III SIMPOSIO BRASILEIRO DE BIOMETEOROLOGIA HUMANA
26 a 28 de agosto de 2026

TÉCNICAS DE KRIGAGEM PARA A INTERPOLAÇÃO DE TEMPERATURA DO AR EM AMBIENTES URBANOS: UM SUBSÍDIO AOS ESTUDOS DE CONFORTO TÉRMICO

Rafael Rodrigues Ferreira (1); Alex Monito Nhancololo (2); Emerson Galvani (3)
(1) Mestrando em Geografia Física, Universidade de São Paulo, rrr.ferreira@usp.br
(2) Doutorando em Estatística e Probabilidade, Universidade de São Paulo, amnhancololo@ime.usp.br
(3) Professor Doutor, Universidade de São Paulo, egalvani@usp.br

RESUMO
A krigagem é considerada uma das técnicas mais adequadas para a interpolação de dados de temperatura em ambientes urbanos, sendo ostensivamente utilizada em pesquisas de conforto térmico. No entanto, pouco se especifica a técnica de krigagem empregada. Nesse sentido, o presente trabalho visa comparar o desempenho de três técnicas de krigagem (simples, ordinária e universal) aplicadas em Itajubá/MG. Para tanto, foram coletados dados de temperatura do ar de 23 a 26 de julho de 2022 e de 26 a 29 de dezembro de 2023 em 32 e 48 pontos pelo município, respectivamente. Os variogramas experimentais obtidos foram ajustados conforme o modelo gaussiano, permitindo a predição de temperatura e a avaliação da variância. Houve subestimação de temperatura na ordem de 10^{-2} °C, sendo que as krigagens simples e ordinária obtiveram menor viés médio (ME e MSNE de -0.014) e a universal apresentou maior estabilidade quanto aos erros (RMSNE de 1.33). Portanto, a depender do critério considerado, cada técnica apresentou melhor desempenho em Itajubá/MG.

Palavras-chave (máximo 5): geoestatística, semivariograma, clima urbano, ilhas de calor, Itajubá.

1. INTRODUÇÃO
No Brasil, o principal foco dos estudos em clima urbano envolve a temperatura do ar e, sobretudo, a tendência de aquecimento da camada-limite urbana. Ainda em meados do século XX, os primeiros trabalhos se ativeram à análise do "campo térmico" em grandes cidades por meio da comparação entre duas estações meteorológicas situadas nas áreas urbana e rural (Tarifa, 1977). No entanto, ao adentrar o espaço urbano por meio de observações *in situ* e modelagem climática, verifica-se que as cidades se compartimentam em uma complexa "estrutura térmica espacial urbana" conforme os diferentes usos do solo que as compõem, de modo a impulsionar temas recentes de pesquisa voltados à detecção e ao monitoramento de ilhas de calor (Oke et al., 2017) e aos impactos biometeorológicos no conforto térmico humano (Gonçalves, 2025).

Para o monitoramento espacial das anomalias de temperatura em ambientes urbanos, três técnicas são utilizadas na literatura: os pontos fixos, os transectos móveis e o sensoriamento remoto (Porangaba; Teixeira; Amorim, 2017). As duas primeiras envolvem especificamente a mensuração de temperatura do ar, elegendo locais representativos de diferentes usos do solo para a coleta de dados, de modo a contemplar as interações superfície-atmosfera que se estabelecem nas cidades. Quanto maior for a cobertura de informações, obtém-se maior acurácia no mapeamento térmico da atmosfera urbana, o que comumente é limitado por restrições operacionais e orçamentárias que impedem a compra de várias estações meteorológicas para uma mesma cidade, bem como a realização ostensiva de coletas de dados com transectos móveis.

Nesse sentido, há uma demanda crescente por técnicas de interpolação que possibilitem estimar dados meteorológicos em áreas urbanas. Para temperatura, em específico, a krigagem é apresentada como a técnica mais adequada (Alves; Biumes; Vecchia, 2012), tendo em vista que fornece estimativas não tendenciosas e com variância mínima (Camargo, 1998). No entanto, a depender da natureza e disponibilidade do conjunto de dados, um tipo específico de krigagem (simples, ordinária, universal, por deriva externa ou co-krigagem) pode ser mais efetivo, o que ainda constitui uma lacuna entre os estudos de clima urbano e conforto térmico.

