

ZONAS HOMOGÊNEAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS

FRANCIELE ALVES BARBOSA¹, PATRÍCIA DE OLIVEIRA E LUCAS², MARCELO ROSSI VICENTE², RONALDO MEDEIROS DOS SANTOS²

¹ Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. <https://orcid.org/0009-0005-3964-7391>, francieleab@ufmg.br

² Instituto Federal do Norte de Minas Gerais – Campus Salinas. Fazenda Varginha, Rodovia Salinas / Taiobeiras, Km 2, CEP 39560-000. Salinas, Minas Gerais, Brasil. <https://orcid.org/0000-0002-7334-8863>, patricia.lucas@ifnmg.edu.br; <https://orcid.org/0000-0003-2516-5656>, marcelo.vicente@ifnmg.edu.br; <https://orcid.org/0000-0003-1717-5467>, ronaldo.medeiros@ifnmg.edu.br

RESUMO: A determinação da quantidade de água necessária para as culturas é um dos principais fatores para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação. Uma forma de estimar a quantidade de água requerida por uma cultura é através da evapotranspiração de referência ETo. Porém, quando dados climáticos em um local são insuficientes para estimar o valor da ETo, uma estimativa regional pode ser realizada a partir de valores médios de zonas homogêneas, sendo a análise de agrupamento uma forma de obter esses valores médios. Portanto, esse trabalho teve como objetivo a criação de zonas homogêneas de ETo através do agrupamento de séries temporais de ETo para o estado de Minas Gerais. Para isso, foram realizados experimentos para a escolha do algoritmo e do número de clusters que melhor se ajustasse ao problema. Para a avaliação do número de clusters, utilizou-se uma segunda base de dados normais climatológicas com 62 estações. A partir dos experimentos, foi possível concluir que o algoritmo K-means e o modelo com 10 clusters, mostraram ser uma melhor opção para o agrupamento de zonas homogêneas para todo o estado de Minas Gerais.

Palavras-chaves: K-means, Ward, clusters, irrigação.

REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ZONES FOR THE STATE OF MINAS GERAIS

ABSTRACT: Determining the amount of water needed for crops is among the main factors for the correct planning, sizing and management of any irrigation system. One way to estimate the amount of water required by a crop is through the ETo reference evapotranspiration. However, when climatic data in a location are insufficient to estimate the ETo value, a regional estimate can be made from the average values of homogeneous zones, with cluster analysis being a way to obtain these average values. Therefore, this work aimed to create homogeneous ETo zones by grouping ETo time series for the state of Minas Gerais. For this purpose, experiments were carried out to choose the algorithm and the number of clusters that best fit the problem. To assess the number of clusters, a second normal climatological database with 62 stations was used. From the experiments, it was possible to conclude that the K-means algorithm and the model with 10 clusters proved to be better options for grouping homogeneous zones for the entire state of Minas Gerais.

Keywords: K-means, Ward, clusters, irrigation.

1 INTRODUÇÃO

Devido aos baixos índices de precipitação, temperaturas elevadas durante todo o ano e baixa capacidade de armazenamento de água no solo, algumas regiões do Brasil sofrem com o déficit hídrico e consequentemente, não conseguem suprir a necessidade de água das culturas, recorrendo, assim, à irrigação.

A determinação da quantidade de água necessária para as culturas é um dos principais fatores para o correto planejamento, dimensionamento e manejo de qualquer sistema de irrigação. Uma forma de estimar a quantidade de água requerida por uma cultura é por meio da evapotranspiração de referência (ET_o) e do coeficiente da cultura (K_c) (Carvalho *et al.*, 2011).

Embora a ET_o possa ser estimada a partir de dados climáticos, quando os dados em um determinado local são insuficientes para uma estimativa confiável, uma estimativa regional deve ser realizada para obter ET_o em um local não medido. Nesse processo de estimativa regional, os locais devem ser atribuídos às regiões homogêneas (Chen; Chang; Wu, 2013).

Como apresentado por Bork (2018), uma forma de dividir uma área de estudo em regiões homogêneas é por meio da análise de agrupamentos de séries temporais de ET_o. Essa análise pode ser dividida em agrupamento hierárquico e não hierárquico, sendo sua principal finalidade agrupar objetos de acordo com suas características e com base em uma medida de similaridade. O método hierárquico de Ward e o método não hierárquico K-means são métodos de análise de agrupamento simples e altamente utilizados em estudos climatológicos com resultados satisfatórios (Araújo; Maia; Neves, 2015).

