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

Interpolação espacial de variáveis meteorológicas e índices de conforto térmico no Rio Grande do Norte: comparação de métodos em contexto de rede escassa e o papel do vento

Antônio Campos Neto
Licenciado em Geografia, Universidade Federal do Rio Grane do Norte, antoniocamposneto9@gmail.com

RESUMO

Este trabalho avalia métodos de interpolação espacial de variáveis meteorológicas e índices de conforto térmico no Rio Grande do Norte, Brasil, em contexto de escassez de monitoramento e influência persistente dos ventos alísios. A partir de dados horários de 2025 de 22 estações meteorológicas, foram calculados o Índice de Calor (IC) e a Temperatura Efetiva Normal (NET), sendo a segunda diferenciada por incorporar a velocidade do vento. Para interpolação das variáveis primárias foram comparados métodos de krigagem com e sem covariáveis auxiliares; para a interpolação direta da NET, métodos de regressão linear espacial, modelos aditivos generalizados e krigagem com Zonas Climáticas Locais, todos validados por leave-one-out com R^2 e RMSE. Nenhum método mostrou superioridade absoluta, com a regressão linear incorporando altitude e Zonas Climáticas Locais apresentando desempenho mais consistente. Em rede escassa, interpolação direta do índice mostrou-se mais vantajosa que a das variáveis intermediárias. IC e NET divergiram sistematicamente até 10,6 °C às 15 h, com correlação de 0,72 entre velocidade do vento e diferença IC - NET. A escolha do índice em regiões ventiladas não é metodologicamente neutra: índices que ignoram o vento superestimam o estresse de forma homogênea, comprometendo gradientes territoriais relevantes para políticas de adaptação climática.

Palavras-chave: Conforto térmico; Interpolação espacial; Ventos alísios; Temperatura Efetiva Normal; Nordeste brasileiro.

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do conforto térmico humano em espaços abertos constitui tema de crescente relevância no contexto das mudanças climáticas, especialmente em regiões tropicais e semiáridas onde o estresse por calor representa risco direto à saúde da população. No Brasil, estudos sobre conforto térmico urbano têm se concentrado em grandes metrópoles do Sul e Sudeste, com menor cobertura para o Nordeste, região que concentra algumas das condições climáticas mais severas do país, onde iniciativas ainda são escassas e pontuais, como a de Petalas (2015) para a cidade de Fortaleza, CE.

A produção de superfícies contínuas de variáveis meteorológicas a partir de redes de monitoramento esparsas representa um desafio metodológico recorrente, particularmente quando a densidade de estações é insuficiente para capturar a variabilidade espacial em escala regional, sendo necessária a validação empírica para a seleção adequada do método de interpolação (Li; Heap, 2011). Adicionalmente, a escolha do índice de conforto térmico não é indiferente ao contexto climático: índices como o Índice de Calor, amplamente utilizados no Brasil, foram desenvolvidos para climas de baixa ventilação e tendem a superestimar o estresse térmico em regiões sob influência de ventos persistentes, como os alísios que caracterizam o litoral e o interior do Rio Grande do Norte (Rothfusz, 1990; Li; Chan, 2000).

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é explorar métodos para interpolação de variáveis meteorológicas em nível estadual, num contexto de escassez de pontos de coleta. Avaliando a eficácia dessas interpolações, ao compará-las entre si e ao modelar índices de conforto térmico diretamente, ao invés das variáveis para seu cálculo.

3. MÉTODO

A área de estudo compreende o estado do Rio Grande do Norte, situado na porção setentrional do Nordeste brasileiro, território marcado por forte gradiente longitudinal entre o litoral oriental úmido e o sertão semiárido interior, e submetido durante todo o ano à influência persistente dos ventos alísios de sudeste, sobretudo na faixa litorânea. Possui temperaturas médias variando de 20 °C a 28 °C, precipitação de 800 mm a 1500 mm por ano, a depender da região do Estado. A base de dados resulta da integração de duas redes complementares de monitoramento, vista na figura 1: 15 estações da EMPARN, concentradas no interior, e 7 estações do INMET, totalizando 22 pontos de observação distribuídos pelo território estadual. Foram utilizados dados horários do ano de 2025 para as variáveis temperatura do ar (T), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (V), submetidos a controle de qualidade e agregados em médias para quatro horários sinóticos representativos do ciclo diurno (00 h, 09 h, 15 h e 21 h, horário local), com todas as análises dos dados feitas em ambiente RStudio.