2. OBJETIVO
O objetivo do trabalho consiste em comparar o desempenho de três técnicas de krigagem utilizadas na interpolação de temperatura do ar na cidade de Itajubá/MG.

3. MÉTODO

3.1. Área de estudo

O município de Itajubá/MG está localizado no sul do estado de Minas Gerais. Ocupa uma extensão de 294,83 km^2, dos quais 275,32 km^2 são classificados como rurais e 19,51 km^2 como urbanos. Atualmente, possui uma população de 93.073 habitantes (IBGE, 2023), figurando entre as cidades médias do estado. O clima na região é do tipo Cwa (clima temperado úmido), com verão quente e inverno ameno e seco em função do controle exercido pela monção sul-americana (MSA) em escala regional, bem como pelo efeito da topografia elevada e da superfície urbana em escala local (Reboita et al., 2016).

3.2. Coleta, tratamento e processamento de dados

Foi adotada a técnica de transectos móveis com veículos para a coleta de dados de temperatura do ar, utilizando termo-higrômetros digitais (*Incoterm,* modelo 7666.02.0.00) acoplados a abrigos meteorológicos (Figura 1). As coletas ocorreram em dois episódios sazonalmente distintos: de 23 a 26 de julho de 2022 e de 26 a 29 de dezembro de 2023, entre 21 e 22 horas. No inverno, os transectos móveis percorreram dois trajetos (A e B) pelo município, coletando dados em 32 pontos. No verão, adicionou-se o trajeto C, obtendo 48 pontos (Figura 1). O banco de dados foi ajustado segundo a técnica de correção de simultaneidade para mitigar o efeito da variação térmica regional entre 21 e 22 horas, aplicando uma taxa horária de resfriamento noturno aos dados coletados com base na estação meteorológica do CEPreMG/UNIFEI.

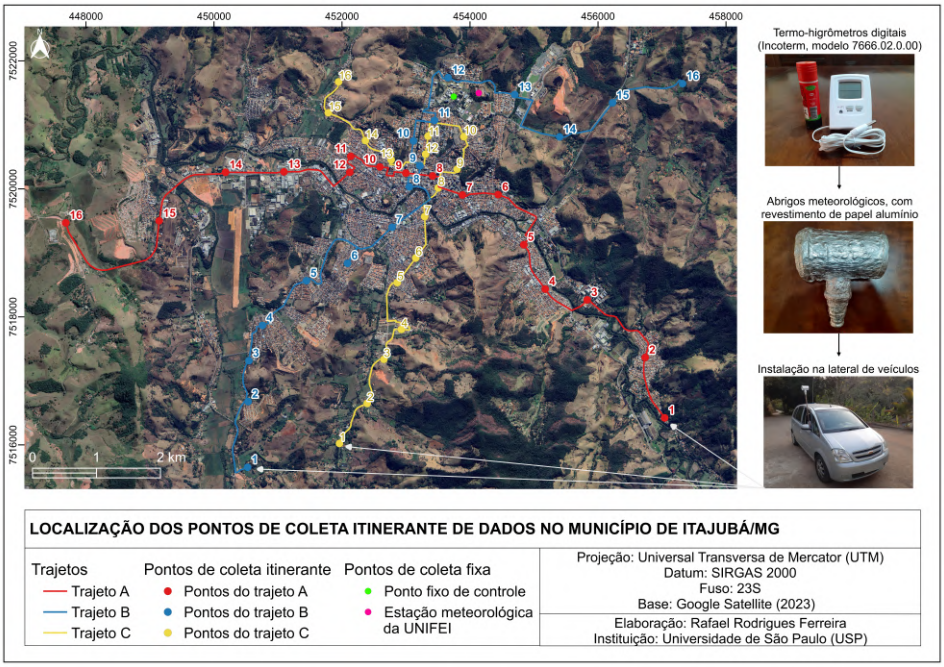


Figura 1 - Localização dos pontos de coleta itinerante de dados no município de Itajubá/MG.

