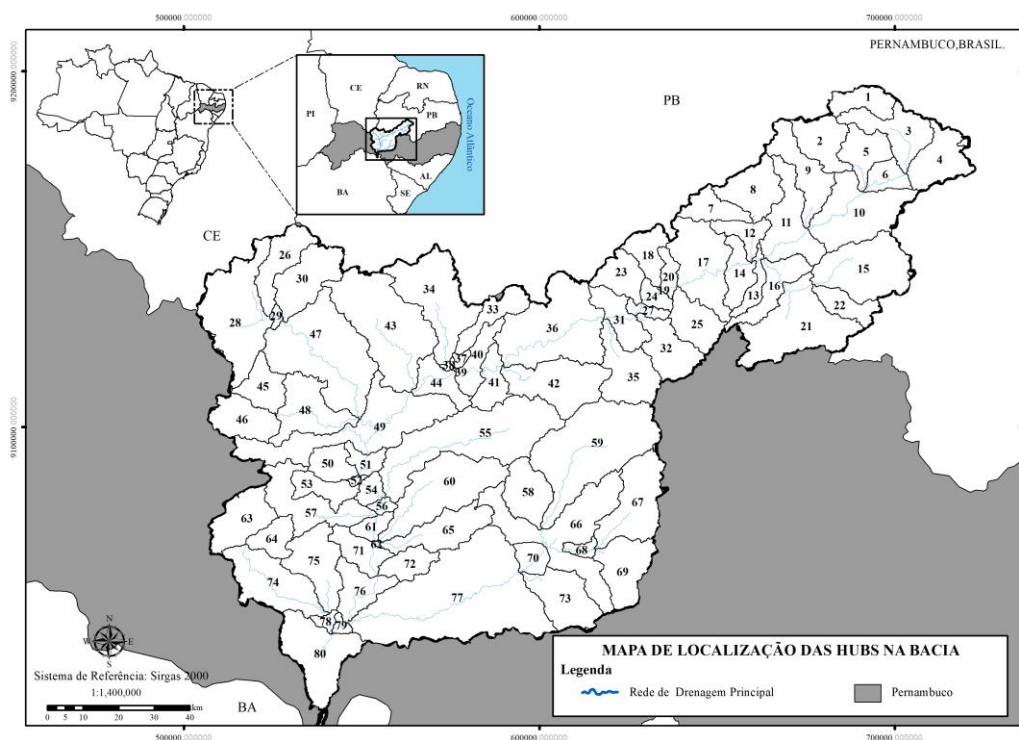


Figura 2. Localização das 80 HRUs na bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Ao analisar todo um conjunto de relações interdependentes entre si, essa técnica estatística permite formular grupos com características homogêneas internas de análise que se manifestam de forma diferente entre cada objeto, sendo assim, os grupos são definidos como heterogêneos com comportamentos diferentes entre si (Santos e Souza, 2018; Yuan e Yang, 2019). De acordo com Souza et al. (2012), a análise de agrupamento tem como princípio básico uma matriz de “n” amostras (objetos). Desse modo, dispõe-se a agrupar automaticamente os “n” objetos da base de dados em “k” clusters, fazendo uso apenas dos dados das variáveis de cada caso.

Para determinar a suposta semelhança ou a diferença entre os elementos característicos, é usada uma função de distância, que neste caso foi selecionada a distância euclidiana, detalhada na Equação 1, que corresponde à similaridade entre os dados. Sendo assim, foi aplicado o método Hierárquico da análise de Agrupamento que, de forma geral, conforme é apontado por Bem et al. (2015), almeja-se como principal atributo verificar mais de um tipo de partição e aproximação dos dados entre os objetos, gerando diversos agrupamentos possíveis.

$$SSl = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^p (Xl, k, j - \bar{X}l, j)^2, \quad \bar{X}l, j = \frac{1}{nl} \sum_{k=1}^{nl} (Xl, k, j) \quad (2)$$

$$D(X_i, X_k) = [(X_i - X_k)'(X_i - X_k)]^{1/2} = [\sum (X_{il} - X_{ik})^2]^{1/2} \quad (1)$$

No que tange os métodos hierárquicos, podem ser aplicadas técnicas estatísticas para elaboração do desenho dos agrupamentos. Nesse sentido, há o método de Ward, que foi utilizado neste estudo. Esse método, que também é denominado de método da Mínima Variância, consiste em agrupar os dados com base na medida de distância entre dois *clusters*, considerando a soma das distâncias ao quadrado entre os dois referidos *clusters* (Ward Jr, 1963).

Conforme é apontado por Kassambara (2017), o método de Ward é definido como um procedimento de agrupamento hierárquico no qual a técnica usada para formar agrupamentos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos feita sobre todas as variáveis (variância), conforme mostra as equações 2 a 5 e a Figura 3. Para isso, foi utilizado o *Past 4.08* (*PAleontological STatistics*), que consiste em um *software* desenvolvido pela Universidade de Oslo, Noruega, para execução de análises estatísticas (Hammer et al., 2001).

$$SS_{l,i} = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^p (X_{l,k,j} - \bar{X}_j)^2 + \sum_{k=1}^{n_i} \sum_{j=1}^p (X_{i,k,j} - \bar{X}_j)^2, \quad (3)$$

$$\bar{X}_j = \frac{1}{n_l + n_i} \left(\sum_{k=1}^{n_l} X_{l,k,j} + \sum_{k=1}^{n_i} X_{i,k,j} \right)$$

$$d(C_l, C_i) = SS_{l,i} - (SS_l + SS_i) \quad (4)$$

$$d(C_l, C_i) = \frac{n_l * n_i}{n_l + n_i} \sum_{j=1}^p (\bar{X}_{l,j} - \bar{X}_{i,j})^2 \quad (5)$$

Onde: $X_{l,k,j}$ = valor para a variável p na observação j pertencente ao cluster l ; SS_l = soma dos erros quadrados dentro do cluster l ; SS_i = soma total dos erros quadrados (agrupando os clusters l e i).

Neste caso, foram realizadas análise de agrupamentos para os dados anuais de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, envolvendo as 80 HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú, para a série histórica em estudo. Ademais, também foi realizada uma análise de agrupamento em conjuntos com as médias anuais das variáveis hidrológicas em questão.

Para uma melhor visualização dos agrupamentos, foi utilizado o dendrograma por meio dos níveis das distâncias dos referidos grupos desenvolvidos. Assim, pode-se analisar os grupos de HRUs formados e suas relações, envolvendo as variáveis hidrológicas em estudo, na bacia do rio Pajeú. O número de grupos e a quantidade de

HRUs expressas em cada um desses foi determinado de maneira subjetiva, por intermédio de corte transversal no dendrograma, considerando as características distintas contidas observadas.