O método de Ward é um procedimento hierárquico aglomerativo, no qual cada vetor de dados é um cluster por si só e então esses clusters se fundem um a um até que todos os vetores de dados pertençam a um único cluster. O critério de fusão no método de Ward é minimizar a soma dos desvios quadrados em um grupo de clusters recém-formados (Pelczar *et al.*, 2007). Já o K-means é um algoritmo

iterativo de agrupamento que busca minimizar a soma das distâncias intra-grupos, alocando as observações ao centróide mais próximo e atualizando esses centróides até a convergência da função objetivo (Jain, 2010).

O método K-means foi utilizado por Dourado, Oliveira e Ávila (2013) para identificar zonas pluviometricamente homogêneas no estado da Bahia e analisar as condições climáticas de cada zona entre os anos de 1981 e 2010. O agrupamento identificou e delimitou com coerência as cinco regiões pluviometricamente homogêneas do Estado. Gomes, Blanco e Pessoa (2018) utilizaram o método Fuzzy C-means para identificar regiões homogêneas de precipitação na Região Hidrográfica Tocantins Araguaia. Foram identificadas três regiões homogêneas de precipitação e os resultados dos índices de desempenho dos modelos regionais de distribuição de probabilidade foram satisfatórios para estimar a precipitação média mensal e anual.

Santos e Souza (2012) utilizaram o método Ward para a identificação de regiões pluviometricamente homogêneas de precipitação no Nordeste do Brasil, possibilitando a obtenção de quatro sub-regiões (grupos) homogêneos no Nordeste do Brasil.

Araújo, Maia e Neves (2015) compararam os resultados obtidos pelos métodos K-means e Ward na determinação das áreas homogêneas em termos do regime de precipitação no estado do Rio Grande do Norte. Concluiu-se que o estado do Rio Grande do Norte pode ser caracterizado por quatro regiões homogêneas. Os dois métodos apresentaram resultados semelhantes com diferença em apenas 5 estações e os dois resultados podem ser utilizados como resultado do agrupamento. Pelczar *et al.* (2007) compararam os resultados obtidos dos métodos K-means e Ward, no qual o K-means se mostrou como a opção mais apropriada para obter zonas homogêneas na bacia do rio Sonora. Ainda de acordo com Araújo, Maia e Neves (2015), nos trabalhos desenvolvidos, com o intuito de definir regiões homogêneas é indicada a utilização de vários métodos de análise de agrupamento, optando-se por aqueles cujos resultados sejam mais coerentes com o fenômeno em estudo.

Nesse contexto, este trabalho tem como principal objetivo a criação de zonas homogêneas de ETo através do agrupamento de séries temporais de ETo para o estado de Minas Gerais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

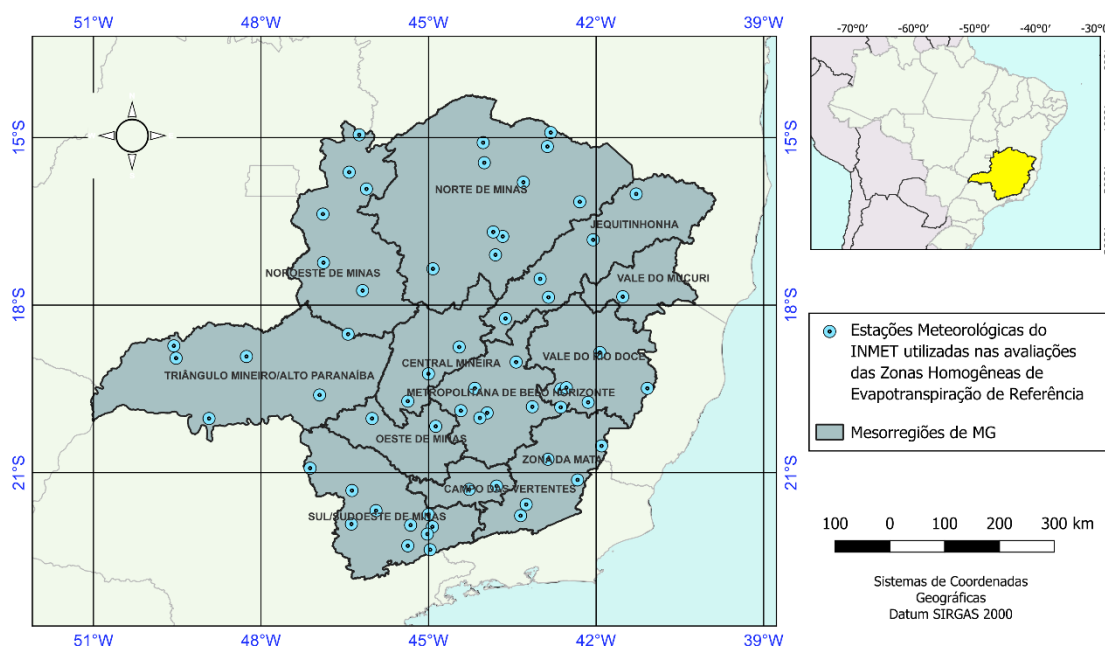
Para a execução do trabalho, utilizaram-se duas bases de dados climáticos. A primeira com propósito de gerar os modelos de agrupamento e a segunda para a avaliação do melhor modelo de agrupamento.

