INTERPOLAÇÃO ESPACIAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA PARA REGIÃO SUL DO ESPÍRITO SANTO

Elaine Cordeiro dos Santos[1], Matheus Henrique da Silva[1], Fernanda Lyra[1], Iulo Pessotti Moro [1].

[1]Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Av. Governador Lindemberg, 316, Centro - 29550-000 - Jerônimo Monteiro – ES, Brasil.

Resumo

A carência de estações pluviométricas em operação em Alegre, sul do Espírito Santo, limita a caracterização da precipitação local. Avaliou-se o desempenho dos interpoladores IDW, ADW e Krigagem Ordinária na estimativa da precipitação anual, utilizando dados diários do Hidroweb/ANA referentes a 2018, ano com maior número de estações com séries completas, totalizando 21 estações. As interpolações foram realizadas em uma grade de 500 m e avaliadas por validação cruzada *leave-one-out*, com base no MAE, RMSE, Bias, correlação de Pearson, NSE e índice de concordância refinado de Willmott (d'). A Krigagem Ordinária apresentou os menores *MAE* (291,27 mm) e *RMSE* (341,24 mm), seguida pelo *IDW* e *ADW*, porém gerou superfície com baixa variabilidade espacial (1.520 mm), enquanto *IDW* e *ADW* reproduziram a amplitude observada entre as estações. Os três métodos apresentaram *NSE* e correlação negativos. Conclui-se que a escolha do interpolador deve considerar conjuntamente as métricas de desempenho e a representação espacial, sendo a baixa densidade da rede pluviométrica o principal fator limitante à espacialização da precipitação na área de estudo.

Palavras-chave: Estações pluviométricas. Validação cruzada. Análise espacial.

Área do Conhecimento: Ciências agrárias.

Introdução

A caracterização do regime de precipitação no município de Alegre, estado do Espírito Santo, é dificultada pela precariedade da rede de monitoramento pluviométrico local. Embora existam estações na região, grande parte encontra-se desativada, com equipamentos danificados ou apresentando séries históricas desatualizadas e repletas de falhas. Tal como os demais municípios do estado, Alegre enfrenta o desafio da escassez de monitoramento meteorológico contínuo, dispondo a região de apenas uma estação automática, operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Ainda que essa estação forneça dados meteorológicos, a dependência de um único ponto de medição torna o sistema vulnerável a falhas operacionais e a lacunas temporais. Como estratégia para mitigar essas limitações, é comum a aplicação de técnicas de interpolação espacial aos dados das estações disponíveis, de modo a estimar e espacializar valores em locais desprovidos de informação (Zhang et al., 2016).