Diante disso, com a aplicação da referida análise de agrupamentos, que fornece os referidos agrupamentos com bases nas variáveis hidrológicas de cada HRU, foi possível verificar as relações entre essas. Portanto, foi permitido apontar quais as regiões ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$) que possuem dados anuais de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial com menor variância entre si.

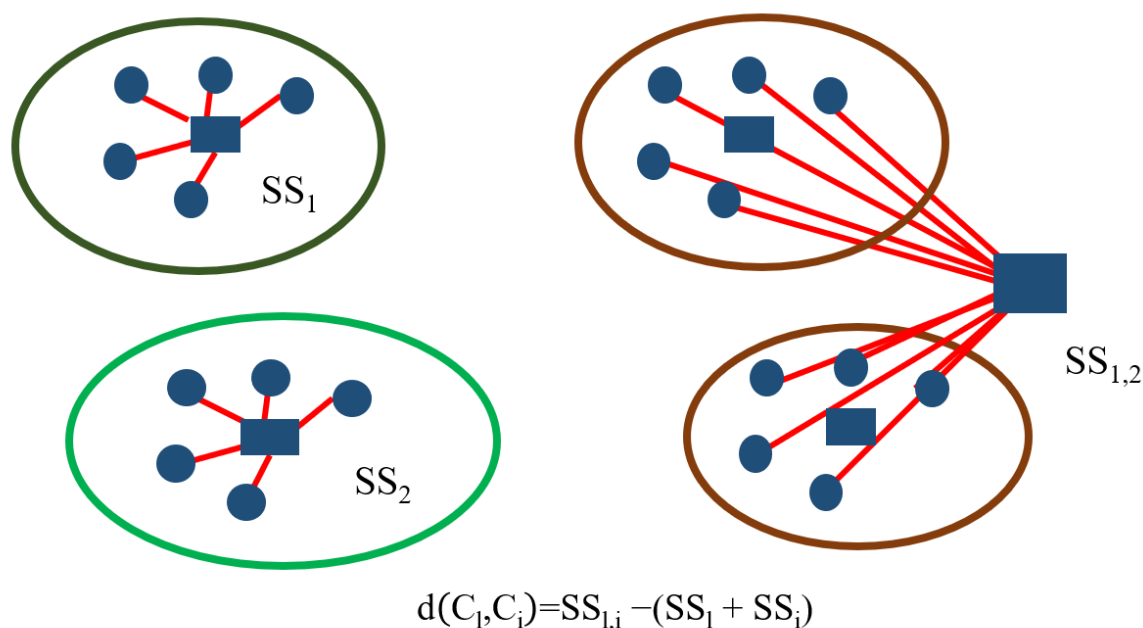


Figura 3. Exemplo de esquema do método Ward.

Fonte: Os Autores (2023), baseado na metodologia de Ward Jr (1963).

Resultados e discussão

Os dados das variáveis hidrológicas estão dispostos na Tabela 2, destacando as medidas de estatística descritiva, com base nos dados totais

anuais de precipitação, escoamento e evapotranspiração. Como é possível visualizar, para a precipitação anual, entre 1966 e 2016, para

as 80 HRUs da área em estudo, apontou uma média de 711,023 mm. Um valor mínimo de média anual de 357,402 mm foi obtido na HRU de número 80, já para valor máximo, foi obtido 1.126,238 mm na HRU de número 26. O desvio padrão foi 180,583 e, coeficiente de variação 0,254.

Em relação a evapotranspiração, se obteve média anual de 455,333 mm, valor mínimo de 215,398 mm, que corresponde a HRU de número 80, valor máximo 1.420,543 mm, que corresponde a HRU de número 19. O desvio padrão foi 160,740

e, coeficiente de variação 0.353. Para o escoamento superficial, a média anual obtida foi 148,844 mm, sendo que o total da média de precipitação é 1.126,238 mm, assim, cerca de 13,22% dessa precipitação se transforma em escoamento superficial. O valor mínimo corresponde a 8,419 mm, referente a HRU de número 64, e o valor máximo corresponde a 326,657 mm, referente a HRU de número 36. O desvio padrão foi 64,185 e, coeficiente de variação 0,431.

Tabela 2. Resumo descrito das variáveis hidrológicas, das 80 HRUs na bacia do rio Pajeú, com base nos totais anuais, do histórico de 1966 a 2016.

Precipitação (mm)		Evapotranspiração (mm)		Escoamento superficial (mm)	
Mínimo	357,402	Mínimo	215,398	Mínimo	8,419
Média	711,023	Média	455,333	Média	148,884
Mediana	729,352	Mediana	433,726	Mediana	160,992
Máximo	1.126,238	Máximo	1.420,543	Máximo	326,657
Desvio Padrão	180,583	Desvio Padrão	160,740	Desvio Padrão	64,185
Variância	32.610,369	Variância	2.5837,285	Variância	4.119,669
Coeficiente de Variação	0,254	Coeficiente de Variação	0,353	Coeficiente de Variação	0,431
Amplitude	768,836	Amplitude	1.205,145	Amplitude	318,238

A Figura 4 mostra os gráficos dos dados anuais de precipitação (a), evapotranspiração (b) e escoamento superficial (c). É possível visualizar que a mediana de precipitação (Figura 5a) corresponde a 729,352 mm e, de maneira geral, percebe-se que os dados estão uniformemente bem distribuídos, sem *outliers*, considerando que a amplitude de precipitação anual é 768,836 mm.

No que tange aos dados anuais de evapotranspiração (mm), a Figura 4b mostra o gráfico Boxplot dos mesmos. Nota-se que a mediana corresponde a 433,726 mm. Nesse caso, percebe-se que os dados não estão uniformemente bem distribuídos, havendo valores altos, como um *outlier*, que se refere ao valor de 1.420,543 mm, referente a HRU de número 19. A amplitude de evapotranspiração anual, dentre as 80 HRUs da

bacia hidrográfica do rio Pajeú é de 1.205,145 mm, representando uma grande amplitude em razão de conter o referido *outlier*.

Acerca dos dados anuais de escoamento superficial ou precipitação efetiva (mm), a Figura 4c dispõe que a mediana corresponde a 160,992 mm, mostrando também que para essa variável hidrológica, os dados não estão uniformemente bem distribuídos. A amplitude do referido gráfico apresenta 318,238 mm, não havendo grande escoamento superficial em grande parte da bacia do rio Pajeú. Esse fato também pode ser comprovado ao realizar a comparação com os valores de evapotranspiração, sendo que neste caso, os valores da média e mediana de escoamento superficial são menores.