Para gerar os modelos de agrupamento, utilizou-se um banco de dados de evapotranspiração de referência (ETo) disponibilizados por Xavier, King e Scanlon (2015) para o estado de Minas Gerais, obtido pelo método de interpolação pelo inverso da

distância ponderada para 5285 pontos, em grade ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$). O período analisado foi de 1980 – 2016, onde optou-se por trabalhar com a médias mensais de ETo do período, ou seja, com 12 valores para cada uma das 5285 séries temporais.

Já a segunda base de dados climáticos foi utilizada para validação do número de clusters das zonas homogêneas de evapotranspiração. Utilizou-se a base de dados das Normais Climatológicas Brasileira (INMET, 2018) de 62 estações do período de 1981 a 2010 (Figura 1). De posse das variáveis meteorológicas (temperaturas máxima e mínimas, umidade relativa, velocidade do vento e insolação) calculou-se a ETo mensal pelo método FAO Penman–Monteith (Allen *et al.*, 2006).

Figura 1. Mapa com a localização das 62 estações para avaliação.



Para a escolha do número de clusters e do algoritmo que melhor se ajuste ao problema, foram realizados 2 experimentos. No Experimento 1, a métrica da silhueta, proposta por Rousseeuw (1987), foi utilizada para a escolha do algoritmo e para a definição da quantidade de clusters, como sugerido por Faceli *et al.* (2011). Foram testados o intervalo de 3 a 15 clusters para o algoritmo K-means e para o algoritmo de Ward, escolhendo-se aquele com a maior valor de silhueta. Por se

tratar de um problema não supervisionado, não há um elemento externo para guiar o aprendizado, ou seja, os dados não são rotulados. Além disso, de acordo com Araújo, Maia e Neves (2015), para definir regiões homogêneas é indicado a utilização de vários métodos de análise de agrupamento, optando-se por aqueles cujos resultados sejam mais coerentes com o fenômeno em estudo.

Dessa forma, realizou-se o Experimento 2 para certificar se houve uma escolha correta

do melhor número de clusters no Experimento 1. Para isso, escolheu-se os 5 melhores modelos do algoritmo que obteve melhor silhueta do Experimento 1 e empregou-se a base de dados de validação para verificar qual desses agrupamentos (número de clusters) apresentam melhor estimativa de ETo usando o centroide dos clusters como rótulo. Como métrica, utilizou-se a raiz quadrática média (RMSE) (Equação 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (1)$$

Em que: RMSE - raiz quadrática média *intra-cluster*; y_i - ETo das estações usadas para a validação, em mm dia⁻¹ e $\hat{y}_i$ - ETo estimada pelo agrupamento do algoritmo, em mm dia⁻¹.

Após a definição do número de zonas homogêneas, foram utilizados diferentes indicadores estatísticos que correlacionaram os valores mensais de ETo (mm dia⁻¹) observados pelas 62 estações meteorológicas convencionais, localizadas dentro da área de

interesse, com os valores médios mensais de ETo (mm dia⁻¹).

Os indicadores utilizados para a validação das zonas homogêneas de ETo foram: o coeficiente de correlação de Pearson (r); o coeficiente de determinação (R^2); o índice de concordância (d) de Willmott (1981) e o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), além do RMSE.

O coeficiente determinação (R^2) é utilizado para avaliar a associação entre dois fatores, através da proporção da variabilidade em uma variável, sendo expresso pela Equação 2.