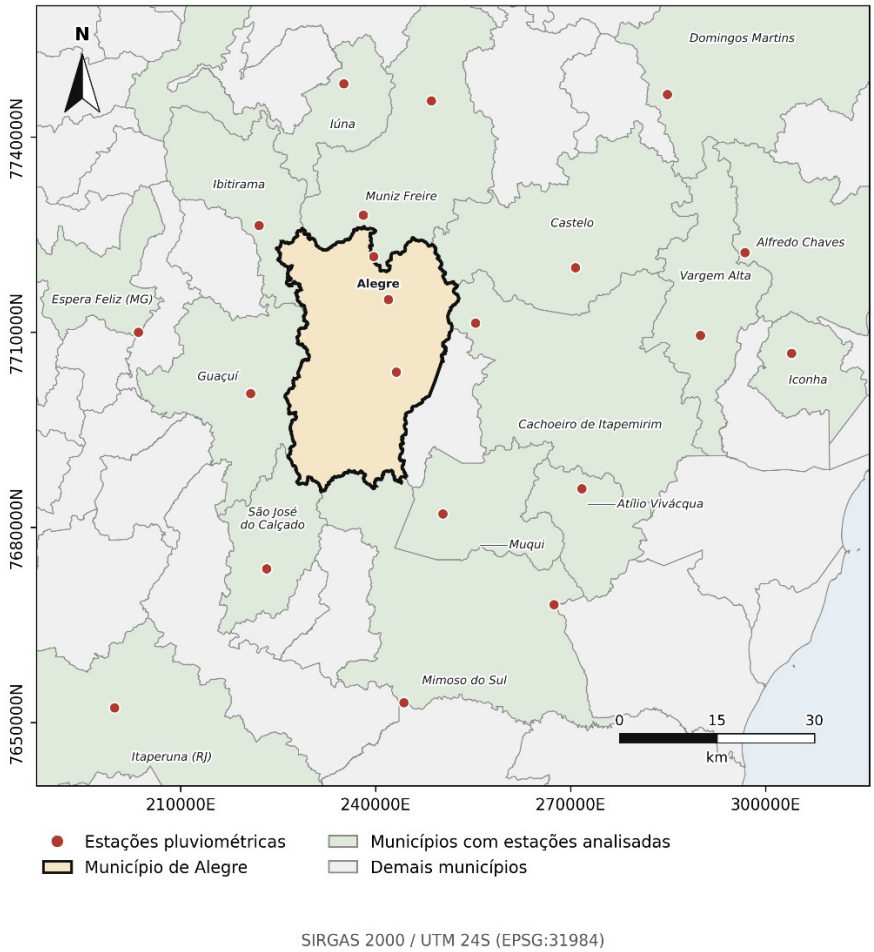
Na literatura, métodos determinísticos como o Inverso da Distância Ponderada (*IDW*) e Ponderação Angular pela Distância (*ADW*) têm se destacado na espacialização da precipitação, frequentemente com desempenho comparável aos métodos de Krigagem (Hofstra et al., 2008; Xavier et al., 2016), enquanto a Krigagem Ordinária oferece uma abordagem geoestatística estocástica que modela a estrutura de dependência espacial dos dados por meio do semivariograma. A literatura, contudo, não aponta um interpolador universalmente superior, sendo a avaliação empírica o caminho para identificar o método que melhor representa a realidade espacial da área de interesse (Yang; Xing,2021).

Diante desse contexto, o presente estudo tem por objetivo avaliar o desempenho de três interpoladores IDW, ADW e Krigagem Ordinária na estimativa da precipitação a partir dos dados das estações pluviométricas da área de estudo.

Metodologia

A área principal de interesse corresponde ao município de Alegre, localizado na região sul do Espírito Santo. Para a interpolação e a avaliação dos métodos, foi utilizada uma rede regional composta por estações pluviométricas distribuídas em municípios do sul capixaba e em áreas adjacentes dos estados de Minas Gerais e do Rio de Janeiro. A distribuição espacial das estações utilizadas, os limites municipais e a localização do município de Alegre são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Localização do município de Alegre, limites municipais e distribuição das estações pluviométricas.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram utilizados dados diários de precipitação disponibilizados pelo sistema Hidroweb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2026). Priorizaram-se os registros consistidos e, na ausência destes, foram utilizados os dados brutos. Foram excluídos os registros classificados como estimados, duvidosos ou acumulados. Para o cálculo dos totais mensais, foram considerados válidos os meses que apresentaram registros em mais de 90% dos dias.

Para a seleção do ano de referência, foram considerados válidos somente os anos em que os 12 meses atenderam a esse critério. No período entre 1938 e 2025, identificou-se o ano com o maior número de estações apresentando séries anuais completas. Com base nesse procedimento, o ano de 2018 foi selecionado por reunir 21 estações com séries completas. As coordenadas das estações foram reprojetadas para o SRC SIRGAS 2000 / UTM zona 24S (EPSG:31984), em unidades métricas. A identificação, a localização, a altitude e os respectivos valores de precipitação anual acumulada dessas estações são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Identificação e valor de precipitação das estações pluviométricas selecionadas.

