

ILHAS DE CALOR EM FLORIANÓPOLIS (SC): UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE MÉTODOS DE MODELAGEM ESPACIAL

Geisa Rocha

Université de Moncton

Vincent Dubreuil

Université Rennes 2

Gabriela Goudard

Universidade Federal do Ceará

RESUMO

As ilhas de calor urbanas (ICU) fazem parte da realidade das cidades brasileiras, sendo ainda pouco exploradas em ambientes costeiros e insulares. O presente artigo coloca em evidência uma caracterização da ICU em Florianópolis e discute as potencialidades e limitações de técnicas de modelagem espacial (kriging, ponderação pelo inverso da distância e regressão linear múltipla), em contextos de baixa amostragem. Para tanto, foram utilizados dados horários de 12 estações meteorológicas e as modelagens foram realizadas para um dia de estabilidade atmosférica. Os resultados evidenciaram um padrão noturno clássico da ICU, com efeitos da sazonalidade. Dentre as modelagens espaciais aplicadas, a regressão linear múltipla foi a que apresentou os resultados mais precisos, considerando as particularidades geográficas do recorte espacial da pesquisa.

Palavras-chave: Climatologia urbana; cidade litorânea; geoestatística; Sul do Brasil.

ABSTRACT

Urban heat islands (UHIs) are a reality in Brazilian cities yet remain underexplored in coastal and insular environments. This article presents a characterization of UHI in Florianópolis and discusses the potential and limitations of spatial modeling techniques (kriging, inverse distance weighting, and multiple linear regression) in contexts with limited sampling. Hourly data from 12 weather stations were used, and the models were applied to a day with stable atmospheric conditions. The results revealed a classic nocturnal UHI pattern, with seasonal influences. Among the spatial modeling methods tested, multiple linear regression provided the most accurate results, considering the geographical particularities of the study area.

Key words: Urban climatology; coastal city; geostatistics; Southern Brazil.

INTRODUÇÃO

A ilha de calor, uma das manifestações mais conhecidas do clima urbano, tem sido amplamente estudada nas últimas duas décadas, especialmente em grandes centros urbanos, onde os seus efeitos são mais perceptíveis para a população. No entanto, cidades de médio e pequeno porte também vêm sendo objeto de pesquisa sobre o campo térmico, uma vez que a urbanização tem modificado significativamente suas paisagens naturais (MENDONÇA, 1995; AMORIM, 2017).

No contexto do presente artigo, ilha de calor urbana (ICU) pode ser definida como a diferença de temperatura entre a cidade e seu entorno não urbano ou rural. Trata-se de um fenômeno que pode se manifestar de diferentes formas, dependendo dos métodos e técnicas utilizados para o registro da temperatura. Segundo Oke *et al.* (2017), há quatro tipos principais de ICU: da camada limite, da camada do dossel urbano, superficial e subsuperficial, sendo que a análise conduzida neste estudo se concentra na ICU da camada do dossel urbano, referida aqui como ICU atmosférica.

Uma análise realizada das publicações científicas indexadas na Scopus, banco de dados que reúne mais de 28 mil revistas científicas globalmente, revelou, aproximadamente, 14.600 artigos sobre "ilha de calor urbana" entre 1967 e 2025. Tendo em vista os referidos dados, observou-se um crescimento significativo do número de estudos a partir dos anos 2000, um reflexo do crescente interesse global pelas questões ambientais e climáticas, que afetam de maneira cada vez mais direta a população urbana. Além disso, esse aumento pode ser atribuído ao avanço das pesquisas sobre mudanças ambientais, urbanização e ao aprimoramento das tecnologias de sensoramento remoto e de modelagem.

No Brasil, os estudos em climatologia urbana começaram a se expandir para cidades de médio e pequeno porte, especialmente no final da década de 1980, cerca de duas décadas após o país se tornar majoritariamente urbano (Santos, 2005). Contudo, ainda são poucos os trabalhos que se dedicam à análise das particularidades das cidades costeiras (Moura *et al.*, 2008; Lucena *et al.*, 2012; Santiago e Gomes, 2016; Anjos *et al.*, 2017; Gomes *et al.*, 2017; Correa *et al.*, 2022) e, sobretudo, daquelas insulares (Rocha *et al.*, 2024).

Dessa forma, a compreensão das ICU em ambientes costeiros e insulares ganha relevância no contexto brasileiro e insere-se na perspectiva do presente trabalho, ao adotar Florianópolis (Figura 1), capital do Estado de Santa Catarina, como área de investigação. Há que se destacar também, que para além do entendimento das ICU em termos de ocorrência e variabilidade espaço-temporal, à exploração de técnicas de modelagem aplicadas à espacialização destes fenômenos em ambientes complexos, como o recorte adotado nesta pesquisa, torna-se fundamental. A interação entre as particularidades físicas de um sítio costeiro e insular e os processos de urbanização impõe desafios específicos à análise térmica, tornando essencial o aprimoramento dos métodos de modelização da ICU para uma melhor compreensão de suas dinâmicas.

O mapeamento da ICU continua a representar um desafio significativo para a climatologia urbana, mesmo diante dos avanços tecnológicos das últimas décadas. Esta espacialização exige a conversão de dados pontuais em representações contínuas, e diferentes procedimentos têm sido empregados com essa finalidade. Destacam-se, entre os mais utilizados, as técnicas de interpolação espacial, como a krigagem e a ponderação pelo inverso da distância (PID, também conhecida pela sigla IDW – *Inverse Distance Weighted* – em inglês), e a regressão linear múltipla (RLM). De modo complementar, abordagens como a classificação das Zonas Climáticas Locais (LCZ), proposta por Stewart e Oke (2012), embora não empregadas diretamente na espacialização das ICU, contribuem para contextualizar os ambientes urbanos e orientar a localização dos pontos de coleta. As imagens termais também são utilizadas em estudos voltados à identificação de ICU de superfície (Amorim, 2019). Contudo, no presente trabalho, optou-se por não utilizar as imagens termais, priorizando abordagens que dialoguem com as limitações de campo e os objetivos específicos da pesquisa.

A principal limitação enfrentada na modelagem desse fenômeno é o número reduzido de pontos de medição, o que impõe restrições importantes à aplicação de métodos geoestatísticos. Além dos desafios metodológicos, a operacionalização da coleta de dados para fins de mapeamento térmico enfrenta limitações práticas importantes. Em muitos contextos urbanos, especialmente em países com restrições de infraestrutura, a instalação de redes densas de sensores ou estações meteorológicas configura-se como um obstáculo logístico e financeiro. Questões como segurança dos equipamentos, dificuldade de acesso a determinados locais e limitações orçamentárias comprometem a implementação de estratégias mais robustas de monitoramento.

Diante desse contexto, o presente artigo tem como objetivo apresentar uma caracterização da ilha de calor urbana em Florianópolis e discutir as potencialidades e limitações de três técnicas de modelagem espacial amplamente utilizadas. A análise concentra-se na comparação entre krigagem, PID e RLM, observando seu desempenho em um contexto urbano litorâneo e insular com número limitado de pontos de coleta.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: O CLIMA URBANO DE FLORIANÓPOLIS E SEUS REFLEXOS NA CONFIGURAÇÃO DA ILHA DE CALOR

Localizada entre as latitudes de 27°15' S e 27°45' S, Florianópolis, capital do Estado de Santa Catarina, é a segunda maior ilha-capital do Brasil, com 97% de seus 675,4 km² situados em ambiente insular (Rocha, 2021). A porção continental do município faz limite com São José, que, por sua vez, limita-se ao norte com Biguaçu e ao sul com Palhoça. Os municípios citados têm suas áreas integradas e vinculadas socioeconomicamente, em um processo denominado de conurbação. Todavia, a área conurbada é interrompida por uma descontinuidade natural, o mar, que separa a ilha do continente (Rocha, 2021). A figura 1 mostra a localização da área de estudo, bem como o climograma com a normal climatológica de 1991 a 2020, elaborado a partir de dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022).

A influência da maritimidade se manifesta de forma contínua e significativa nos elementos climáticos, especialmente na precipitação, que apresenta um padrão relativamente estável ao longo do ano, com um aumento mais acentuado na primavera e no verão. Essa condição não apenas contribui para o controle da temperatura do ar, mas também mantém a umidade relativa elevada ao longo de todo o ano, variando entre 60% e 80%. De acordo com a mais recente Normal Climatológica (1991-2020) do INMET (2022), apresentada na Figura 1, a precipitação média anual é de 1.766 mm, destacando-se entre os meses de setembro a março. No que se refere à temperatura do ar, a média anual é de 21,1°C, com janeiro sendo o mês mais quente (25,2°C) e julho o mais frio (16,5°C).