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Em que: $\bar{y}$ - a média da ETo das estações usadas para a validação, em mm dia⁻¹.

O Coeficiente de correlação de Pearson (r) ($r = \sqrt{R^2}$) foram classificados segundo a metodologia de Hopkins *et al.* (2009) (Tabela 1).

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson (r) e a sua respectiva classificação.

Coeficiente de correlação de Pearson (r)	Classificação
0,0 – 0,1	Muito Alta
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito Alta
0,9 – 1,0	Quase Perfeita

Fonte: Hopkins *et al.* (2009).

O índice de concordância (d) varia entre zero e um, em que $d = 1$ para a concordância perfeita, $d = 0$ para nenhuma concordância. O valor d é determinado pela Equação 3:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{y}| + |\hat{y}_i - \bar{y}|)^2} \quad (3)$$

O Índice de Confiança (c) foi proposto por Camargo e Sentelhas (1997), pois permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, através do produto do coeficiente de correlação (r) pelo índice de concordância (d) (Castro *et al.*, 2010). Os critérios de avaliação do desempenho de modelos quanto ao índice de confiança, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança.

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sufrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,4	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Experimento 1, o algoritmo K-means apresentou, na maioria das execuções (3 a 15 clusters), valores de silhueta mais próximos de 1, quando comparado ao algoritmo Ward, indicando que as amostras estão melhores agrupadas.

Após a escolha do algoritmo K-means, realizou-se o Experimento 2. Os modelos com 10 e 11 clusters apresentaram melhores resultados, com valor médio do RMSE de 0,26

mm d⁻¹. Os resultados encontrados estão similares aos encontrados por Silva Júnior, Hernandez e Silva (2017) e por Santos *et al.* (2020). Apesar do modelo de 10 e 11 clusters possuírem a mesma média de RMSE, escolheu-se, por parcimônia, como melhor agrupamento o modelo com 10 clusters. A partir da escolha do modelo de 10 zonas, foram geradas as séries temporais médias mensais e anual de cada zona homogênea, conforme apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Média de evapotranspiração de referência mensal e anual (mmd⁻¹) das zonas homogêneas.

Zona	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ET _o (mm d ⁻¹)										
Jan.	4,23	4,16	4,74	4,67	4,55	4,15	3,93	4,25	4,60	4,16
Fev.	4,50	4,38	5,05	4,86	4,84	4,38	4,09	4,35	4,78	4,4
Mar.	4,01	3,74	4,52	4,25	4,3	3,78	3,49	3,96	4,14	3,89
Abr.	3,77	3,2	4,23	3,61	3,95	3,38	2,98	3,68	3,43	3,58
Mai.	3,25	2,54	3,74	2,96	3,40	2,75	2,28	3,03	2,75	3,00
Jun.	3,01	2,25	3,5	2,63	3,14	2,47	2,00	2,82	2,41	2,75
Jul.	3,34	2,48	3,8	2,84	3,43	2,73	2,23	3,19	2,58	3,07
Ago.	4,13	3,14	4,64	3,51	4,24	3,45	2,87	4,07	3,19	3,87
Set.	4,74	3,65	5,35	4,22	4,95	3,99	3,32	4,56	3,72	4,43
Out.	4,82	4,04	5,49	4,63	5,13	4,33	3,76	4,80	4,15	4,64
Nov.	4,23	3,96	4,66	4,3	4,45	4,11	3,84	4,64	4,11	4,26
Dez.	4,03	3,96	4,47	4,39	4,28	3,98	3,82	4,36	4,27	4,05
Média	4,01	3,46	4,52	3,91	4,22	3,62	3,22	3,98	3,68	3,84

Observa-se, na Tabela 3, que os maiores valores de ET_o ocorrem entre agosto e outubro, período caracterizado por elevada radiação solar, menor nebulosidade e baixa umidade relativa. Em diversas zonas, como 1, 3 e 5, os valores máximos nesse trimestre ultrapassam 4,5 mm d⁻¹, destacando-se a Zona 3, que atinge o maior valor observado (5,49 mm d⁻¹ em

outubro). Em contraste, o outono-inverno concentra os menores valores de ET_o, especialmente nas zonas de maior altitude e clima mais ameno, como a Zona 7, onde os índices mínimos variam entre aproximadamente 2,0 e 2,3 mm d⁻¹.