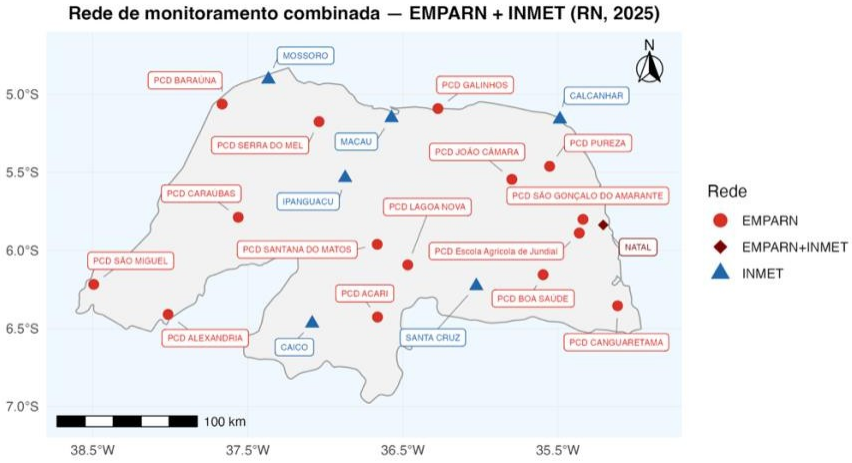

Figura 1 - Rede combinada de monitoramento. (Elaboração Autoral, 2026)

A partir dessas variáveis primárias foram calculados dois índices de conforto térmico de fundamentação conceitual distinta: o Índice de Calor (IC), na formulação de Rothfusz (1990), expressa a temperatura aparente considerando exclusivamente temperatura e umidade, desprezando o efeito do vento, e a Temperatura Efetiva Normal (NET), na formulação de Li e Chan (2000), que incorpora explicitamente a velocidade do vento como variável de resfriamento, adaptado ao clima tropical. O IC e a NET foram calculados respectivamente conforme equações 1 e 2 a seguir:

$$IC = c1 + c2 \cdot T + c3 \cdot R + c4 \cdot T \cdot R + c5 \cdot T^2 + c6 \cdot R^2 + c7 \cdot T^2 \cdot R + c8 \cdot T \cdot R^2 + c9 \cdot T^2 \cdot R^2 \quad \text{Equação (1)}$$

$$NET = 37 - [(37 - T)/(0{,}68 - 0{,}0014 \cdot UR + 1/(1{,}76 + 1{,}4 \cdot V\text{^}0{,}75))] - 0{,}29 \cdot T \cdot (1 - UR/100) \quad \text{Equação (2)}$$

Para a modelagem das superfícies contínuas de T, UR e V, adotou-se estratégia de validação cruzada sistemática de múltiplos métodos. Foram comparados três métodos de krigagem: krigagem ordinária (KO), a krigagem com deriva externa usando altitude como covariável (KDE_alt), e a krigagem com deriva externa usando altitude e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (KDE_alt_ndvi). Para a interpolação direta da NET, foram adicionalmente testados seis métodos agrupados em três famílias: regressão linear espacial (LM_coords, LM_coords_alt, LM_coords_alt_lcz), modelos aditivos generalizados (GAM_coords, GAM_coords_alt) e krigagem com auxílio das Zonas Climáticas Locais via pacote LCZ4r (Anjos et al., 2025), que utiliza a classificação de Stewart e Oke (2012). A validação empregou o método leave-one-out (LOOCV), com cálculo do coeficiente de determinação (R^2) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Por fim, a relação entre o regime de vento e a divergência entre os índices foi investigada por análise direta da correlação entre a velocidade do vento observada e a diferença IC - NET, e por um Modelo Aditivo Generalizado (GAM) ajustado para visualizar o efeito marginal não-linear do vento sobre a NET.