3.3. Análise geoestatística dos resultados

A análise geoestatística dos dados de temperatura do ar foi realizada em ambiente R (versão 4.5.2). A primeira etapa envolveu a avaliação exploratória da dependência espacial dos dados coletados, utilizando diagramas de dispersão do logaritmo de temperatura em quatro intervalos de distância. Na sequência, foram confeccionados os variogramas experimentais para cada dia de coleta de dados, empregando a Equação 1 e selecionando seus argumentos (patamar, alcance e efeito pepita) conforme a semivariância obtida na etapa anterior. A terceira etapa compreendeu o ajuste dos modelos teóricos por mínimos quadrados ponderados (WLS), no qual foram testados os modelos gaussiano, exponencial e esférico. A seleção se baseou em dois critérios: o menor erro de ajuste (SSErr) e a análise visual do variograma experimental, a partir dos quais o modelo gaussiano se apresentou adequado, tendo em vista a forte dependência espacial a curtas distâncias e a transição suave até a relativa estabilização. A partir dos modelos ajustados, foi realizada a krigagem de temperatura do ar para a área urbana de Itajubá/MG, confeccionando mapas de predição e variância (erro) para as três técnicas utilizadas: krigagem simples (KS), krigagem ordinária (KO) e krigagem universal (KU). As diferenças entre as três decorrem do pressuposto de estacionariedade de segunda ordem, visto que a KS e a KO consideram que a variável apresenta uma média constante na área de predição, ao passo que a KU se

baseia em uma tendência determinística modelada usando coordenadas geográficas. Por fim, para avaliar a qualidade preditiva dos modelos, realizou-se a validação l*eave-one-out* (ou cruzada) que remove cada um dos pontos de dados e estima seu valor com base nas observações próximas, calculando as métricas de erro médio (ME), raiz do erro médio quadrático (MSE), erro médio quadrático normalizado (MSNE) e raiz do erro médio quadrático normalizado (RMSNE) (Nhancololo; Scalon; Alencar, 2026).

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}[Z(x_i)-Z(x_i+h)]^2 \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

γ é a semivariância experimental para a distância h [°C²];
h é o intervalo de distância entre pares de pontos de coleta de dados [m];
N(h) é o número de pares de pontos separados pela distância h [pares de pontos];
$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os valores observados de temperatura no ponto x_i e $x_i + h$, respectivamente [°C].

4. RESULTADOS

A dependência espacial entre os dados de temperatura do ar diferiu entre os episódios, evidenciando a influência da sazonalidade sobre a formação da ilha de calor urbana (Oke et al., 2017). No inverno, a curtas distâncias, o coeficiente de determinação (R^2) se manteve na ordem de 0.9, tendo em vista o aquecimento da camada-limite urbana favorecido pela circulação anticiclônica atuante no centro-sul do Brasil durante julho de 2022 (Ferreira; Pascoalino, 2025). Já no verão, a instabilidade atmosférica associada à passagem de uma frente fria entre os dias 26 e 27 de dezembro implicou a homogeneização do gradiente térmico urbano-rural (Ferreira; Pascoalino, 2025), de modo a reduzir a dependência espacial dos dados de temperatura do ar em curtas distâncias, sobretudo na área central da cidade, onde o R^2 permaneceu entre 0.6 e 0.7 (Figura 2).