As Zonas 1, 3 e 5 apresentam as maiores médias anuais (4,01 a 4,52 mm d⁻¹), indicando

ambientes mais quentes e com forte incidência de radiação. Por outro lado, as Zonas 2, 6 e 7 exibem as menores médias (3,22 a 3,62 mm d⁻¹), características de regiões com temperaturas mais baixas e maior altitude. Esses resultados evidenciam que a ETo em Minas Gerais é simultaneamente influenciada pela sazonalidade climática e pelas condições geográficas regionais, assim como observado por Martins *et al.* (2018).

Na Tabela 4 observam-se os índices de validação das zonas homogêneas.

Analisando conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos por meio do índice de confiança (c), o desempenho foi considerado Muito Bom e Ótimo, segundo o critério de Camargo e Sentelhas (1997). Os resultados das estimativas de ETo obtidos pelo algoritmo K-means, com base nos indicadores expostos na Tabela 4, podem ser considerados satisfatórios.

Tabela 4. Indicadores utilizados para a validação das zonas homogêneas de ETo.

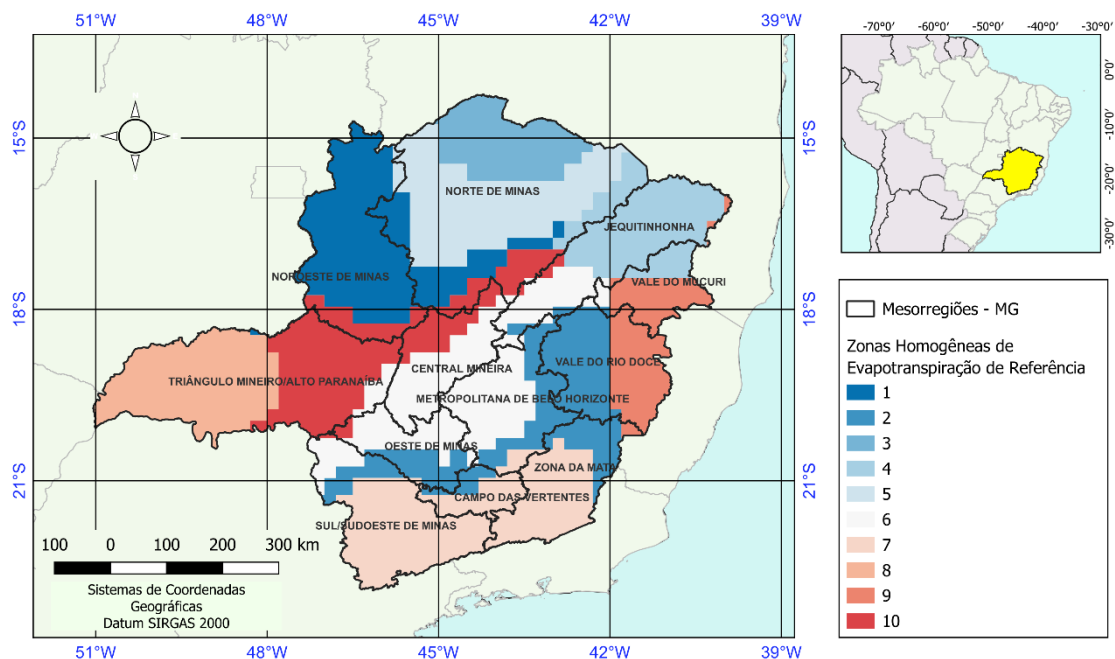
Zona	ETo Normais (mm d ⁻¹)	ETo Zona (mm d ⁻¹)	RMSE (mm d ⁻¹)	R ²	d	r	c	Classificação
1	4,21	4,01	0,31	0,84	0,93	0,916	0,85	M. bom
2	3,49	3,46	0,22	0,90	0,97	0,951	0,93	Ótimo
3	4,58	4,52	0,31	0,77	0,93	0,875	0,81	M. bom
4	3,89	3,91	0,21	0,93	0,98	0,965	0,94	Ótimo
5	4,19	4,22	0,23	0,86	0,96	0,926	0,89	Ótimo
6	3,76	3,63	0,36	0,77	0,92	0,878	0,81	M. bom
7	3,48	3,22	0,37	0,88	0,94	0,936	0,88	Ótimo
8	4,14	3,98	0,23	0,94	0,97	0,968	0,94	Ótimo
9	3,69	3,68	0,18	0,95	0,99	0,975	0,96	Ótimo
10	3,69	3,84	0,19	0,96	0,97	0,981	0,95	Ótimo

Legenda: M. bom – Muito bom

Observa-se na Figura 2 a divisão do Estado de Minas Gerais em 10 Zonas Homogêneas de Evapotranspiração de Referência (ETo). A Zona 1 abrangeu a mesorregião Noroeste de Minas e a porção sul do Norte de Minas. As regiões apresentam altas demandas evapotranspirativas, especialmente de setembro a outubro (4,74 a 4,82 mm d⁻¹).