RESULTADOS

A interpolação direta da NET por meio dos seis métodos testados apresentou desempenho variável conforme o horário sinótico (Tabela 1). Às 00 h, o método LM_coords obteve o maior R^2 (0,297), com RMSE

equivalente ao LM_coords_alt_lcz (3,25 °C). Às 09 h, LM_coords e LM_coords_alt_lcz apresentaram desempenho equivalente (R^2 = 0,335; RMSE = 2,46 °C). Às 15 h, LM_coords_alt e LM_coords_alt_lcz empataram em R^2 (0,387), com o menor RMSE registrado em LM_coords_alt (1,23 °C). Às 21 h, todos os métodos apresentaram baixo desempenho preditivo, com o LCZ4r registrando o maior R^2 (0,102) e LM_coords o menor RMSE (2,76 °C).

Tabela 1 - R^2 e RMSE da validação cruzada leave-one-out (LOOCV) para seis métodos de interpolação aplicados diretamente à NET, nos quatro horários sinóticos.

Família	Método	R^2 00h	R^2 09h	R^2 15h	R^2 21h	RMSE 00h	RMSE 09h	RMSE 15h	RMSE 21h
Regressão linear	LM_coords	**0,297**	**0,335**	0,369	0,019	3,26	**2,46**	1,34	**2,76**
	LM_coords_alt	0,002	0,003	**0,387**	0,014	4,22	3,45	**1,23**	3,78
	LM_coords_alt_lcz	0,290	**0,335**	**0,387**	0,060	**3,25**	**2,46**	1,54	3,45
GAM	GAM_coords	0,122	0,013	0,371	0,017	4,22	2,97	1,36	**2,76**
	GAM_coords_alt	0,002	0,060	0,245	0,022	4,72	3,02	1,34	3,55
Krigagem LCZ	LCZ4r (lcz4r)	0,014	0,085	0,320	**0,102**	s/d	s/d	3,44	s/d

Células em verde: melhor desempenho (maior R^2 ou menor RMSE) por horário. Fonte: Elaboração Autoral (2026).

Observa-se então, a não identifação de um método único superior em todos os horários, dentre os analisados. O método LM_coords_alt_lcz, ao combinar latitude e longitude, altitude e Zonas Climáticas Locais como covariáveis, foi o que apresentou desempenho mais consistente, superando ou empatando em três dos quatro horários, quando consideradas simultaneamente as métricas R^2 e RMSE. O LCZ4r, embora apresente melhor R^2 às 21 h, registrou RMSE substancialmente superior aos demais métodos no horário das 15 h (3,44 °C contra valores entre 1,23 e 1,54 °C), o que limita sua adequação a esse horário indicado.

Para as variáveis primárias T, UR e V, o desempenho dos três métodos de krigagem variou conforme a variável e o horário, que pode ser visto na Tabela 2. As tentativas de interpolação da temperatura do ar apresentaram desempenho geral baixo, com R^2 entre 0,000 e 0,249, refletindo a limitação da densidade da rede para essa variável. A umidade relativa apresentou o maior R^2 do conjunto (00, KO às 15 h), com a krigagem ordinária superando os demais métodos em três dos quatro horários. A velocidade do vento, por sua vez, foi melhor representada pela krigagem ordinária em três horários, com pico de R^2 (0,568) às 15 h. O NDVI mostrou-se covariável de baixa utilidade, apresentando o pior desempenho em todas as combinações testadas.

Tabela 2 - R^2 da validação cruzada leave-one-out (LOOCV) para três métodos de krigagem aplicados às variáveis meteorológicas primárias nos quatro horários sinóticos.

Variável	Método	00 h	09 h	15 h	21 h
T (°C)	KO	0,137	0,135	**0,149**	**0,003**
	KDE_alt	**0,199**	**0,249**	0,060	0,001
	KDE_alt_ndvi	0,031	0,013	0,021	0,000
UR (%)	KO	0,110	**0,016**	**0,781**	**0,302**
	KDE_alt	**0,393**	0,000	0,514	0,160
	KDE_alt_ndvi	0,051	0,000	0,160	0,164
V (m/s)	KO	**0,125**	**0,157**	**0,568**	0,134
	KDE_alt	0,072	0,083	0,015	**0,194**
	KDE_alt_ndvi	0,006	0,016	0,025	0,004

Células em verde: maior R^2 por variável e horário. Fonte: EMPARN + INMET + NDVI Landsat 9 (2025), Elaboração Autoral (2026).