Código	Nome	Latitude	Longitude	Altitude	Prec acumulada mm
2040017	Duas barras	-20,7281	-40,8825	265	1640,80
2040020	Vila nova maravilha	-20,5875	-40,9492	980	2190,80
2041000	Atílio Vivacqua	-20,9128	-41,195	76	1149,80
2041001	Guaçuí	-20,7736	-41,6817	576	1567,10
2041002	Castelo	-20,6056	-41,1997	107	1154,20
2041003	Rive	-20,7469	-41,4661	127	1141,10
2041010	Jacigua	-20,7019	-41,0164	580	1562,80
2041013	Iúna	-20,3458	-41,5375	615	1326,80
2041014	Dores do rio preto	-20,6858	-41,8461	772	1857,50
2041015	Fazenda monte alegre	-20,9447	-41,4008	450	1854,40
2041016	Ibitirama	-20,5406	-41,6656	794	1986,88
2041018	Usina fortaleza	-20,3714	-41,4089	580	1641,80
2041019	Itaici	-20,5283	-41,5114	380	1518,90
2041020	Aracê (fazenda modelo)	-20,3667	-41,0611	1075	1406,90
2041021	Burarama	-20,6806	-41,3483	180	1844,60
2041078	Pch São Simão montante 1	-20,5861	-41,4969	302	1551,00
2041079	Pch São Simão jusante	-20,6464	-41,4764	201	1136,95
2141004	Itaperuna	-21,2064	-41,8911	110	1056,58
2141014	Ponte do Itabapoana	-21,2061	-41,4628	59	1327,30
2141016	São José do calçado	-21,0169	-41,6628	150	1233,20
2141017	São José das torres	-21,0731	-41,2383	120	1801,30

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Avaliaram-se três métodos de interpolação: o Inverso da Distância Ponderada (IDW), a Ponderação Angular pela Distância (*ADW*) e a Krigagem Ordinária, esta última de natureza geoestatística. Os três foram aplicados com a totalidade das estações disponíveis em cada ano, adotando-se expoente dois para o IDW e o ADW e semivariograma esférico para a krigagem. A interpolação foi realizada em grade regular de 500 m, em ambiente Python, com as bibliotecas NumPy, SciPy e Pandas.

O desempenho foi avaliado por validação cruzada *leave-one-out* (LOOCV), na qual cada estação foi sucessivamente retirada do conjunto e seu valor estimado a partir das estações remanescentes, com reajuste do semivariograma a cada retirada.

Foram calculados o erro absoluto médio (*MAE*), a raiz do erro quadrático médio (*RMSE*), o erro médio (*Bias*), o coeficiente de correlação de Pearson (*r*), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*) (Nash-Sutcliffe, 1970) e o índice de concordância refinado de Willmott (*d'*) (Willmott; Robeson; Matsuura, 2012). Menores valores de *MAE*, *RMSE* e *Bias* indicam menor erro de estimativa, enquanto valores de *NSE* e *d'* próximos da unidade indicam maior concordância entre observado e estimado. Valores negativos de *NSE* indicam que a estimativa interpolada apresenta erro superior ao que se obteria adotando a média das estações observadas.

Resultados

Os resultados da validação cruzada apresentaram padrões de desempenho distintos entre os interpoladores, não sendo adequada a avaliação com base em uma única métrica. Por essa razão, os indicadores foram analisados conjuntamente, considerando a magnitude dos erros, a tendência das estimativas e a concordância entre os valores observados e estimados. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2.