Isso se relaciona ao fato de serem áreas de altas temperaturas e elevada radiação solar.

Observa-se que, a mesorregião do Norte de Minas possui majoritariamente as Zonas 3 e 5, com valores de ETo médio de 4,52 e 4,22 mm d⁻¹, respectivamente. Resultados semelhantes de ETo e distribuição espacial foram encontrados por Santos *et al.* (2020).

Figura 2. Zonas Homogêneas de ETo para o estado de Minas Gerais.

A mesorregião Jequitinhonha possui majoritariamente as Zonas 4 e 6, com médias de ETo de 3,91 e 3,63 mm d⁻¹, respectivamente. Ressalta-se que a Zona 6 prevalece na porção da região de maior altitude, onde as temperaturas são mais amenas, consequentemente refletindo em menores demandas evapotranspirativas. A Zona 6 ainda é observada em uma grande área do estado, iniciando-se em uma pequena porção da mesorregião Sul/Sudoeste de Minas, passando pelo Oeste de Minas cobrindo as mesorregiões Central e Metropolitana de Belo Horizonte, que são majoritariamente regiões de altitudes acima de 800 m e temperaturas mais amenas. Ressalta-se que a altitude constitui um importante elemento de controle climático, uma vez que, associada às características do relevo, exerce influência direta sobre a temperatura do ar e, consequentemente, sobre a evapotranspiração, conforme destacado por Martins *et al.* (2018).

A mesorregião Vale do Mucuri possui, na maior porção, a Zona 9, com ETo média de 3,68 mm d⁻¹, e na divisa com o Vale do Jequitinhonha, a Zona 4. Os valores máximos de 4,60 e 4,78 mm d⁻¹, encontrados na Zona 9, foram observados, respectivamente, em janeiro e fevereiro. Estas demandas elevadas, associadas aos veranicos, podem proporcionar perdas na produção agrícola.

A mesorregião do Vale do Rio Doce encontra-se nas Zonas 2 e 9, sendo a porção oeste da mesorregião inserida dentro da Zona 2, com valor médio de ETo de 3,46 mm d⁻¹. Ressalta-se que nesta porção da mesorregião é onde encontra-se as maiores altitudes.

A mesorregião Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, que são as regiões que possuem um forte desenvolvimento do agronegócio, possui, em sua maior parte, as Zonas 8 e 10, com médias de 3,98 e 3,84 mm d⁻¹, respectivamente. Ambas as zonas homogêneas apresentam as máximas demandas no mês de outubro, 4,80 e 4,64 mm d⁻¹, respectivamente para a Zona 8 e 10.

As mesorregiões Zona da Mata, Sul/Sudoeste de Minas e Campo das Vertentes possuem majoritariamente a Zona 7, que tem a menor média de ETo observada (3,22 mm d⁻¹), como também observado por Lemos Filho *et al.* (2010), que correlacionaram os valores inferiores de ETo à menor incidência de radiação solar.

4 CONCLUSÕES

Concluiu-se que, para o agrupamento de séries temporais de evapotranspiração de referência, o método K-means apresentou melhor desempenho em comparação aos demais métodos avaliados, resultando na definição de 10 zonas homogêneas para o estado de Minas Gerais.

5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. (Estudio FAO Riego y Drenaje, n. 56.) Disponível em:

<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f3660258-d07f-487e-b3c1-01661c83cb16/content>. Acesso em: 10 dez. 2025.

ARAÚJO, J. M. S.; MAIA, A. G.; NEVES, J. A. Uso dos índices PCP e PCD na determinação de regiões com precipitação pluvial homogênea. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, ano 11, v. 17, p. 119-139, 2015. DOI: 10.5380/abclima.v17i0.38903. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/38903>. Acesso em: 10 dez. 2025.

BORK, C. K. **Regionalização de vazões mínimas para o estado do Rio Grande do Sul**. 2018. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**,

Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011. DOI: 10.5216/pat.v41i3.12760. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/pat/article/view/12760>. Acesso em: 10 dez. 2025.