A análise do clima urbano na área estudada deve considerar não apenas as características locais, fundamentais para a compreensão da ICU nessa escala, mas também os elementos sinóticos que atuam na região, pois eles interagem com os componentes locais e influenciam a sua manifestação. Nesse sentido, em escala sinótica, é possível examinar as condições atmosféricas do sul do Brasil, que, embora apresentem certa uniformidade em nível estadual, possuem particularidades específicas na faixa litorânea. A figura 2 mostra as principais massas de ar e centros de ação

que atuam sobre o Brasil, bem como um recorte da região subtropical que expõe os tipos climáticos, conforme a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013).

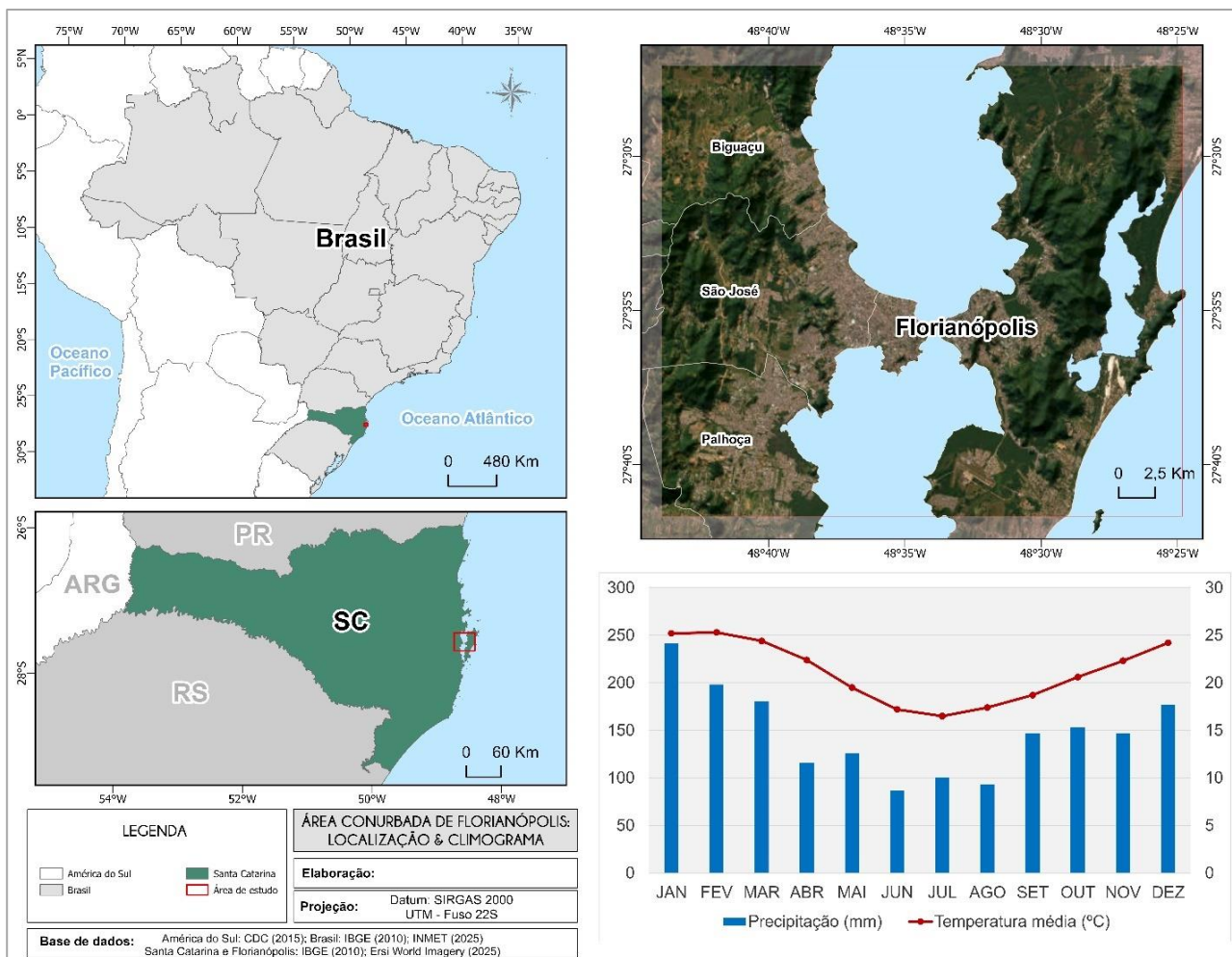


Figura 1 – Caracterização da área de estudo: localização de Florianópolis (SC) e climograma de 1991 a 2020. Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta um clima predominante do tipo Cfa, com variabilidades interanuais, definido como temperado, sem estação seca e com verões quentes (Dubreuil *et al.*, 2018). Esse padrão climático é influenciado não apenas pelos elementos já mencionados, mas também pela atuação e interação das massas de ar Polar (mPa) e Tropical Atlântica (mTa). De acordo com Mendonça (2002), além desses sistemas atmosféricos, fatores geográficos desempenham um papel essencial na configuração de um clima subtropical. Entre eles, destaca-se a baixa continentalidade na porção meridional da América do Sul, que impede um resfriamento intenso capaz de gerar grandes anticiclones térmicos.

O Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul (ASAS), em conjunto com a Massa Tropical Atlântica (mTa), desempenha um papel fundamental no aumento das temperaturas e na predominância de ventos dos quadrantes norte e nordeste. A mTa, de origem marítima, forma-se no ASAS e atua com

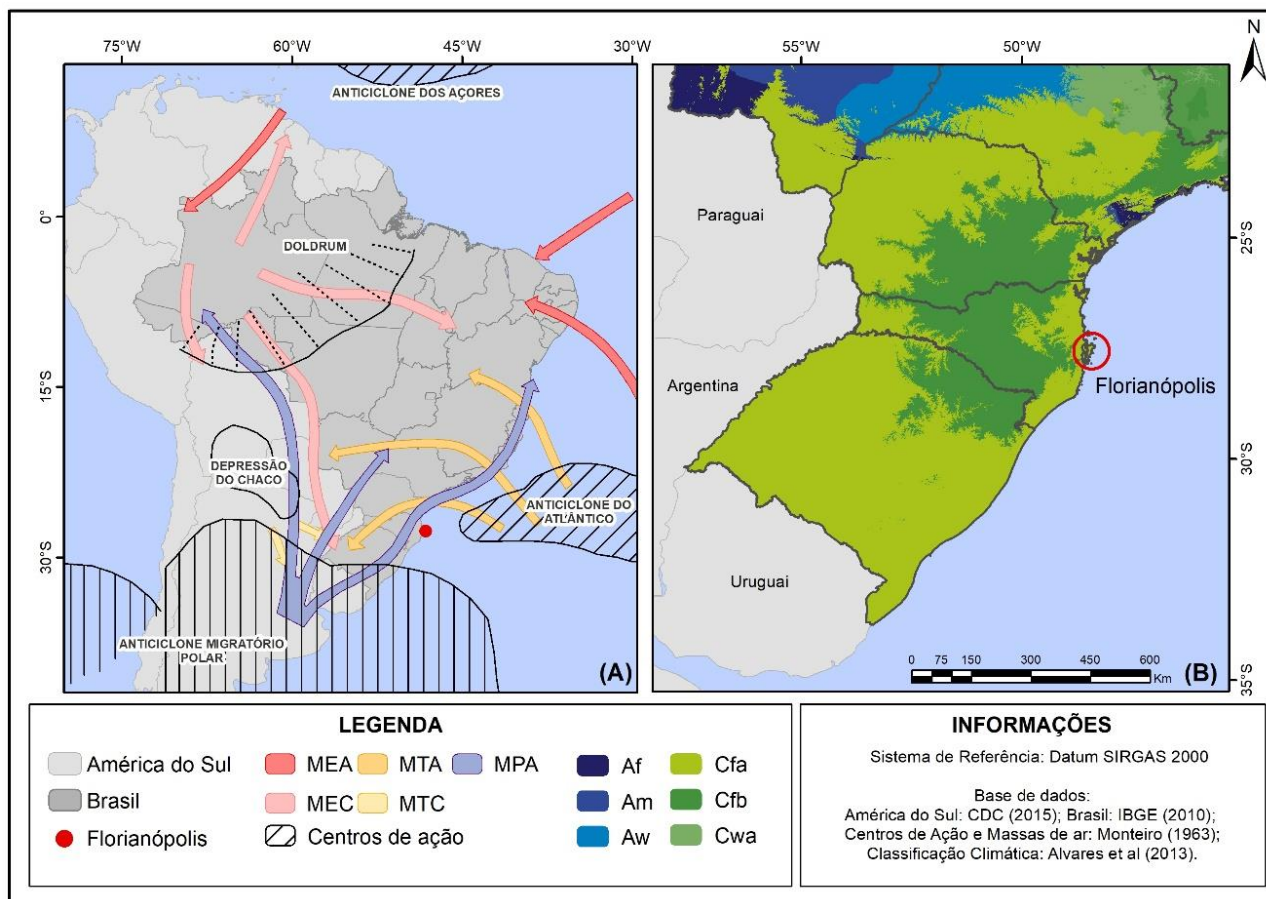


Figura 2 – Caracterização climática: tipologia e sistemas atmosféricos – (A) Centros de ação e massas de ar; (B) Classificação climática de Köppen, conforme Alvares *et al.* (2013). Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

maior intensidade no verão, sendo responsável pelas temperaturas elevadas em fevereiro, quando as máximas podem variar entre 30°C e 40°C. O aquecimento basal torna a mTa instável em sua porção inferior, favorecendo a formação de nuvens que resultam em pancadas de chuva isoladas e/ou intensas, geralmente acompanhadas de rajadas de vento, trovoadas e descargas elétricas no final do dia (Mendonça, 2002).