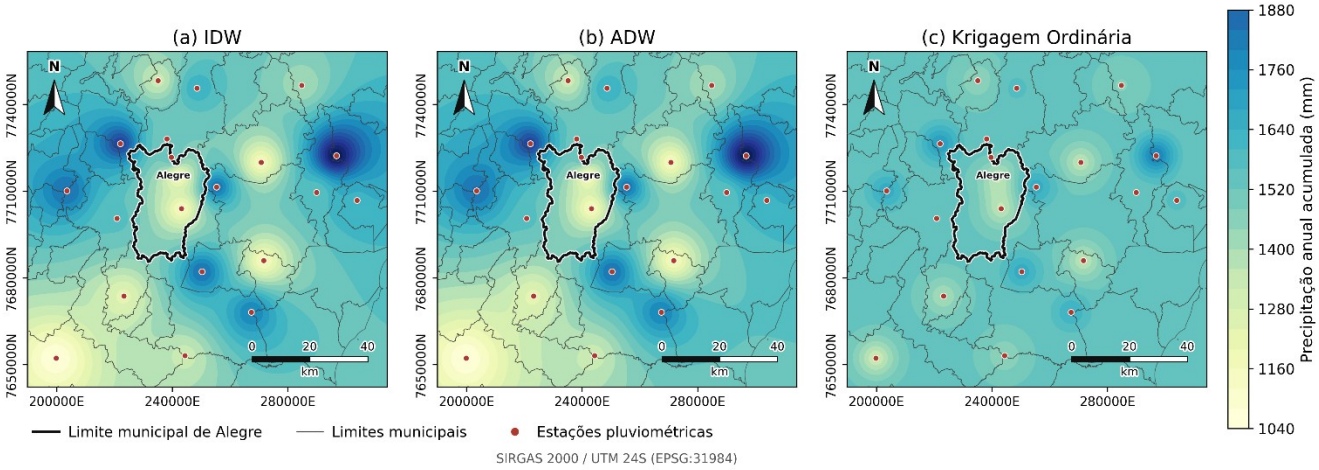
Tabela 2 – Métricas de avaliação dos interpoladores utilizados

Interpolador	MAE (mm)	RMSE (mm)	Bias (mm)	r (Pearson)	NSE	d' (Willmott)
IDW	297,26	344,16	2,13	-0,29	-0,21	0,44
ADW	300,70	346,13	5,16	-0,27	-0,22	0,43
Krigagem Ordinária	291,27	341,24	-7,24	-0,45	-0,19	0,45

Elaborado pelos os autores (2026).

A Krigagem Ordinária apresentou os menores valores de *MAE* (291,27 mm) e *RMSE* (341,24 mm), seguida pelo *IDW*, com 297,26 e 344,16 mm, respectivamente, e pelo *ADW*, com 300,70 e 346,13 mm. Os valores de Bias foram de 2,13 mm para o *IDW*, 5,16 mm para o *ADW* e -7,24 mm para a Krigagem Ordinária. Os coeficientes de correlação de Pearson foram negativos para os três métodos, variando de -0,27 a -0,45, enquanto os valores de *NSE* variaram entre -0,19 e -0,22. O índice de concordância refinado de Willmott (d') variou de 0,429 a 0,447, sendo de 0,435 para o *IDW*, 0,429 para o *ADW* e 0,447 para a Krigagem Ordinária. A Figura 2 apresenta a espacialização da precipitação com os métodos analisados no presente trabalho.

Figura 2 – Espacialização da precipitação anual acumulada em 2018.



Elaborado pelos os autores (2026).

Discussão

A Krigagem Ordinária apresentou o menor *MAE* e *RMSE* entre os métodos avaliados, indicando menor erro médio nas estimativas obtidas pela validação cruzada, resultado semelhante ao de Aparecido (2022), que também verificou desempenho superior da Krigagem Ordinária em relação ao IDW. Entretanto, os valores negativos de *NSE* e os coeficientes de correlação negativos observados para os três interpoladores indicam baixa capacidade de reprodução da variabilidade espacial da precipitação nas estações omitidas. Assim, a menor magnitude dos erros da Krigagem não deve ser interpretada isoladamente como superioridade do método.