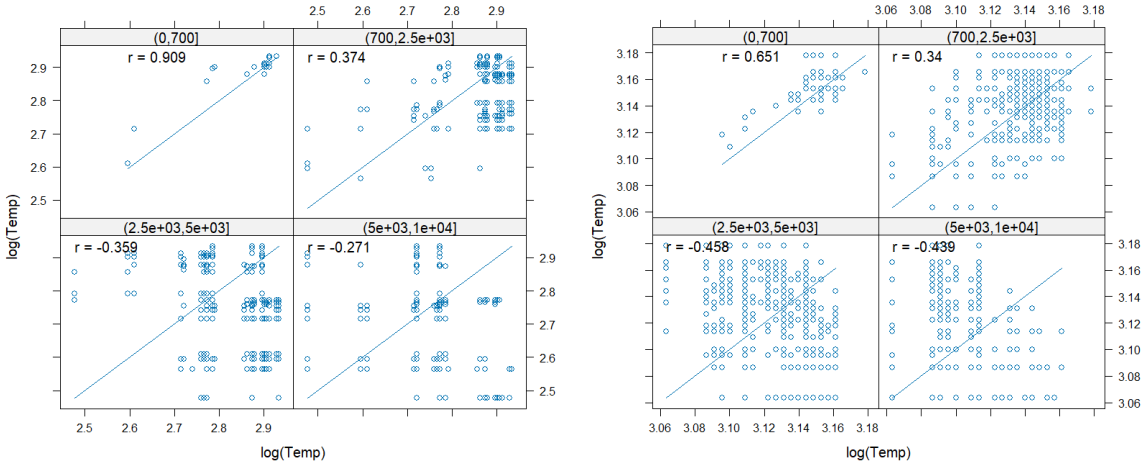
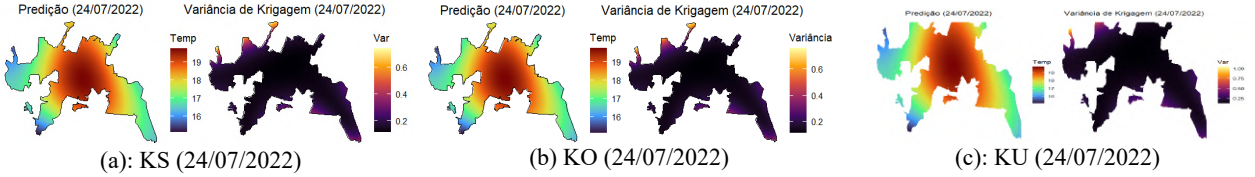
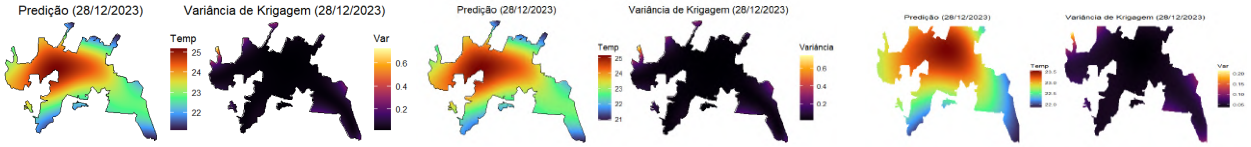


Figura 2 - Diagramas de dispersão dos dados de temperatura do ar em Itajubá/MG: (a) 23/07/2022; (b) 26/12/2023.

Com o distanciamento entre os pontos de coleta de dados, o R^2 assumiu valores negativos em ambos os episódios, o que se atribui ao resfriamento do entorno rural e às incertezas inerentes ao menor número de pontos situados em áreas afastadas. Assim, o modelo gaussiano se apresentou visualmente como o adequado para o ajuste dos semivariogramas, a partir do qual foi realizada a interpolação dos dados por KS, KO e KU. A Figura 3 reúne os mapas de predição e variância para dois dias representativos dos episódios, segundo as três técnicas de krigagem. Nota-se a manutenção de um mesmo padrão espacial de temperatura do ar, no qual a região central (no inverno) e centro-oeste (no verão) da cidade se apresentaram mais aquecidas, ao passo que as áreas rurais registraram menores temperaturas, bem como maior variância (erro) na predição.