Em contrapartida, a Massa Polar Atlântica (mPa), sob influência do Anticiclone Migratório Polar, encontra-se atrelada a ventos de quadrante sul, reduzindo a umidade e as temperaturas, especialmente no inverno. As variações nos padrões atmosféricos são fortemente influenciadas pelos sistemas frontais, com destaque para a Frente Polar Atlântica, que se forma no encontro entre a mTa e a mPa, desempenhando um papel essencial na dinâmica climática da região, especialmente no regime de pluviosidade.

É relevante destacar, neste ponto da análise sinótica, que a atuação da mPa ou da mTa está diretamente associada a uma maior probabilidade de ocorrência de dias estáveis, caracterizados por baixa ou nenhuma nebulosidade e ventos ausentes ou de fraca intensidade, conforme observado por Rocha *et al.* (2020). Segundo esses autores, essa condição favorece um desenvolvimento mais intenso da ICU na região, resultando em diferenças de temperatura entre áreas urbanas e não urbanas que podem atingir magnitudes consideráveis, frequentemente superiores a 4°C.

No contexto do clima urbano, é importante considerar que suas características não são homogêneas entre as cidades, pois variam de acordo com os aspectos estruturais, morfológicos e funcionais de cada área urbana. Essas diferenças resultam em distintos padrões de uso do solo e, conseqüentemente, em interações específicas com a camada de ar imediata (Danni, 1987). Dessa forma, o clima urbano se configura como uma modificação local das condições atmosféricas, influenciado tanto pelo clima regional, no qual a cidade está inserida, quanto pelas características naturais e pelo nível de urbanização (Monteiro, 1976).

Tendo isso em vista, ao analisar o clima urbano de Florianópolis, torna-se essencial compreender como os processos de urbanização e suas especificidades interferem nas dinâmicas atmosféricas locais, estabelecendo particularidades que diferenciam a cidade dentro do contexto climático regional.

Conforme discutido anteriormente, a urbanização da aglomeração apresenta um padrão descontínuo devido à presença do mar. Além disso, as características do relevo na porção insular, composta predominantemente por maciços cristalinos orientados no sentido nordeste-sudeste e fragmentados em setores norte e sul, juntamente com planícies costeiras em seu entorno, influenciam a distribuição espacial das áreas urbanizadas. Somam-se a esses fatores as influências da colonização portuguesa, que contribuíram para a formação de um padrão urbano polinucleado, com maior densidade populacional concentrada na península central (Rocha, 2021).

Na década de 1970, quando o Brasil se tornou predominantemente urbano, Florianópolis e os municípios vizinhos da conurbação experimentaram uma expansão urbana significativa. Segundo dados da prefeitura da capital, a área urbanizada do núcleo metropolitano em 1977 era de 40,5 km², três vezes a área observada em 1950. Em termos populacionais, os quatro municípios somavam aproximadamente 106 mil habitantes em 1950, número que cresceu para cerca de 335 mil em 1980. De acordo com o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a aglomeração conta com 1,1 milhão de habitantes, sendo cerca de 48,8% (537.213 habitantes) residentes em Florianópolis.

A economia dos municípios da região conurbada tem forte base no setor terciário, e durante o verão, Florianópolis experimenta um expressivo aumento na circulação de pessoas. Segundo a Secretaria de Turismo, em 2023, a cidade recebeu aproximadamente 1,5 milhão de visitantes (Prefeitura Municipal De Florianópolis, 2024). A ampla divulgação de Florianópolis como uma das capitais brasileiras com a melhor qualidade de vida, aliada à expansão de novos usos residenciais e comerciais, tem reconfigurado sua estrutura urbana, gerando novas centralidades, ao mesmo tempo em que aprofunda desigualdades socioespaciais (Siqueira e Lucas, 2023). Esse crescimento, somado ao intenso fluxo de pessoas e veículos, contribui para a intensificação da ICU, tornando as áreas densamente ocupadas ainda mais quentes.

Diante desse contexto, a partir do monitoramento meteorológico diário realizado entre agosto de 2018 e julho de 2019, Rocha (2021) identificou a presença de ICU descontínuas na área conurbada. Esse padrão corresponde ao conceito de "arquipélagos de calor" descrito por Mendonça (2002), que se refere a núcleos isolados de ICU distribuídos ao longo das áreas urbanas e periurbanas, refletindo a fragmentação espacial da região.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta de dados para a análise das ilhas de calor

Para a medição da temperatura, utilizada posteriormente no cálculo da ICU (considerando a diferença entre a temperatura de pontos urbanos e de pontos não-urbanos/rurais), as técnicas mais comuns incluem estações meteorológicas, sensores, transectos móveis e estimativas de temperatura do ar obtidas por satélites nos canais termais (Amorim, 2019). Para este estudo de caso, foram utilizados os dados horários de 6 estações meteorológica *Davis Vue* de rede própria e 6 estações pertencentes a instituições públicas (figura 3). A coleta de dados foi realizada ao longo de um ano, de agosto de 2018 a julho de 2019.

Para o cálculo da ICU, seguindo a metodologia adotada em diversos estudos sobre o tema (Amorim *et al.*, 2015; Amorim e Dubreuil, 2017; Foissard *et al.*, 2019; Rocha, 2021), foi definida a diferença entre a temperatura em um ponto de referência urbano (destacado em vermelho na Figura 3) e um ponto não urbano. Essa relação é expressa pela equação:

$$T_{ICU} = T_{REF-URB} - T_{REF-RUR}$$

Em que:

T_{ICU} = Temperatura da ICU

T_{REF} = Temperatura de referência

T_{URB} = Temperatura do ponto de referência urbano

T_{RUR} = Temperatura do ponto de referência rural / não urbano

O ponto de referência urbano está localizado na península central insular de Florianópolis, em uma área caracterizada por rodovias de intenso tráfego e edifícios com altura média de 10 andares. Em contrapartida, para o ponto de referência não urbano ou rural, optou-se pela Estação Ecológica de Carijós, situada na porção norte da ilha. Trata-se de uma unidade de conservação ambiental com vegetação densa, servindo como um ambiente representativo das áreas naturais da região.

Para avaliar a interpolação em áreas sem medições diretas, foram selecionados oito pontos auxiliares (destacados em amarelo na Figura 3), posicionados aleatoriamente, porém intencionalmente fora da rede de amostragem. A classificação das LCZ foi realizada por meio do LCZ Generator, disponibilizado pelo projeto WUDAPT (Demuzere *et al.*, 2021), com base no esquema originalmente proposto por Stewart e Oke (2012). De acordo com essa classificação, os pontos 1, 5 e 7 encontram-se na classe A, caracterizada por áreas com árvores densas; os pontos 2 e 8 localizam-se na zona 9, de construções esparsas; os pontos 3 e 6 pertencem à classe 6, de baixa densidade com prédios baixos; e o ponto 4 está situado na zona 5, correspondente a baixa densidade