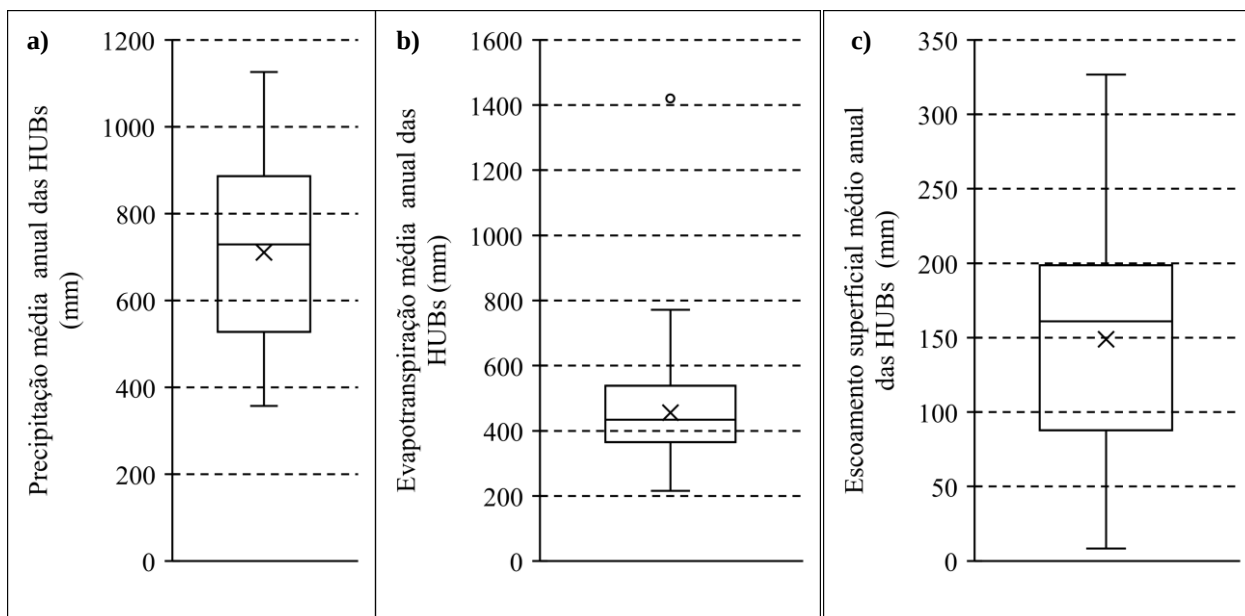


Figura 4. Boxplot dos dados médios anuais de precipitação (mm), evapotranspiração (mm) e escoamento superficial (mm) das 80 HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

No que se refere a análise de agrupamentos, a Figura 5 revela o dendrograma que dispõe os agrupamentos que correspondem aos dados de precipitação (mm). Visualmente pode-se apontar a existência de 4 grupos, que possuem valores de precipitação de cada HRUs, considerando a série histórica adotada, menor variância entre si, ou seja, são estatisticamente, mais similares. Com base nisso, foram definidas as regiões (agrupamentos) que apresentaram dados anuais de precipitação mais similares entre si. A quantidade de grupos, que corresponde a 4, bem como as HRUs consideradas em cada, estão apresentadas na Tabela 3.

Os grupos R2, R3 e R4, que possuem maiores precipitações médias, estão localizadas em áreas mais montanhosas, mais próximos de municípios com maiores altitudes, possivelmente havendo chuvas orográficas em maior quantidade nessas localidades. O grupo R1, abrange as HRUs que estão localizadas, em parte, próximo ao exutório da bacia, onde as cotas são menores. O grupo R4 corresponde ao grupo com maior média anual de precipitação (898,73 mm), já o grupo R1 refere-se à média mais baixa (526,90 mm).