(a): KS (24/07/2022) (b) KO (24/07/2022) (c): KU (24/07/2022)



(d): KS (28/12/2023) (e): KO (28/12/2023) (f): KU (28/12/2023)

Figura 3 - Mapas de predição e variância (erro) de temperatura do ar em Itajubá/MG: (a, d) KS; (b, e) KO; (c, d) KU

A Tabela 1 reúne as métricas de diagnóstico obtidas por meio da validação cruzada. KS e KO foram avaliadas conjuntamente, visto que adotam a estacionariedade de segunda ordem. Em geral, observa-se que o desempenho das técnicas foi semelhante, com subestimação da temperatura na ordem de 10^{-2} °C. Para ME e MSNE, KS e KO tenderam a apresentar menor viés médio, indicando maior acurácia das estimativas quanto aos dados coletados. Por outro lado, KU apresentou melhor desempenho em relação aos erros normalizados através do RMSNE predominantemente inferior ao de KS e KO, com exceção dos valores de 23 de julho que indicaram instabilidade do ajuste do semivariograma para a estrutura espacial dos dados coletados neste dia.

Tabela 1 - Métricas de diagnóstico da KS, KO e KU quanto à predição de temperatura do ar em Itajubá/MG.

Dia de coleta	ME		RMSE		MSNE		RMSNE	
	KS/KO	KU	KS/KO	KU	KS/KO	KU	KS/KO	KU
23/07/2022	-0.0221619	0.9415603	0.8860435	9.419597	-0.0210752	-3.585791	2.67379	151.9579
24/07/2022	-0.0224555	-0.0351637	0.5875081	0.5981402	-0.0264708	-0.0345454	1.372238	1.315352
25/07/2022	-0.0017922	-0.0064486	0.6754256	0.8095507	-0.0110682	-0.0180878	1.536725	1.300142
26/07/2022	-0.0309185	-0.0357895	0.6224056	0.6975507	-0.0333863	-0.0211012	1.954064	1.728271
26/12/2023	-0.0021979	-0.0140785	0.2144215	0.2069718	-0.0065103	-0.0253972	1.076121	0.9263608
27/12/2023	-0.0049809	-0.0084298	0.2505209	0.2316526	-0.0122578	-0.0202882	1.276038	1.17189
28/12/2023	-0.0412586	-0.04976	0.5241044	0.5149439	-0.0513619	-0.0369683	2.345048	1.652667
29/12/2023	-0.0108763	-0.0370484	0.6552543	0.6218869	-0.0152658	-0.0249809	1.497829	1.245333

5. CONCLUSÕES

O desempenho das três técnicas confirma a aplicabilidade da krigagem na predição da temperatura em Itajubá/MG, constituindo um subsídio importante às pesquisas de conforto térmico por permitir a estimação de valores de temperatura nas áreas urbanas e a avaliação espacial do conforto térmico. KS e KO obtiveram menor viés de subestimação (ME e MSNE de -0.014). Já, KU apresentou maior estabilidade quanto aos erros (RMSNE de 1.33). Portanto, cada técnica se destacou conforme o critério de avaliação considerado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. D.; BIUDES, M. S.; VECCHIA, F. A. S. Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. **Revista Geonorte**, v. 1, n. 5, p. 606-618, 2012.

CAMARGO, E. C. G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. (Orgs.). **Geoprocessamento em Projetos Ambientais**. São José dos Campos: INPE, mai. 1998. p. 1-36.

GONÇALVES, F. L. T. **Elementos de Biometeorologia**. 1. ed. São Paulo: Pedagógica Editorial, 2025.

NHANCOLOLO, A. M.; SCALON, J. D.; ALENCAR, A. P. **Introdução à Estatística Espacial**: teoria e aplicações com R. São Paulo: IME/USP, 2026. Disponível em: <https://introducao-a-estatistica-espacial.netlify.app/>.

OKE, T. R. et al. **Urban climates**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

PORANGABA, G. F. O.; TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. Procedimentos metodológicos para análise das ilhas de calor em cidades de pequeno e médio porte. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, jul./dez. 2017.

REBOITA, M. S. et al. Um balanço do curso de ciências atmosféricas no sul de Minas Gerais: ensino, pesquisa, extensão e benefícios à sociedade. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 7, p. 2312-2324, 2016.

TARIFA, J. R. Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São José dos Campos (SP). **Geografia**, Rio Claro, v. 2, n. 4, p. 59-80, out. 1977.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à FAPESP pela bolsa de mestrado (processo nº 2025/17076-7). O terceiro autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade – nível 1D (processo nº 304973/2017-3).