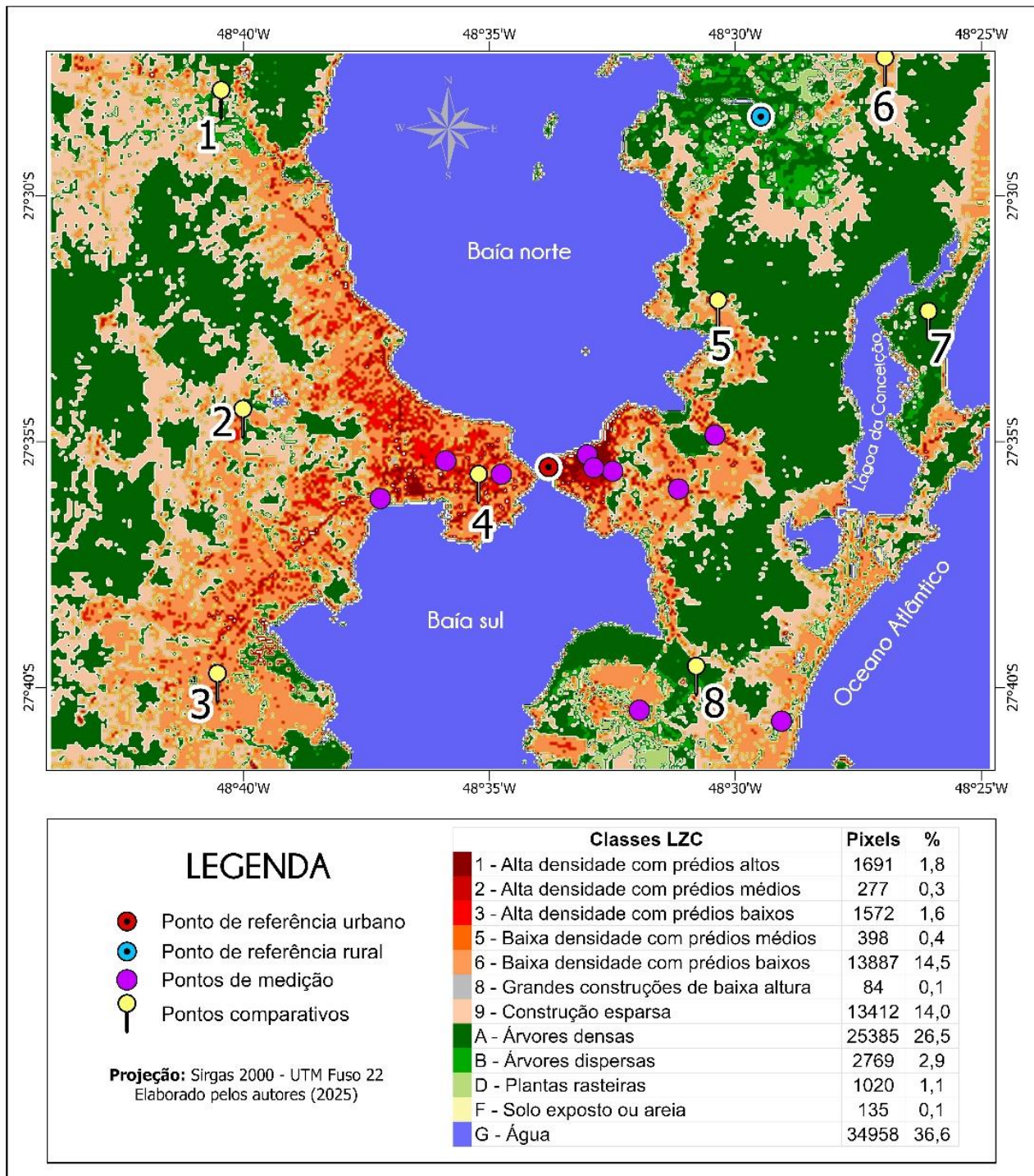


Figura 3 – Localização dos pontos de referência e de medição para o cálculo da ICU e as classes das zonas climáticas locais (LCZ). Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

com prédios de altura média. Esses pontos foram utilizados para comparar os resultados obtidos pelos diferentes modelos, contribuindo para a análise da precisão das estimativas. O processo de interpolação é detalhado no item seguinte.

Cabe destacar que, como grande parte dos pontos de medição está localizada em áreas de baixa altitude, optou-se por aplicar uma máscara para excluir as regiões com altitudes superiores a 100 metros. Essa decisão visou preservar a coerência dos modelos, evitando distorções associadas a superfícies mais elevadas que, embora presentes na área de estudo, não são representativas da amostra utilizada.

Análise comparativa de técnicas de modelagem espacial para a espacialização das ilhas de calor

No que se refere à modelagem de ICUs, conforme Foissard *et al.* (2019) e Brabant *et al.* (2024), podem ser utilizados diferentes métodos, entre eles os geoestatísticos e os de análise multicritério. No intuito de evidenciar potencialidades e limitações de diferentes técnicas, no presente artigo, as análises comparativas basearam-se em três métodos distintos, quais sejam: a ponderação pelo inverso da distância (PID), a krigagem e a regressão linear múltipla (RLM), cujas representações encontram-se evidenciadas na Figura 4.

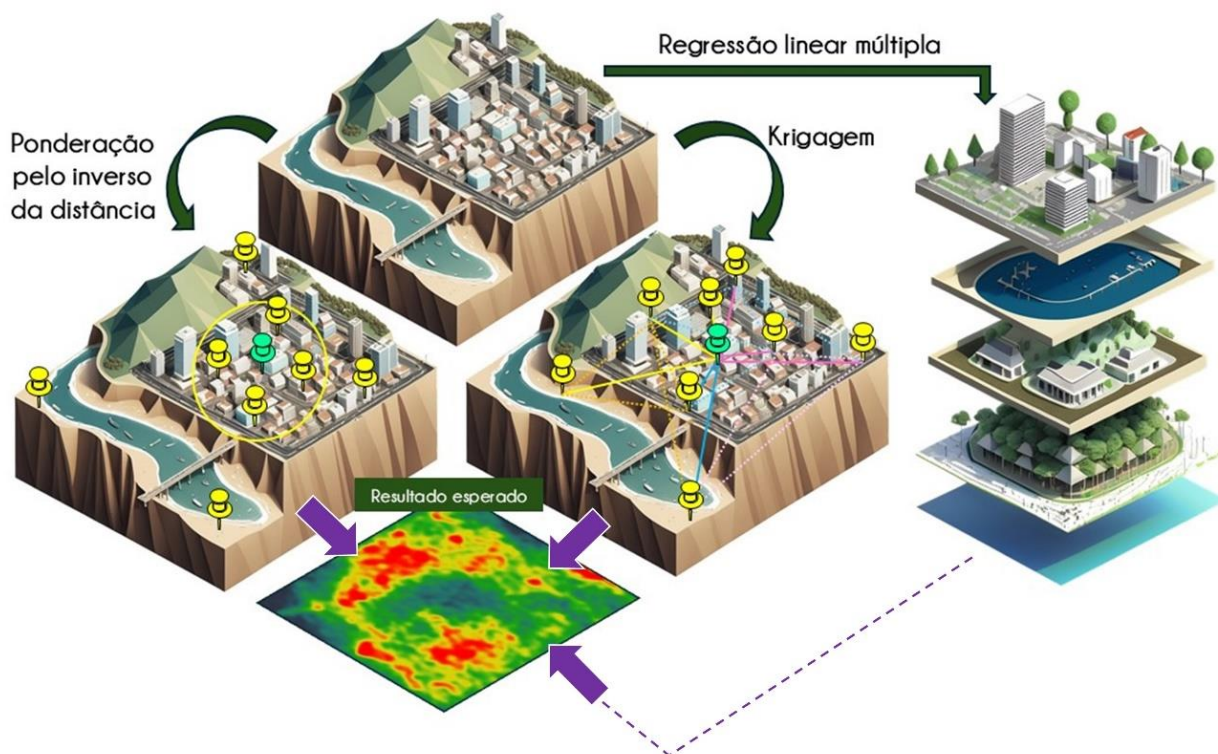


Figura 4 – Representações conceituais dos elementos considerados em cada técnica de modelagem. Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

A interpolação geoestatística baseia-se no princípio da autocorrelação espacial, que considera a semelhança entre um ponto e seu entorno. Tanto a PID quanto a krigagem são técnicas de interpolação geoestatística. A PID atribui maior peso aos valores observados mais próximos ao local não amostrado. Na Figura 4, a representação desse método mostra os pontos de medida dentro do círculo amarelo, que possuem valores semelhantes, indicando uma tendência espacial próxima. O ponto verde, por sua vez, representa o valor interpolado, estimado a partir das amostras vizinhas.

A krigagem, por sua vez, leva em consideração a correlação espacial entre os pontos amostrados, utilizando a média e a variabilidade espacial para otimizar as estimativas. Na representação expressa na figura 4, o ponto verde corresponde ao valor interpolado, calculado a partir da média ponderada e da variância dos pontos vizinhos.

Por outro lado, a regressão linear múltipla permite estabelecer relações entre variáveis independentes e dependentes em diferentes pontos espaciais. Dessa forma, além das medições de temperatura de uma ICU, é possível integrar outras camadas de informação, como a presença de vegetação, o tipo de urbanização, características do relevo, entre outros fatores. Cada um desses métodos apresenta abordagens distintas, com vantagens e limitações, tornando essencial a escolha do mais adequado de acordo com as especificidades do fenômeno estudado e da área de aplicação.