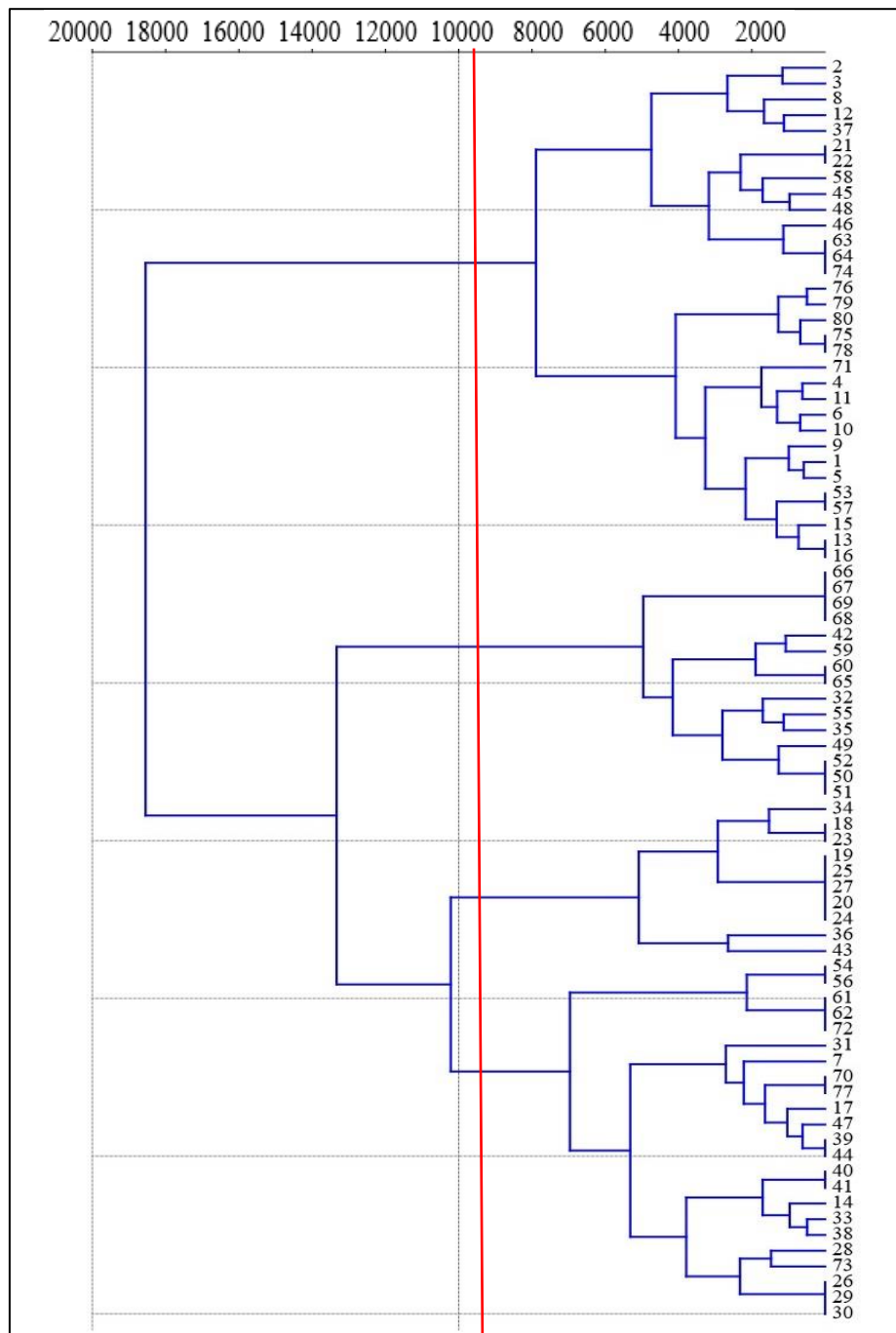


Figura 5. Agrupamentos da precipitação anual (mm) da série histórica entre 1966-2016 para as HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Tabela 3. Regiões (agrupamentos) formados para precipitação anual (mm)

Região	HRUs da respectiva região																Média	Mediana	Desvio Padrão
R1	2	3	8	12	37	21	22	58	45	48	46	63	64	74	76	79	526,90	512,63	87,06
	80	75	78	71	4	11	6	10	9	1	5	53	57	15	13	16			
R2	66	67	69	68	42	59	60	65	32	55	35	49	52	50	51		729,68	727,46	54,19
R3	34	18	23	19	25	27	20	24	36	43							840,52	784,26	125,19
R4	54	56	61	62	72	31	7	70	77	17	47	39	44	40	41	14	898,73	915,70	64,28
	33	38	28	73	26	29	30												

Em relação aos dados de evapotranspiração (mm), a Figura 6 expõe o dendrograma dos agrupamentos que correspondem aos referidos dados. De maneira subjetiva, averiguando o comportamento do referido dendrograma, pode-se apontar a existência de 4 grupos, que possuem valores de evapotranspiração (mm) com uma série histórica mais similar, com menor variância entre si. Sendo assim, foram definidas as regiões (agrupamentos) que apresentaram dados anuais de evapotranspiração, estatisticamente mais similares entre si. A quantidade de grupos, que corresponde a 4, bem como as HRUs consideradas em cada, está exposta na Tabela 4.

O grupo R2, que é representado apenas pela HRU de número 19, que consiste no valor de evapotranspiração mais discrepante da série de dados analisadas, está localizada mais ao norte da bacia do Pajeú, em uma área bastante pequena, onde grande parte da água precipitada tende a sofrer um alto processo de evapotranspiração, em que a média anual consiste em 1.420,5 mm. Em contrapartida, o grupo R1, que envolve as HRUs que estão situadas, em parte, próximas ao exutório da bacia, possuem menores valores médios de evapotranspiração, sendo a média o valor de 284,1 mm.

Para os dados de escoamento superficial ou chuva efetiva (mm), a Figura 7 apresenta o dendrograma dos agrupamentos que correspondem aos referidos dados. De forma visual, averiguando o comportamento do referido dendrograma, é possível perceber a formação a existência de 5 grupos, que dispõem dos valores de escoamento superficial (mm), com uma série histórica mais similar, possuindo menor variância entre si.

Desse modo, foram definidas as regiões (agrupamentos) que apresentaram dados anuais de escoamento superficial, mais equivalentes entre si. A quantidade de grupos, que corresponde a 5, bem como as HRUs consideradas em cada, está descrita na Tabela 5. O grupo R1, possui menor valor médios de escoamento superficial, sendo 63,84 mm, localizado, em maior parte, no extremo nordeste e noroeste da bacia do Pajeú, próximos de áreas montanhosas, onde a produção de escoamento superficial tende a ser mais rápida. Ademais, os outros grupos estão mais espalhados pela bacia, apresentando valores que representando

mais do que o dobro do valor anual médio de escoamento superficial do grupo R1.

É válido ressaltar que, em quase toda a série estudada, os valores de escoamento superficial são menores do que os valores de evapotranspiração. Logo, se pode destacar que a maior parte da precipitação não é transformada em precipitação efetiva (escoamento superficial), sendo transformada, em maior escala, na evapotranspiração da área em estudo.

Esse fato possivelmente está relacionado com os índices de temperatura da área, que está localizada no sertão pernambucano. De acordo com Alburquerque et al. (2020), em estudo na bacia hidrográfica do rio Itapicuru, no estado da Bahia, as regiões com maiores valores de evapotranspiração são também caracterizadas por elevadas temperaturas e baixa umidade relativa. Assim, em locais de ambiente semiárido, os valores altos de evapotranspiração são comuns.

Um outro fator que pode contribuir para um baixo escoamento superficial consiste na característica fisiográfica da bacia hidrográfica (Carvalho et al., 2020). Em decorrência da diversidade geológica, formação rochosa e presença de relevos acidentados, a facilidade de escoamento superficial é influenciada e, pode gerar maiores ou menores velocidades, dependendo do perfil de altitude da área.

Segundo Freire-Silva et al. (2022), no município de Serra Talhada, inserido na bacia hidrográfica do rio Pajeú, conforme estudo também com dados do SUPeR, foi constatado variabilidade na evapotranspiração em decorrência da altitude. No ano de 2015, por exemplo, os autores observaram que ocorreram maiores valores de evapotranspiração em reservatórios e em áreas mais elevadas, em contrapartida a locais com altitudes mais baixas.

Neste caso, tanto a menor precipitação, quanto a menor evapotranspiração anual, dentre a série histórica analisada, ocorre na HRU de número 80, já a máxima precipitação ocorre na subbacia HRU de número 26 e, a maior evapotranspiração de HRU de número 19. No que se refere aos valores de escoamento superficial anual, o máximo escoamento, considerando a série histórica, ocorre na HRU de número 36 e o menor, na HRU de número 64.