A representação espacial também apresentou diferenças visuais entre os interpoladores (Figura 2). O *IDW* e o *ADW* apresentaram maior variabilidade espacial, reproduzindo a amplitude observada entre as estações, de 1.057 a 2.191 mm. Esse comportamento está relacionado ao fato de esses métodos serem baseados na ponderação das distâncias entre os pontos observados e os locais estimados, atribuindo maior influência aos valores das estações mais próximas. Dessa forma, os interpoladores apresentaram maior capacidade de representar as variações locais observadas na área de estudo (Lyra et al., 2018). Enquanto a Krigagem Ordinária apresentou uma superfície mais homogênea, com estimativas concentradas em torno de 1.520 mm e amplitude reduzida, de 1.057 a 1.853 mm. Esse comportamento está associado com efeito de suavização gerado pela Krigagem Ordinária (Baratto et

al.,2022).Também estar relacionado à distribuição espacial das estações e à estrutura de dependência espacial captada pelo modelo geoestatístico.

Dessa forma, embora a Krigagem tenha apresentado os menores erros, sua superfície não reproduziu a amplitude observada entre as estações. Entre os métodos determinísticos, o *IDW* apresentou desempenho ligeiramente superior ao *ADW* nas métricas de *MAE* e *RMSE*, embora ambos tenham apresentado baixa capacidade preditiva.

Considerando a amostragem e a densidade das estações, não foi estabelecido um critério de distância mínima entre elas. Por essa razão, os resultados apresentados devem ser interpretados levando em conta a configuração da rede pluviométrica usada, especialmente o número reduzido de pontos (21) e o espaçamento entre eles, fatores que podem ter influenciado o desempenho dos interpoladores.

Conclusão

Os métodos de interpolação avaliados apresentaram comportamentos distintos na espacialização da precipitação, evidenciando a importância de considerar conjuntamente o desempenho estatístico e a representação espacial das estimativas. A Krigagem Ordinária apresentou os menores valores de *RMSE* e *MAE*, porém produziu uma superfície com baixa variabilidade espacial, enquanto o *IDW* e o *ADW* preservaram melhor as variações espaciais observadas, com o *IDW* apresentando desempenho ligeiramente superior ao *ADW* nas métricas de erro. Os resultados indicam, portanto, que a seleção do interpolador não deve ser fundamentada exclusivamente em uma única métrica de desempenho. A ampliação do número e da distribuição espacial das estações pluviométricas, associada à avaliação por métricas complementares de concordância, poderá contribuir para maior robustez na definição do método mais adequado para a espacialização da precipitação na área de estudo.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Hidroweb: sistema de informações hidrológicas**. Brasília: ANA, 2026. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb. Acesso em: 20 ago. 2026.

APARECIDO, L. E. O. et al. Spatial Interpolation Techniques to Map Rainfall in Southeast Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 1, p. 141-155, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863710015>. Acesso em: 20 ago. 2026.

BARATTO, P.F.B. *et al*. Espacialização da Precipitação Diária em Bacias Hidrográficas do Sul do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 3, p. 385-404, 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863730034. Acesso em: 23 ago. 2026.

HOFSTRA, Nynke *et al.* Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 113, n. D21, nov. 2008.

LYRA, G.B. et al. Evaluation of methods of spatial interpolation for monthly rainfall data over the state of Rio de Janeiro, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**., v. 134, p. 955-965, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2322-3>.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — a discussion of principles. Journal of Hydrology, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA, K. A refined index of model performance. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 13, p. 2088–2094, 2012.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644–2659, maio 2016.

Yang, R.; Xing, B. A Comparison of the Performance of Different Interpolation Methods in Replicating Rainfall Magnitudes under Different Climatic Conditions in Chongqing Province (China). **Atmosphere** 2021, v. 12, n.1318. Disponível em: < https:// doi.org/10.3390/atmos12101318 >. Acesso em: 20 ago. 2026.

ZHANG, Rui *et al*. Benchmarking Spatial Interpolation Methods for Long-Term Meteorological Exposure Assessment in China: Comparing Inverse Distance Weighting and Ordinary Kriging in Climate-Health Research. **Environmental Health Insights**, v. 20, p. 1-7, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/11786302261433113>. Acesso em: 20 ago. 2026.

Agradecimentos

Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa, através do edital FAPES nº 14/2023 - PROCAP 2024 DOUTORADO, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.