Dessa forma, no intuito de comparar as diferentes técnicas apresentadas, foi selecionado um dia com condições de estabilidade atmosférica, conforme a metodologia adotada por Rocha *et al.* (2020), caracterizado por ventos fracos e cobertura de nuvens escassa ou inexistente. O dia escolhido foi 7 de agosto de 2018, durante o inverno, marcado pela presença de uma mPa. Considerando que a ICU é um fenômeno predominantemente noturno e que seu cálculo foi realizado por hora, optou-se por modelá-la às 3h, visando otimizar tanto a representatividade do fenômeno quanto a eficiência dos modelos (Oke *et al.*, 2017).

Com relação à regressão linear múltipla, o cálculo foi realizado com base na magnitude da ICU no dia 07/08/2018 às 3h nos pontos de medição e nos parâmetros geográficos da superfície. A RLM pode ser expressa pela equação:

$$Y' = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon$$

Em que:

- Y' representa a temperatura estimada da ICU pelo modelo,
- β_n são os coeficientes do modelo a serem determinados,
- x_n correspondem aos parâmetros geográficos considerados (distância em relação ao mar, urbanização e vegetação),
- ε representa os resíduos da equação.

A partir dos melhores resultados da regressão, foram determinados os coeficientes de cada parâmetro geográfico e suas relações, permitindo identificar as variáveis espaciais mais relevantes

para cada aspecto analisado e estimar os resultados para as áreas sem medições diretas. Para este estudo, foram consideradas as seguintes classes: distância em relação ao mar, urbanização pouco densa, urbanização densa, vegetação densa e vegetação pouco densa, conforme os procedimentos adotados por Rocha (2021).

Para avaliar os modelos, foi realizada uma análise detalhada dos erros e dos resíduos gerados por cada um dos métodos adotados. Para avaliar o desempenho dos diferentes métodos aplicados, comparou-se o coeficiente de determinação (r^2) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) dos três modelos testados, de modo que essa etapa permitiu identificar padrões de variação nos resultados e compreender melhor a precisão de cada técnica de interpolação. A RMSE pode ser expressa pela equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2}$$

Onde:

- n é o número de amostras
- y_i é o valor observado para a amostra i
- p_i é o valor previsto pelo modelo para a amostra i

A espacialização dos dados foi conduzida por meio do *software ArcGIS Pro*, utilizando as ferramentas disponíveis no módulo *Geostatistical Analyst*, que possibilitam uma representação mais precisa e visualmente interpretável das distribuições espaciais geradas pelos diferentes métodos empregados no presente artigo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais características da ICU

A ICU em Florianópolis segue um padrão “clássico” noturno, com maior intensidade durante a noite e ao amanhecer. O pico da média da diferença térmica urbano e não-urbano ocorre às 6h, atingindo 2,3°C, e a partir desse horário, a intensidade da ICU começa a diminuir gradativamente até o meio-dia, como pode-se observar na figura 5. No período da tarde, a diferença térmica volta a aumentar, ainda que de forma menos acentuada. Esse comportamento já foi observado em outros estudos, como o de Mendonça (2002), que identificou diferenças térmicas mais intensas nesse mesmo horário, especialmente sob a influência da mPa.

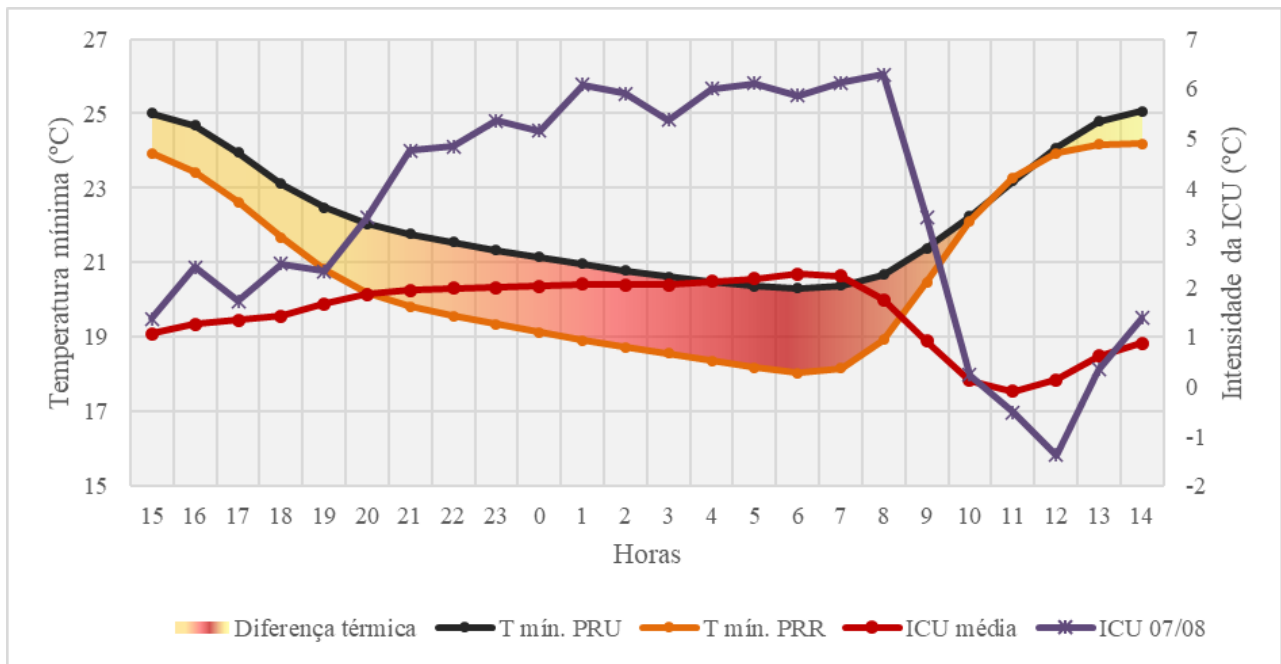


Figura 5 – Evolução média diária da intensidade da ICU (°C) entre agosto de 2018 e julho de 2019, com destaque para o dia da modelagem espacial: 7 de agosto de 2018. Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Entre 9h e 14h, em alguns momentos, a temperatura do ar nas áreas não-urbanas supera a das urbanas, indicando uma ausência temporária da ICU (Figura 5). Esse fenômeno é explicado por Oke *et al.* (2017), que apontam que, após o amanhecer, as áreas não urbanas aquecem mais rapidamente devido à maior exposição ao sol, enquanto as áreas urbanas, devido à inércia térmica de suas superfícies construídas, mantêm um aquecimento mais lento. Ao meio-dia, as temperaturas urbanas e rurais tendem a se igualar, e no período da tarde, a ICU volta a se intensificar gradualmente. Esse ciclo diário reflete as diferenças nos processos de absorção e liberação de calor entre os ambientes urbanos e não urbanos, conforme ilustrado na Figura 5.

Ao analisarmos a ocorrência da ICU sob uma perspectiva sazonal (figura 6), observa-se que nos meses de inverno há uma maior frequência de eventos com magnitudes elevadas, especialmente na classe "Forte" (4 a 6°C), com pico em agosto. A classe "Muito Forte" (>6°C) também se destaca nesse período, com registros em agosto, junho e julho. Nos meses de transição e verão, predominam as classes de menor magnitude, como "Frac" (0 a 2°C) e "Média" (2 a 4°C), com maior ocorrência em outubro e novembro.

Nesse contexto sazonal, o dia 7 de agosto de 2018 foi escolhido para a análise espacial em função de suas condições atmosféricas estáveis. Na data em questão, não houve precipitação e não se registrou nebulosidade. Por meio da aplicação da classificação de Pasquill-Gifford-Turner (PGT), construída por Pasquill e Gifford (1961) e revisada por Turner (1970), pôde-se verificar que a noite do dia 6 para o dia 7 apresentou "condições noturnas extremamente estáveis com baixa velocidade do ar". Rocha *et al.* (2020) apontam que essas condições podem favorecer a ocorrência de ICU de alta magnitude. No caso específico, como ilustrado na Figura 5, a média da ICU entre 15h do dia 6 e 14h do dia 7 foi de 3,5°C, em contraste com a média anual de 1,5°C. Além disso, a

ICU manteve intensidade “forte” (acima de 4°C) por 11 horas consecutivas, das 21h até as 8h da manhã seguinte, começando a se dissipar a partir das 9h, conforme evidenciado na Figura 5.