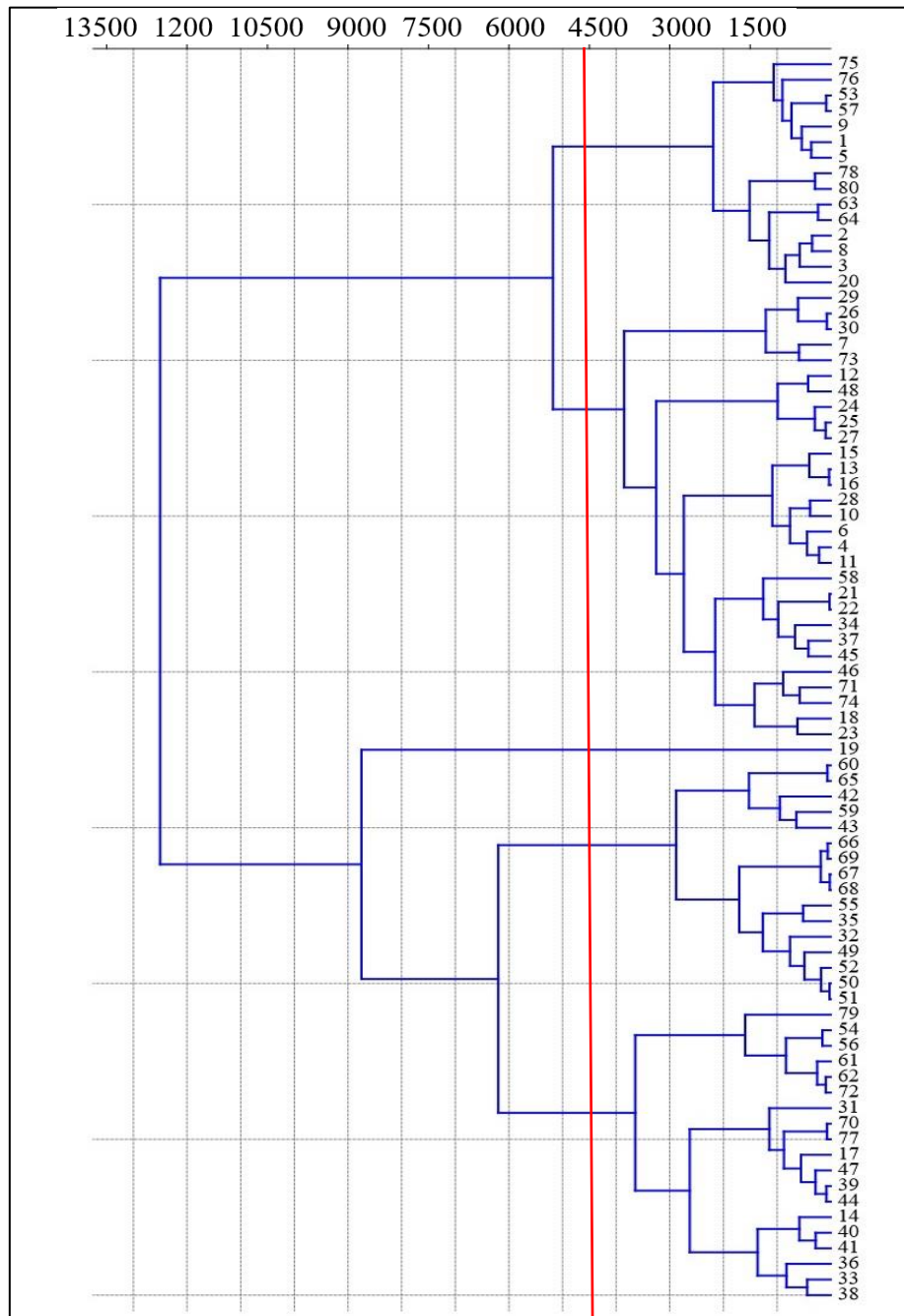


Figura 6. Agrupamentos da evapotranspiração anual (mm) da série histórica entre 1966-2016 para as HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Tabela 4. Regiões (agrupamentos) formados para evapotranspiração anual (mm) da série histórica entre 1966-2016 para as HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Reg.	HRUs da respectiva região	Média	Mediana	Desvio padrão
R1	75 76 53 57 9 1 5 78 80 63 64 2 8 3 20	284,1	290,0	43,2
R2	29 26 30 7 73 12 48 24 25 27 15 13 16 28 10 6	397,7	394,0	39,5
	4 11 58 21 22 34 37 45 46 71 74 18 23			
R3	19	1.420,5	1.420,5	-
R4	60 65 42 59 43 66 69 67 68 55 35 32 49 52 50 51	478,3	481,1	28,1
R5	79 54 56 61 62 72 31 70 77 17 47 39 44 14 40 41	608,3	602,9	46,4
	36 33 38			