CASTRO, F. da S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000800012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/XXbYrCNwNhPqvDKzFxCbksq/?lang=pt>. Acesso em: 05 mar. 2026.

CHEN, C. T.; CHANG, Y. C.; WU, G. T. Determination of homogeneous regions for regional reference evapotranspiration estimation using the self-organizing map in western Taiwan. **Paddy and Water Environment**, Tokyo, v. 12, n. 1, p. 173-179, 2013.

DOURADO, C. S.; OLIVEIRA, S. R. M.; AVILA, A. M. H. Análise de zonas homogêneas em séries temporais de precipitação no estado da Bahia. **Bragantia**, Campinas, v. 72, n. 2, p. 192-198, 2013. DOI: 10.1590/S0006-87052013000200012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/w96N8DkvbnBwbMThDKqd5ZM/?lang=pt>. Acesso em: 05 mar. 2026.

FACELI, K.; LORENA, A. C.; GAMA, J.; CARVALHO, A. C. P. L. F. **Inteligência artificial: uma abordagem de aprendizado de máquina**. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GOMES, E. P.; BLANCO, C. J. C.; PESSOA, F. C. L. Regionalization of precipitation with determination of homogeneous regions via fuzzy c-means. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, p. e79, 2018. DOI: 10.1590/2318-0331.231820180079. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318->

0331.231820180079. Acesso em: : 05 mar. 2026.

HOPKINS, W. G.; MARSHALL, S. W.; BATTERHAM, A. M.; HANIN, J. Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. **Medicine & Science in Sports & Exercise**, Indianapolis, v. 41, n. 1, p. 3-13, 2009. DOI: 10.1249/MSS.0b013e31818cb278. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19092709/>. Acesso em: 05 mar. 2026.

INMET. **Normais climatológicas do Brasil**. Brasília: INMET, 2018. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 10 dez. 2025.'

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. **Pattern Recognition Letters**, Amsterdam, v. 31, n. 8, p. 651-666, 2010. DOI: 10.1016/j.patrec.2009.09.011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>. Acesso em: 05 mar. 2026.

LEMO FILHO, L. C. A.; CARVALHO, L. G.; EVANGELISTA, A. W. P.; ALVES JÚNIOR, J. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 12, p. 1294-1303, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010001200007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001200007>. Acesso em: 05 mar. 2026.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F. dos; REBOITA, M. S. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 23, p. 129-156, 2018. DOI: 10.5380/abclima.v1i0.60896. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60896>. Acesso em: 05 mar. 2026.

PELCZER, I.; RAMOS, J.; DOMÍNGUEZ, R.; GONZÁLEZ, F. Establishment of regional homogeneous zones in a watershed using clustering algorithms. *In*: IAHR WORLD CONGRESS, 32., 2007, Venice. **Proceedings** [...]. Madrid: IAHR, 2007. n. p.

ROUSSEEUW, P. J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, Amsterdam, v. 20, p. 53-65, 1987. DOI: 10.1016/0377-0427(87)90125-7. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7). Acesso em: 05 mar. 2026.

SANTOS, T. A.; VICENTE, M. R.; LEITE, C. V.; SANTOS, R. M.; SOUZA, J. L. T. Zonas homogêneas de evapotranspiração de referência para o norte e noroeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 13, n. 4, p. 3540-3555, 2020. DOI: 10.7127/RBAI.V13N4001078. Disponível em: <https://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/1078>. Acesso em: 05 mar. 2026.

SANTOS, W. A.; SOUZA, F. D. A. S. Identificação de regiões pluviometricamente homogêneas no Nordeste do Brasil usando análise multivariada. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 10, n. 1, p. 136-152, 2012. DOI: 10.5380/abclima.v10i1.30600. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abclima.v10i1.30600>. Acesso em: 05 mar. 2026.

SILVA JUNIOR, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; SILVA, I. P. F. Determinação de zonas homogêneas de evapotranspiração de referência. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18., 2017, Santos. **Anais** [...]. São José dos Campos: INPE. 2017. p. 5825-5832. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2017/10.27.15.34.08/doc/thisInformationItemHomePage.html>. Acesso em: 05 mar. 2026.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, New York, v. 2, p. 184-194, 1981.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables

in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2015. DOI: 10.1002/joc.4518. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4518>. Acesso em: 05 mar. 2026.