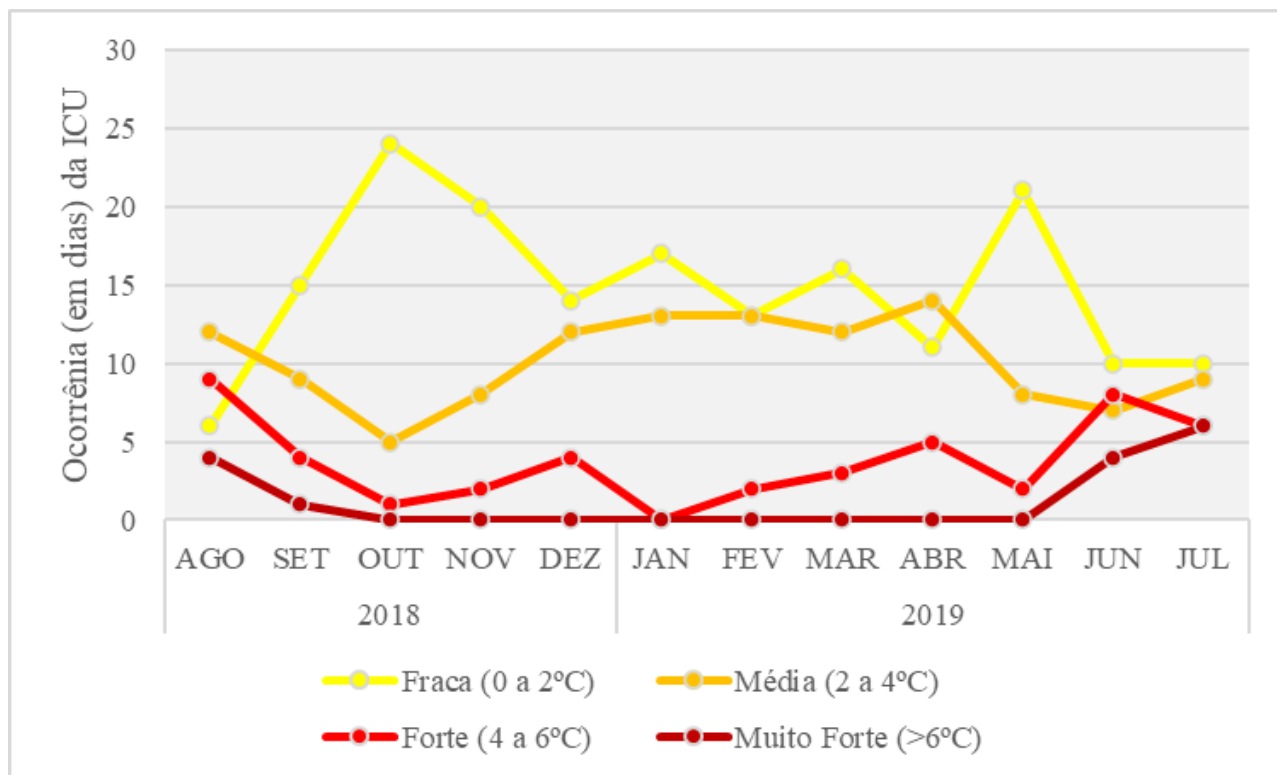


Figura 6 – Distribuição mensal do número de dias em cada classe de magnitude da ICU na área conurbada de Florianópolis (agosto de 2018 a julho de 2019). Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Avaliação dos modelos

A escolha do método de modelagem influencia diretamente a forma como a ICU é representada espacialmente. A análise dos resultados revelou variações significativas entre os modelos aplicados, destacando diferenças na maneira como cada técnica lida com a distribuição dos dados e a influência das características ambientais da área de estudo. A comparação entre os métodos evidencia que certas abordagens foram mais eficazes na captura das variações térmicas em diferentes contextos urbanos e geográficos.

Nesse contexto, a regressão linear múltipla (RLM) destacou-se como o modelo com melhor desempenho estatístico. Esse método considerou variáveis explicativas como as classes de uso e cobertura do solo, especialmente áreas urbanizadas e vegetadas, além da distância em relação ao mar. O modelo apresentou um coeficiente de determinação (r^2) de 0,97, indicando uma forte correlação entre as variáveis independentes e a magnitude da ICU observada. Além disso, o erro médio quadrático (RMSE) de apenas 0,51 demonstra que as estimativas geradas pela RLM foram mais próximas dos valores reais medidos nos pontos de coleta. Vale notar, entretanto, que apesar da

precisão estatística, a RLM tende a suavizar variações locais, sendo mais eficaz para captar tendências gerais do que para representar nuances espaciais com grande detalhe.

Entre os interpoladores, a krigagem apresentou desempenho superior à ponderação inversa da distância (PID), com RMSE de 1,45 e r^2 de 0,43, em comparação aos valores de RMSE de 1,79 e r^2 de 0,25 obtidos pela PID. A krigagem demonstrou maior sensibilidade às variações térmicas locais, resultando em uma representação espacial um pouco mais detalhada da ICU. Essa diferença de desempenho foi especialmente evidente nas áreas situadas nos extremos do território analisado. No setor norte, por exemplo, onde se encontra o ponto de referência rural com ICU medida de 0 °C, a PID estimou 4,59 °C e a krigagem 3,17°C. Já no extremo sul, em um ponto com ICU medida de 5,5 °C, a estimativa da PID foi de apenas 4,2 °C e a krigagem de 3,3°C. Nesses casos, observa-se que a PID ora superestima, ora subestima os valores extremos, produzindo superfícies suavizadas que não representam com fidelidade a variabilidade térmica real da área de estudo. Embora a diferença entre os métodos não seja muito acentuada, a krigagem apresentou resultados ligeiramente mais próximos dos valores observados.

A Figura 7 ilustra os resultados obtidos a partir dos três métodos aplicados, permitindo a comparação visual entre a regressão linear múltipla, a krigagem e a ponderação inversa da distância. Observa-se, a partir da figura 7 que tanto na PID quanto na Krigagem, as áreas mais a oeste da região estudada e próximas às elevações do continente foram estimadas com intensidades de ICU entre 3°C e 6°C. No entanto, a RLM, ao ponderar fatores como a cobertura do solo, não indicou a presença de ICU nessas áreas, uma vez que predominam vegetação densa e menor adensamento urbano, reduzindo a probabilidade de formação da ilha de calor.

Nas regiões centrais e mais densamente urbanizadas da península, os três modelos apontaram intensidades elevadas de ICU, com valores superiores a 5°C, caracterizando um efeito de grande magnitude. Nesses locais, a PID e a RLM apresentaram resultados mais próximos entre si e dos dados observados. Em contrapartida, um ponto comum a todos os modelos foi a estimativa de ausência de ICU no extremo norte da parte insular, onde se encontra um ponto de referência rural. Essa área, que corresponde a uma unidade de conservação ambiental, é coberta por vegetação densa, justificando a menor influência do efeito de aquecimento urbano. A Figura 8 mostra o gráfico de estimativa da ICU nos pontos criados para avaliação dos modelos, bem como sua classificação conforme as LCZ.

Nos pontos situados em áreas periurbanas ou com maior cobertura vegetal, como os pontos 1, 2, 5, 6, 7 e 8, localizados nas zonas LCZ A, 6 e 9, observou-se uma tendência dos interpoladores, especialmente a PID, à superestimação da ICU. Por exemplo, no ponto 2 (LCZ 9), a PID estimou uma ICU de 4,95 °C, a krigagem teve um valor muito próximo a PID, com 4,77°C, enquanto a RLM, ao incorporar variáveis ambientais como o uso do solo, não indicou a presença de ICU, estimando -3,20 °C. Esse padrão evidencia a sensibilidade da regressão às características locais, enquanto os interpoladores tendem a suavizar ou amplificar os dados com base na proximidade espacial, sem considerar os fatores físicos diretamente.