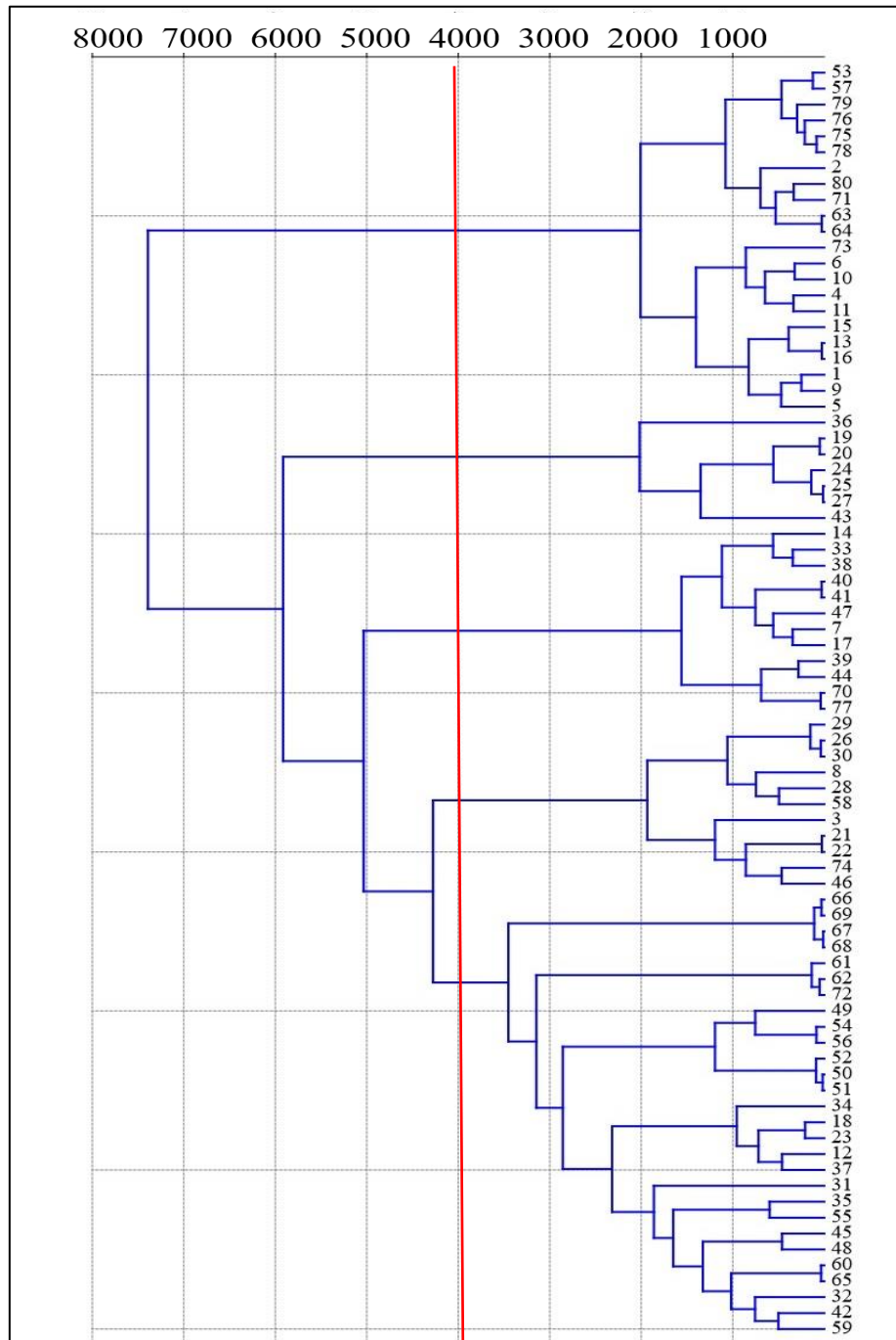


Figura 7. Agrupamentos de escoamento superficial anual (mm) da série histórica entre 1966-2016 para as HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Tabela 5. Regiões (agrupamentos) formados para escoamento superficial ou chuva efetiva anual (mm) da série histórica entre 1966-2016 para as HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Reg.	HRUs da respectiva região																Média	Mediana	Desvio Padrão
R1	53	57	79	76	75	78	2	80	71	63	64	73	6	10	4	11	63,84	65,26	25,34
	15	13	16	1	9	5													
R2	36	19	20	24	25	27	43										216,21	215,19	54,28
R3	14	33	38	40	41	47	7	17	39	44	70	77					202,02	200,40	29,62
R4	29	26	30	8	28	58	3	21	22	74	46						127,94	130,68	20,89
R5	66	69	67	68	61	62	72	49	54	56	52	50	51	34	18	23	184,33	183,60	24,00
	12	37	31	35	55	45	48	60	65	32	42	59							

Acerca dos dados médios anuais das 80 HRUs, sobre as 3 variáveis hidrológicas estudadas, a Figura 8 revela o dendrograma dos agrupamentos que correspondem a esses dados. Verificando o comportamento do referido dendrograma, é possível perceber a formação de 3 grupos, que dispõe valores de escoamento superficial (mm), precipitação (mm) e evapotranspiração (mm), com uma série histórica anual mais similar, possuindo menor variância entre si.

Foram definidas as regiões (agrupamentos) que apresentaram dados médios anuais para as variáveis em estudo, mais equivalentes entre si. A quantidade de grupos, que corresponde a 3, bem como as HRUs consideradas em cada, estão apresentadas na Tabela 6. Como pode ser notado, os 3 grupos que possuem comportamentos médios anuais de escoamento superficial, precipitação e evapotranspiração similares, em conjunto, ocorrem da seguinte forma: cerca de 29 HRUs no R1, 31 HRUs no R2 e, 20 HRUs no R3.

Assim, é válido salientar que o grupo R1 engloba em maior parte as localidades próximas à nascente da bacia do rio Pajeú, no nordeste da área. Porém, também envolve algumas HRUs próximas ao exutório, mostrando que a correlação das variáveis hidrológicas estudadas possui comportamento parecido em algumas áreas do início (nascente) e fim (exutório) da bacia hidrográfica em questão. Os grupos R2 e R3, também possuem HRUs espalhadas pela área em estudo, mostrando regimes hidrológicos que podem ser semelhantes ao longo de toda a bacia.

Deste modo, não há uma correlação espacial específica entre as ocorrências em conjunto de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Pajeú. O comportamento das variáveis hidrológicas em conjunto, não respeita um padrão espacial específico na série histórica em estudo.

De acordo com Correa e Rocha (2023), em estudo de variáveis hidrológicas nos canais fluviais da zona de amortecimento do parque estadual

Aguapeí, oeste do estado de São Paulo, no que se refere às relações dessas variáveis, foi apresentada ligação direta com fatores climatológicos, em que os acumulados de precipitação e vazão são mais influenciados pelos sistemas meteorológicos atuantes no período de verão. Já em pesquisa de Souza e Nascimento (2020), no Recôncavo Sul da Bahia, averiguou-se que a variação apenas da precipitação para os municípios da área, quando analisada de forma isolada, se dava em decorrência da possível diferença de altitude. Com isso, a variação hidrológica que pode ocorrer nas proximidades de uma mesma localidade, possivelmente é ocasionada em decorrência de diversos fatores, principalmente fisiográficos e climáticos.

Em trabalho realizado por Luz e Galvêncio (2022), com dados do SUPER na bacia hidrográfica do riacho Milagres, em Pernambuco, foram obtidos resultados que apontam uma variação espacial nas condições hídricas, analisadas isoladamente. A variabilidade hidrológica nessa área possivelmente ocorre em razão das características de uso e ocupação do solo, que influenciam nas características de microclima e na temperatura do local. Esse fato possivelmente também ocorre no Pajeú, em que a configuração de ocupação da bacia influencia na evapotranspiração e no escoamento superficial. Assim, as ações antrópicas possivelmente afetam de forma significativa o ciclo hidrológico, apontando que o uso e ocupação do solo e os fatores de altitude, influenciam no regime pluviométrico.

Neste caso, para o presente trabalho realizado na bacia do rio Pajeú, no que concerne à evapotranspiração, um comportamento brevemente similar também ocorreu em larga escala. É nítido que em HRUs próximas ao norte da bacia hidrográfica, em direção à sua nascente, o agrupamento formado com maiores valores de evapotranspiração é composto em grande parte por estas áreas, como a HRU 19, por exemplo, que dispõe a maior média anual de evapotranspiração.

Portanto, conforme foi apontado nas análises de agrupamentos, não houve uma relação espacial padrão entre a precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, quando analisados os dados anuais médios destas variáveis hidrológicas em conjunto. Assim, outros

fatores climáticos e ambientais possivelmente apresentam influência no comportamento hidrológico nas 80 HRUs na bacia hidrográfica do rio Pajeú.