A comparação entre os dois índices revelou divergência sistemática: às 15 h, o IC médio atingiu 32,9 °C enquanto a NET média foi de 22,3 °C, diferença de aproximadamente 10,6 °C calculada sobre as mesmas

observações. A análise das 139.247 observações horárias evidenciou que essa divergência está empiricamente associada ao regime de vento, com coeficiente de correlação de Pearson de 0,72 entre a velocidade do vento e a diferença IC - NET. A divergência cresce com o vento: em calmaria a diferença média foi de 3,0 °C, na faixa típica dos alísios (3 a 4 m/s) atingiu 7,3 °C e em ventos intensos (7 a 10 m/s) chegou a 9,6 °C. A convergência entre os dois índices em calmaria fornece evidência empírica de que a divergência decorre da incorporação do vento na formulação da NET, e não de diferenças nas demais variáveis.

Essa diferença de valores é importante pois, em sistemas de classificação como NOAA para o IC, o índice de calor pode ser interpretado de maneira a supernotificar temperaturas altas demais, mesmo em áreas onde a ventilação exerce poder de resfriamento claro, como mostra a NET.

Conclusões

Os resultados indicam ausência de superioridade absoluta de um único método de interpolação para a NET no contexto estudado, com LM_coords_alt_lcz apresentando o desempenho mais consistente quando consideradas simultaneamente as métricas R^2 e RMSE em todos os horários. Para as variáveis primárias, a krigagem ordinária mostrou-se adequada à umidade e ao vento, enquanto a temperatura registrou desempenho baixo em todos os métodos. Uma limitação clara deste trabalho é a rede escassa de monitoramento, tanto geograficamente quanto à quantidade de pontos, como em âmbito temporal, pois a expansão dela é recente, por isso também, 2025 foi escolhido como o ano de análise, ao invés de uma série histórica mais robusta, com mais de 30 anos, por exemplo. Também, os índices utilizados não possuem validação fisiológica, embora trabalhos como o de Pantavou (2024) tenha encontrado semelhanças entre o UTCI e o NET.

Adicionalmente, a divergência entre IC e NET, associada ao regime de ventos alísios demonstra que índices que ignoram o vento, como o IC, tendem a superestimar o estresse térmico de forma homogênea sobre o território, reduzindo a capacidade de distinguir áreas de risco real daquelas em que o vento exerce efeito atenuador significativo. Diagnósticos uniformemente inflados comprometem a priorização de recursos entre gestores e população. Mesmo sendo de clima quente, o Rio Grande do Norte apresenta heterogeneidade interna que somente índices sensíveis ao vento são capazes de capturar adequadamente. Nesse sentido, propõe-se para trabalhos futuros a adoção de índices mais precisos, como a NET calibrada pelo Weather Stress Index, que identifica desvios reais em relação ao histórico local, permite sinalizar o risco térmico de forma ao mesmo tempo rigorosa e territorialmente diferenciada, fornecendo subsídio mais robusto para a alocação de recursos e para políticas de adaptação climática no semiárido e no litoral do Nordeste brasileiro

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, M. et al. **lcz4r: An R package for Local Climate Zone analysis**. *Scientific Reports*, 2025.

LI, P. W.; CHAN, S. T. **Adaptation of the Normal Effective Temperature to a subtropical climate**. *Meteorological Applications*, v. 7, n. 4, p. 369 - 375, 2000.

LI, J.; HEAP, A. D. **A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors**. *Ecological Informatics*, v. 6, n. 3 - 4, p. 228 - 241, 2011.

PANTAVOU, K. et al. **Evaluating the performance of thermal comfort indices in a Mediterranean climate**. *International Journal of Biometeorology*, v. 68, p. 79 - 87, 2024.

PETALAS, K. V. **Estudo da sensação térmica e definição de limites de conforto para espaços abertos na cidade de Fortaleza, CE**. 2015. 272 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

ROTHFUSZ, L. P. **The heat index equation**. Fort Worth: National Weather Service Southern Region Technical Attachment SR/SSD 90-23, 1990.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. **Local Climate Zones for urban ecosystem studies**. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012.