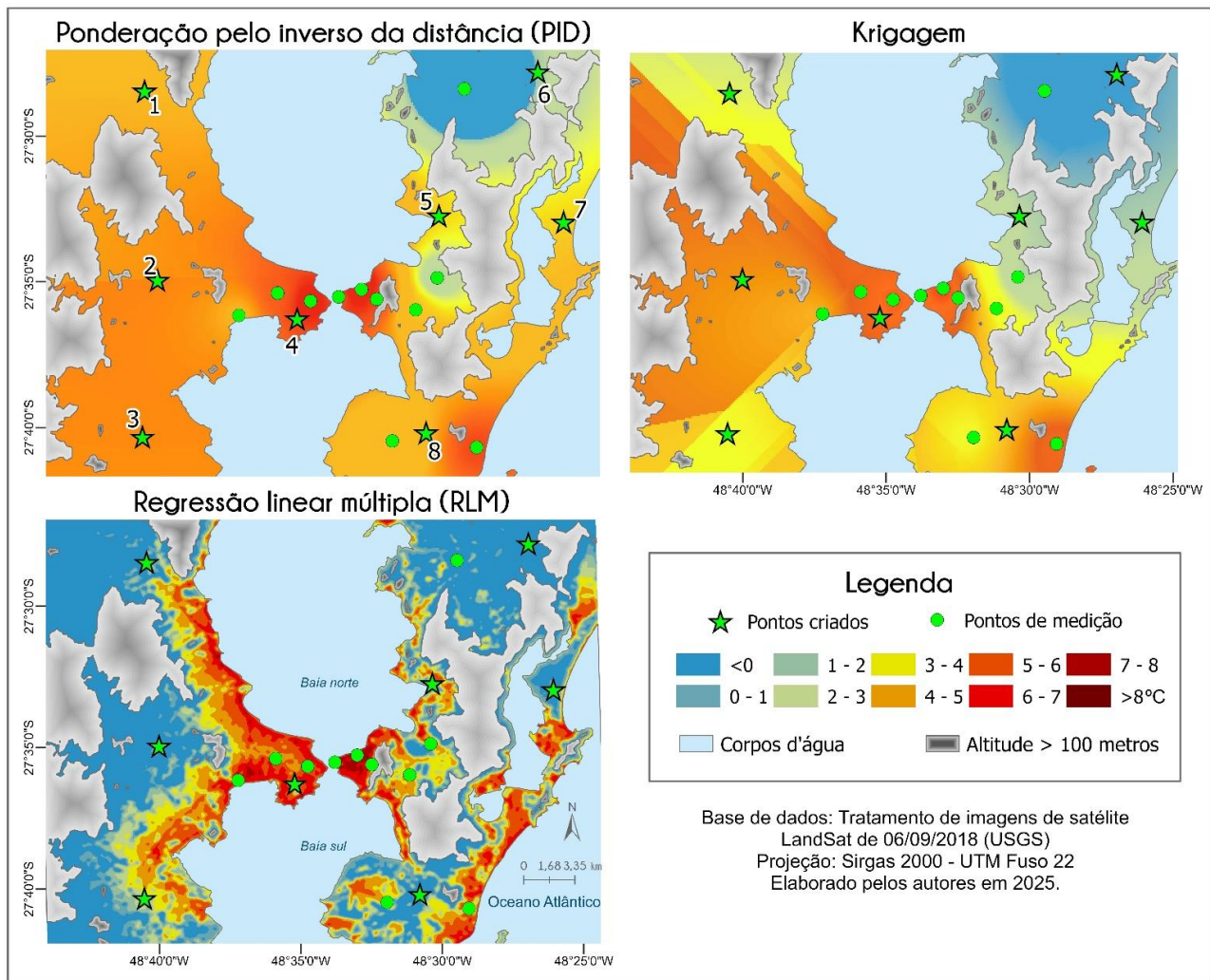


Figura 7 – Comparação da espacialização da ICU (07/08/2018 às 15h) na área conurbada de Florianópolis por três métodos distintos. Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

O ponto 4 (LCZ 5), situado em área urbana com baixa densidade de prédios de altura média e próximo a três estações de medição, apresentou maior coerência entre os modelos, com estimativas muito próximas: PID = 5,56 °C, krigagem = 5,58 °C e RLM = 5,80 °C. Isso demonstra que em áreas com maior densidade de dados medidos e com características urbanas mais homogêneas, os métodos convergem, indicando boa representatividade espacial da ICU. Assim, enquanto os interpoladores mostram maior dependência da distribuição dos pontos de medição, a RLM se destaca em contextos em que as variáveis explicativas são bem mapeadas e refletem adequadamente a complexidade da paisagem urbana.

Brabant *et al.* (2024) analisaram diferentes técnicas de interpolação espacial para o monitoramento da ICU em cidades de pequeno e médio porte, utilizando a região metropolitana de Rennes, na França, como estudo de caso. Os autores compararam a krigagem ordinária, a krigagem de regressão e a regressão multilinear, concluindo que os métodos geoestatísticos, especialmente a krigagem de regressão, foram os mais adequados para aquele contexto. No entanto, destacaram

que, quando não há dados disponíveis sobre o uso do solo ou quando os dados disponíveis se limitam ao nível da cidade como um todo, métodos geostatísticos podem ser utilizados.

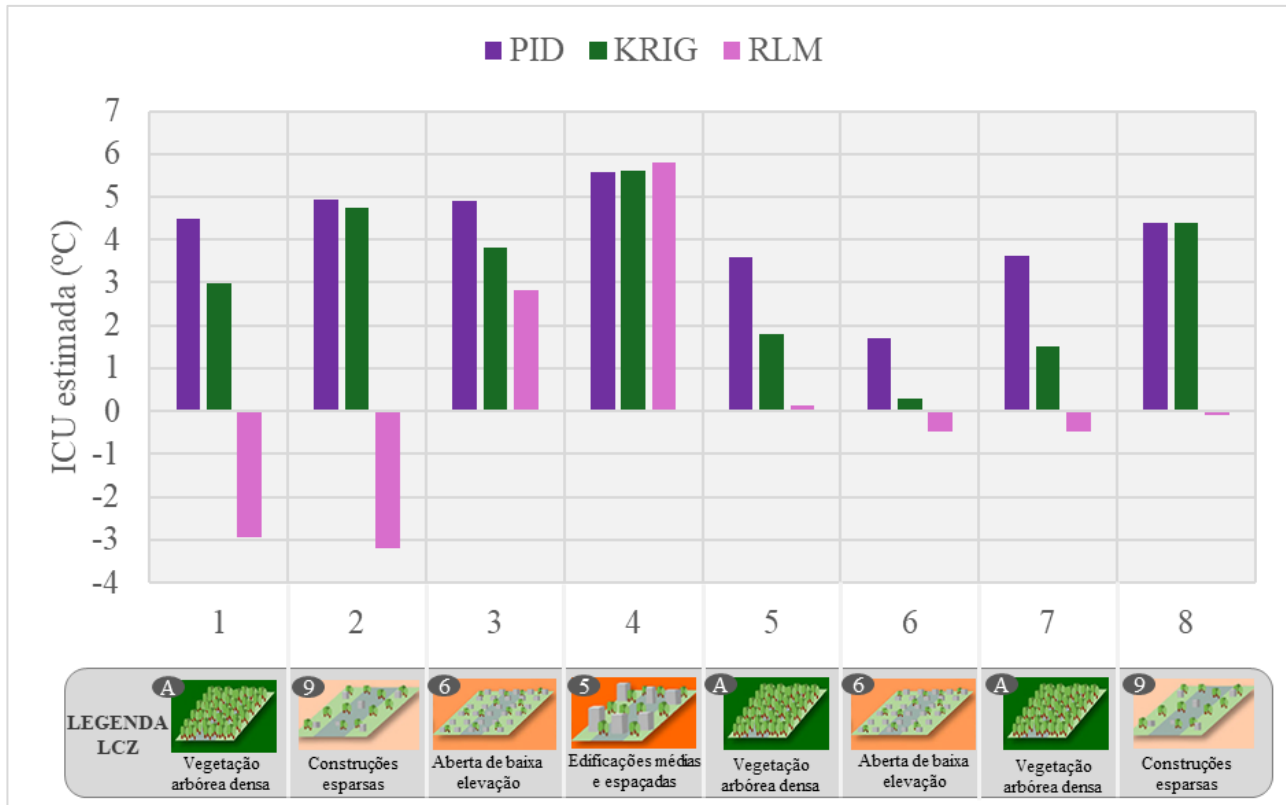


Figura 8 – ICU estimada nos pontos de controle aleatórios para comparação dos modelos. Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

Diferentemente do estudo de Brabant *et al.* (2024), contando com uma rede de 93 estações meteorológicas, a rede de monitoramento utilizada nesta pesquisa possui uma densidade de pontos de medição meteorológica significativamente menor, com 12 pontos de coleta de dados, o que impacta a precisão dos resultados obtidos por meio das técnicas de interpolação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo das ICU é de extrema importância para a compreensão do clima urbano, especialmente em cidades de médio e pequeno porte, ainda as menos estudadas no momento presente. O fenômeno da ICU, embora muitas vezes não concebido e reconhecido como um problema urbano evidente, afeta diretamente a qualidade de vida da população, especialmente no que diz respeito ao (des)conforto térmico que pode se associar a outros eventos, como ondas de calor e agravar-se ainda mais diante do cenário de mudanças climáticas.