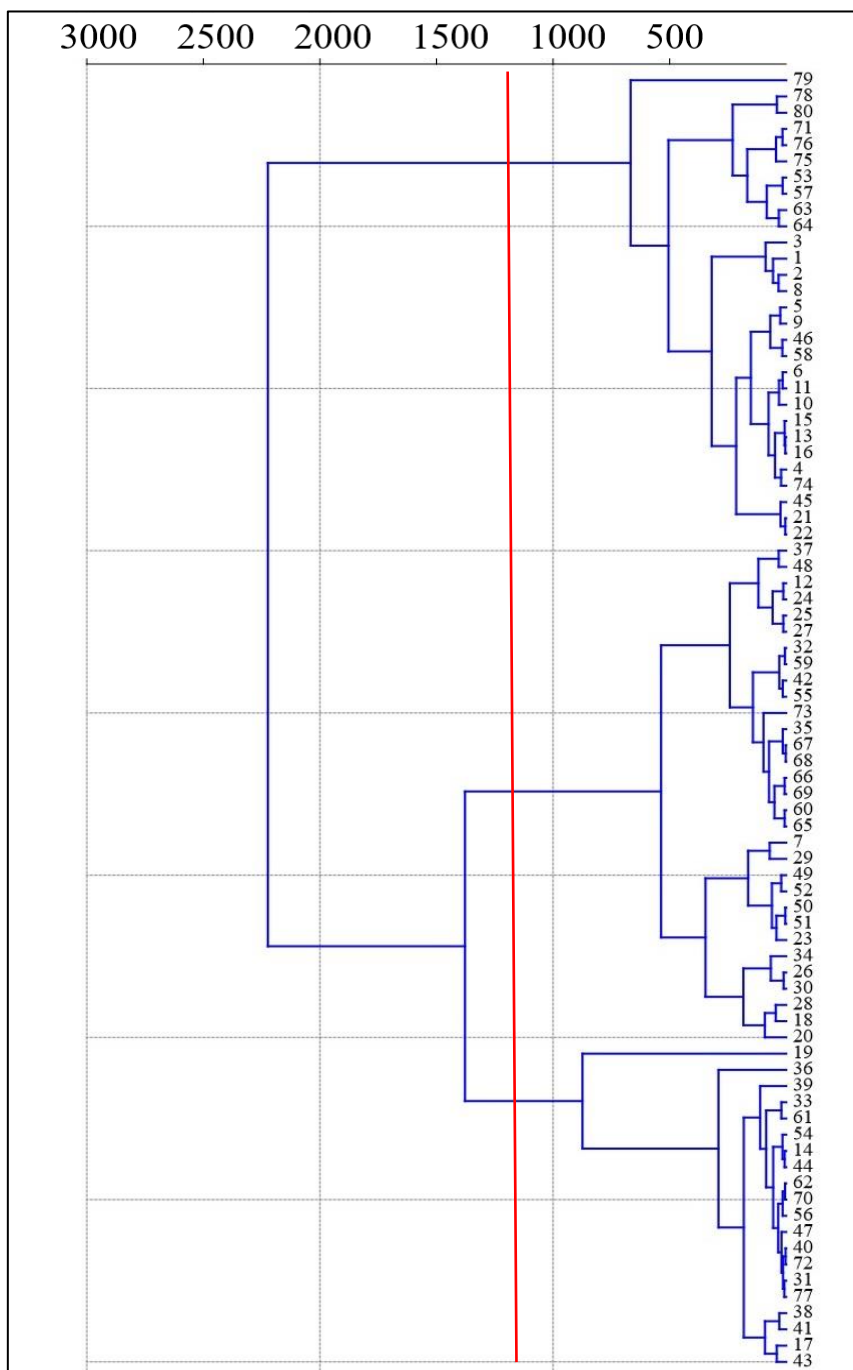


Figura 8. Agrupamentos das variáveis médias anuais da série histórica entre 1966-2016 para as HRUs da bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Tabela 6. Regiões (agrupamentos) formados para dados médios anuais das 3 variáveis hidrológicas (precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial, em mm).

Região	HRUs da respectiva região															
R1	79	78	80	71	76	75	53	57	63	64	3	1	2	8	5	9
	45	58	6	11	10	15	13	16	4	74	45	21	22			
R2	37	48	12	24	25	27	32	59	42	55	73	35	67	68	66	69
	60	65	7	29	49	52	50	51	23	34	26	30	28	18	20	
R3	19	36	39	33	61	54	14	44	62	70	56	47	40	72	31	77
	38	41	17	43												

Conclusões

O conjunto de dados das variáveis hidrológicas da bacia hidrográfica do rio Pajeú – PE indicou uma área com grande variabilidade de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial na série histórica adotada. Dessa forma, houve Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) com precipitações médias anuais baixas, sendo o mínimo 357,402 mm e, o máximo 1.126,238 mm, demonstrando a relevante variabilidade espacial no regime de chuvas da área, o que impacta também na evapotranspiração e escoamento superficial da bacia em estudo.

A partir da análise estatística multivariada, foi possível classificar as Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs) com maiores semelhanças na bacia hidrográfica do rio Pajeú, em relação as variáveis hidrológicas de precipitação, evapotranspiração e escoamento superficial. Com isso, foram indicados 4 agrupamentos para a análise de precipitação, 4 agrupamentos para evapotranspiração e 5 agrupamentos para escoamento superficial. Ao considerar os valores médios anuais dessas 3 variáveis hidrológicas em conjunto, verificou-se que não houve na formação de agrupamentos um comportamento espacial padronizado, sendo constituídos 3 grupos de HRUs que apresentam unidades espalhadas espacialmente pela bacia hidrográfica, sem demonstrar um padrão.

Portanto, é notável a eficiência da plataforma do SUPeR, englobando a disponibilidade dos dados com grandes séries históricas para as bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. Diante disso, os estudos desenvolvidos possuem grande utilidade para auxílio em políticas públicas e programas de gestão do uso de recursos hídricos e ambientais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e

Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pela concessão de bolsas de Doutorado dos autores.

Referências

- Albuquerque, Y.R.T., Almeida, A.Q., Arcieri, M.S., Mendes, L.A., 2020. Definição de regiões hidrologicamente homogêneas a partir de técnicas de estatística multivariada na bacia hidrográfica do rio Itapicuru - BA com base em dados físico-climáticos e de sensoriamento remoto. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v. 21, n. 78, p. 290–302, 2020. DOI: 10.14393/RCG217853077.
- Anandhi, A., Steiner, J., Bailey, N., 2016. A system's approach to assess the exposure of agricultural production to climate change and variability. *Climate Change*, v. 136, p. 647-659.
- Anandhi, A., Kannan, N., 2018. Vulnerability assessment of water resources - Translating a theoretical concept to an operational framework using systems thinking approach in a changing climate: Case study in Ogallala Aquifer. *Journal of Hydrology*, v. 557, p. 460-474.
- Araújo, H.L., 2019. Espacialização da precipitação na bacia hidrográfica do rio Brígida no sertão pernambucano para suporte à gestão dos recursos hídricos. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife.
- Bem, J.S.D., Giacomini, N.M.R., Waismann, M., 2015. Utilização da técnica da análise de clusters ao emprego da indústria criativa entre 2000 e 2010: estudo da Região do Consinos - RS. *Interações (Campo Grande)*, 16(1), p. 27-41.
- Carvalho, A.C.P., Carvalho, A.P.P., Di Lollo, J.A., Collares, E.G., Lorandi, R., Moschini, L.E., 2020. Proposta de método para a escolha de áreas de drenagem amostrais e suas relações com variáveis hidrológicas na região sudeste do Estado de São Paulo – Brasil. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 17, e10. <https://doi.org/10.21168/rega.v17e10>.

- Chen, Y., Feng, Y., Zhang, F., Wang, L., 2019. Assessing water resources vulnerability by using a Rough Set Cloud Model: A case study of the Huai River basin, China. *Entropy*, v. 21, n. 1, e14.
- Chokkavarapu, N., Mandla, V.R., 2019. Comparative study of GCMs, RCMs, downscaling and hydrological models: a review toward future climate change impact estimation. *SN Applied Sciences*, v. 1, n. 12.
- Correa, A.R., Rocha, P.C., 2023. Cobertura da terra e variáveis limnológicas em canais fluviais da zona de amortecimento do parque estadual Aguapeí, oeste do estado de São Paulo. *Caminhos de Geografia Uberlândia-MG* v. 24, n. 91, p. 224–242.
- Diaz, C.C.F., Pereira, J.A.S., Nobrega, R.S., 2018. Comparação de dados estimados pelo método da ponderação regional (PR) e dados estimados pelo TRMM para o preenchimento de falhas de precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú. *Revista Brasileira de Climatologia*, ano 14, v. 22. ISSN:2237-8642 (Eletrônica).
- França, L.M.A., Diaz, C.C.F., Reis, J.V., Costa, V.S.O., Galvêncio, J.D., 2019. Efeitos da precipitação na vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S.l.], v. 12, n. 6, p. 2377-2391.
- Freire-Silva, J., Reis, J.V., Santos, T.O., Ferreira, H.S., Leitão, M.M.V.B.R., Galvêncio, J.D., Candeias, A.L.B., 2022. Análise dos produtos de evapotranspiração automáticos GEE-SEBAL e do Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco – (SUPER) para regiões hídricas de Serra Talhada no estado de Pernambuco. *Geografia Ensino & Pesquisa*, 26, e33.
- Galvêncio, J.D., 2021. Impacto do aumento de CO₂ nas precipitações do estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v. 14, n. 3, p. 1828-1839.
- Hammer, O., Harper, D.A.T., Rayan, P.D., 2001. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electronica* 4 (1): 9pp.
- Jaramillo, P., Nazemi, A., 2018. Assessing urban water security under changing climate: challenges and ways forward. *Sustainable Cities and Society*, 41, p. 907-918.
- Kassambara, A., 2017. Practical guide to cluster analysis in R: unsupervised machine learning. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Sthda, 1, 187.
- Lakshmi, V., Fayne, J., Bolten, J., 2018 A comparative study of available water in the major river basins of the world. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 567, p. 510-532.
- Luz, G. G., Galvêncio, J.D., 2022. Balanço hídrico superficial da bacia hidrográfica do riacho Milagres-PE, utilizando o SUPER. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15, 1094-1107.
- Makarigakis, A.K., Jimenez-Cisneros, B.E., 2019. Unesco's contribution to face global water challenges. *Water (Switzerland)*, 11(2), p. 1-17.
- Oliveira Serrão, E.A., Silva, M.T., Ferreira, T.R., Silva, V.P.R., Sousa, F.A.S., LIMA, A.M.M., 2020. Land use change scenarios and their effects on hydropower energy in the Amazon. *Science of The Total Environment*, v. 744, 140981.
- Pernambuco, 2022. Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco, Tomo I: Diagnósticos. Secretaria de Infraestrutura e Recursos Hídricos. Secretaria Executiva de Recursos Hídricos. Recife: Seinfra, 2022. 422 p.: il.
- Santos, E.F.N., Sousa, I.F., 2018. Análise estatística multivariada da precipitação do estado de Sergipe através dos fatores e agrupamentos. *Revista Brasileira de Climatologia*, ano 14, vol. 23. ISSN:2237-8642.
- Shamir, E., Rimmer, A., Georgakakos, K.P., 2016. The use of an orographic precipitation model to assess the precipitation spatial distribution in lake Kinneret watershed. *Water*, 8(12), 591.
- Souza, A., Fernandes, W.A., Albrez, E.A., Galvêncio, J.D., 2012. Análise de Agrupamento da precipitação e da temperatura no Mato Grosso do Sul. *ACTA Geográfica*, Boa Vista, v.6, n.12, mai./ago. de 2012. pp.109-124.
- Souza, T.S., Nascimento, P.S., 2020. Análise multivariada e tendência da precipitação pluviométrica na região hidrográfica do Recôncavo Sul (BA). *Geociências*, v. 39, n. 1, p.203-213, São Paulo, UNESP.
- Super - Sistema de Unidades de Resposta Hidrológica para Pernambuco, 2023. SUPER - How does SUPER work? 2023. Disponível em: <https://super.hawqs.tamu.edu/#>. Acesso em: 10 mai. 2023.
- Ward Jr, J. H., 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association (Online)*, 58(301), 236–244. DOI: <https://doi.org/10.2307/2282967>.
- Yuan, C., Yang, H., 2019. Research on K-value selection method of K-means clustering algorithm. *J Multidisciplinary Scientific Journal*, 2, p. 266-235.

Zanandrea, F., Michel, G.P., Kobiyama, M., Censi, G., Abatti, B.H., 2021. Spatial-temporal assessment of water and sediment connectivity

through a modified connectivity index in a subtropical mountainous catchment. Catena, 204, 105380.