Desta forma, a análise das ICU permite identificar padrões de aquecimento urbano e suas variações espaço-temporais, contribuindo assim para o desenvolvimento de estratégias de

adaptação às mudanças climáticas. A análise conduzida para Florianópolis reforça a importância de considerar as especificidades físicas e os processos de urbanização em áreas costeiras e insulares, permitindo uma abordagem mais detalhada e contextualizada das variações térmicas.

Os resultados evidenciam um padrão noturno clássico da ICU, com intensificação ao amanhecer e redução gradual ao longo do dia. A sazonalidade também se mostrou um fator determinante, com eventos mais intensos no inverno, sobretudo nas classes "Forte" (4 a 6°C) e "Muito Forte" (>6°C). Essas variações refletem a interação entre elementos e fatores do clima com as características urbanas.

A principal limitação enfrentada na modelagem desse fenômeno é o número reduzido de pontos de medição, o que impõe restrições importantes à aplicação de métodos geoestatísticos. Para além disso, a modelagem da ICU representa um desafio metodológico, especialmente na conversão de dados pontuais em representações espaciais coerentes. Surge, então, a questão central: o que fazer quando se tem poucos pontos de medição? Sabendo que, para os três métodos utilizados neste estudo, a krigagem, a PID e a RLM, estamos no limite do que se pode ou se deve fazer do ponto de vista estatístico, é necessário considerar as implicações destas limitações. A RLM, nesse cenário, apresenta-se como a opção estatisticamente menos insatisfatória, pois permite a incorporação de variáveis externas que influenciam o comportamento da ICU, como cobertura do solo, densidade urbana, entre outras.

Neste sentido, a comparação entre os métodos indicou que a RLM foi a técnica mais precisa, enquanto a krigagem apresentou maior sensibilidade a variações locais, podendo gerar estimativas suavizadas que nem sempre refletem os contrastes térmicos acentuados. A PID apresentou limitações em áreas com menor densidade de pontos de medição. Esses resultados ressaltam que a escolha do modelo deve considerar não apenas a precisão estatística, mas também as particularidades do ambiente estudado e a disponibilidade de dados.

Este estudo contribui para a compreensão das ICU em um contexto urbano específico, destacando a importância da modelagem e do monitoramento das variações térmicas. A continuidade das pesquisas, aliada ao aprimoramento das técnicas de modelagem e à ampliação das redes de monitoramento, é fundamental para uma análise mais precisa das dinâmicas térmicas urbanas e de seus impactos socioambientais.

Além disso, uma melhor compreensão das variabilidades espaço-temporais das ICU e das diferentes técnicas de espacialização do fenômeno, possibilita melhores condições de enfrentamento diante dos cenários de emergência climática, em diversas escalas espaciais e contextos urbanos brasileiros.

Submetido em 1 de junho de 2025

Aceito para publicação em 17 de dezembro de 2025

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.A; STAPE, J.L; SENTELHAS, P.C; GONÇALVES, J.L.M; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 22, nº. 6, 711–728, 2013. DOI: <<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>>
- AMORIM, M.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP), Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 16, p. 29-45, 2015. DOI: <<https://doi.org/10.5380/abclima.v16i0.40585>>
- AMORIM, M. C. C. T. **Teoria e método para estudo das ilhas de calor em cidades tropicais de pequeno e médio porte**. Tese de Livre docência – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente-SP. 2017.
- AMORIM, M.C.C.T.; DUBREUIL, V. Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. **Climate**, v. 5, n. 4, p. 91, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.3390/cli5040091>>
- AMORIM, M.C.C.T. Ilhas de Calor Urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. Ano 15 – E, p. 22–46, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.5380/abclima.v0i0.65136>>
- ANJOS, M., LOPES, A., ALVES, E. D. L., LUCENA, A. J. D. Rede climatológica de mesoescala aplicada ao estudo da Ilha de Calor Urbano: o caso de Aracaju-SE. **Caminhos de Geografia**, 18(62), 203-216. 2017. DOI: <<https://doi.org/10.14393/RCG186216>>
- BRABANT, C.; DUBREUIL, V.; DUFOUR, S. Evaluation of spatial interpolation techniques for urban heat island monitoring in small and medium sized cities. **Frontiers in Built Environment**, v. 10, p. 1455047, 2024. DOI: <<https://doi.org/10.3389/fbuil.2024.1455047>>
- CORREA, W. D. S. C., AYLAS, G. Y. R., SANTIAGO, A. M., SILVA, M. E. S., DO VALE, C. C., DA SILVA, C. B., & PATUCCI, N. N. A Ilha de Calor Urbana em ambiente tropical: a Região Metropolitana da Grande Vitória no Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, 42, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.186970>>
- DANNI, I. M. **Aspectos Temporo-Espaciais da Temperatura e Umidade Relativa de Porto Alegre em janeiro de 1982**: Contribuição ao estudo do clima urbano. 1987. 129 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- DEMUZERE, M; KITTNER, J; BECHTEL, B. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 637455, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>>

DUBREUIL, V. ; FANTE, K. P. ; PLANCHON, O. SANT'ANNA NETO, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de Geografia**, n. 37, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.4000/confins.15738>>

FOISSARD, X.; DUBREUIL, V.; QUÉNOL, H. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). **Urban Climate**, v. 29, p. 100490, 2019. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100490>>

GOMEZ W., AMORIM M.C.C.T., DUBREUIL V. Modelagem da Ilha de Calor Urbana Aplicada ao Ambiente Litorâneo - Ubatuba/Brasil. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo – Brasil** Vol.34. p.82-94, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.11606/rdg.v34i0.133193>>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama do Censo Demográfico 2022**. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>. Acesso em: 19/12/2025.

INMET – Instituto Nacional De Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020**. Brasília DF: INMET, 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: fev. 2025.

LUCENA, A. J., ROTUNNO FILHO, O. C., DE FARIA PERES, L., & DE ALMEIDA FRANÇA, J. R. A evolução da ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Geonorte**, 3(9), p. 8-21, 2012.

MENDONÇA, F.A. **O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno. Proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR**. 1995. 381 f. Doutorado em Geografia - Universidade de São Paulo, [s. l.], 1995.

MENDONÇA, M. **A dinâmica têmporo-espacial do clima subtropical na região conurbada de Florianópolis**. Tese (Doutorado em Geografia Física) Programa de Pós-graduação em Geografia Física. Universidade de São Paulo, 2002.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. 191f. Tese (Livre Docência em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

MOURA, M. O; ZANELLA, M.E; SALES, M.C.L. Ilhas térmicas na cidade de Fortaleza/CE. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 28, n. 2, p. 33-45, 2008. DOI: <<https://doi.org/10.5216/bgg.v28i2.5718>>

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

PASQUILL, F. The estimation of the dispersion of wind-borne materials. **Meteorological Magazine**, v. 90, n. 1063: p. 33-49, 1961.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FLORIANÓPOLIS. **Florianópolis se prepara para receber mais de 2 milhões de turistas na alta temporada.** Florianópolis, 14 nov. 2024, G1. Disponível em: <https://g1.globo.com/sc/santa-catarina/> Acesso em: 19/12/2025.

ROCHA, G. S.; DUBREUIL, V.; MENDONÇA, F. A. A estabilidade atmosférica e a ilha de calor urbana na área conurbada de Florianópolis-SC. **Revista Brasileira de Climatologia**. [s. l.] v. 27, p. 900-918, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/76237>. Acesso em: 19/12/2025.

ROCHA, G. S. **A ilha de calor entre mares: área conurbada de Florianópolis-SC.** 2021. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, 2021.

ROCHA, G. S.; DUBREUIL, V.; MENDONÇA, F. Ilha de calor à beira-mar: a área conurbada de Florianópolis-SC. In: AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V. (orgs.). **Cidades, clima e vegetação: modelagem e políticas públicas ambientais** [livro eletrônico]. Porto Alegre: TotalBooks, 2024. p. 124–139. Disponível em: https://totalbooks.com.br/wp-content/uploads/2024/07/CIDADES_CLIMA_E_VEGETACAO_MARGARETE.pdf. Acesso em: 19/12/2025,

SANTIAGO, D.B; GOMES, H. B. Estudo de ilhas de calor no município de Maceió/AL usando dados orbitais do Landsat 5. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 03, p. 793-803, 2016. DOI: <<https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.3.p793-803>>

SANTOS, M. **A urbanização brasileira.** Vol. 6. Edusp, 2005.

SIQUEIRA, M T; LUCAS, A.T. Nem tudo o que reluz é ouro: Florianópolis e o urbanismo competitivo. **Cadernos MetrÓpole**, v. 25, n. 57, p. 419-442, 2023. DOI: <<https://doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5703>>

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012. DOI: <<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>>

TURNER, D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates. **Office of Air Program Pub.** No. AP-26, Environmental Protection Agency, USA. 1970.