



RESILIÊNCIA URBANA FRENTE AO CALOR: TRIAGEM DE PRIORIDADES MUNICIPAIS COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL EXPLICÁVEL

Adriano Bressane¹

¹ Universidade Estadual Paulista, São José dos Campos/SP, Brasil
(adriano.bressane@unesp.br)

Resumo: Este estudo propõe uma triagem municipal de prioridades de adaptação ao calor urbano na Região Metropolitana de São Paulo. Indicadores térmicos, infraestrutura verde, densidade, vulnerabilidade e ERUA foram integrados a modelos de aprendizado de máquina explicável. Os resultados apontaram municípios prioritários e evidenciaram o papel da vegetação e da estrutura urbana na exposição térmica.

Palavras-chave: adaptação climática; calor urbano; infraestrutura verde; inteligência artificial explicável; justiça socioambiental.

INTRODUÇÃO

O aumento da exposição ao calor urbano constitui um dos principais desafios para o planejamento de cidades resilientes, especialmente em regiões metropolitanas marcadas por intensa urbanização, desigualdades socioambientais e distribuição heterogênea da infraestrutura verde. As ilhas de calor urbanas resultam da substituição de superfícies naturais por materiais impermeáveis, da redução da cobertura vegetal e da concentração de atividades urbanas, fatores que modificam o balanço de energia e elevam as temperaturas nas áreas construídas (Oke, 1982). Nesse contexto, áreas verdes urbanas podem contribuir para a adaptação climática por meio de sombreamento, evapotranspiração e resfriamento superficial, embora seus benefícios dependam não apenas da quantidade de vegetação, mas também de sua distribuição, acessibilidade e relação com grupos socialmente vulneráveis (Bowler et al., 2010; Wolch et al., 2014).

A Região Metropolitana de São Paulo representa um território relevante para esse tipo de avaliação, pois reúne alta concentração populacional, forte heterogeneidade socioespacial, diferenças expressivas de cobertura vegetal e distintos padrões de exposição térmica entre municípios. Estudos de adaptação urbana demandam, portanto, abordagens capazes de integrar indicadores ambientais, demográficos, territoriais e de justiça socioambiental em escalas compatíveis com a tomada de decisão pública. Nesse sentido, métodos de aprendizado de máquina explicável podem apoiar análises exploratórias ao combinar desempenho preditivo, interpretação dos fatores associados e maior transparência na

comunicação dos resultados, sem substituir diagnósticos locais detalhados ou inferências causais.

Este estudo teve como objetivo desenvolver uma abordagem exploratória de triagem municipal para identificar prioridades relativas de adaptação ao calor urbano na Região Metropolitana de São Paulo. Para isso, foram integrados indicadores de temperatura de superfície, ilha de calor urbana, cobertura vegetal, áreas verdes urbanas, população atendida por áreas verdes, densidade populacional, desigualdade socioambiental e Environmental Racism in UGS Accessibility, com apoio de modelos conservadores de aprendizado de máquina explicável. A proposta busca subsidiar o planejamento urbano resiliente, a avaliação de infraestrutura verde e a identificação de municípios que demandam análises mais detalhadas para adaptação climática e justiça socioambiental.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na Região Metropolitana de São Paulo, composta por 39 municípios, adotando o município como unidade de análise. Essa escala foi escolhida por permitir a integração padronizada de indicadores ambientais, demográficos, socioeconômicos, territoriais e térmicos em uma mesma base comparativa. Foram utilizados indicadores secundários provenientes do IBGE Cidades e Estados, da Fundação SEADE e da Urban Green Data Platform for São Paulo, além de limites municipais do Centro de Estudos da Metrópole para representação cartográfica e diagnóstico espacial.

A base analítica integrou variáveis relacionadas à estrutura urbana, infraestrutura verde, vulnerabilidade socioambiental e exposição térmica. Entre os indicadores considerados estavam área territorial,



população residente, densidade populacional, produto interno bruto, Índice de Desenvolvimento Humano Municipal, cobertura vegetal, área verde urbana per capita, população atendida por áreas verdes urbanas, desigualdade socioambiental, Environmental Racism in UGS Accessibility e indicadores térmicos municipais. A exposição ao calor foi sintetizada por meio de um Índice de Exposição ao Calor Urbano, calculado a partir da média dos escores padronizados de nível de ilha de calor urbana, temperatura média de superfície, temperatura máxima de superfície e maior amplitude térmica. Também foram testadas especificações alternativas do índice para avaliar a estabilidade dos rankings municipais.

A modelagem foi estruturada como uma tarefa exploratória de regressão, na qual o Índice de Exposição ao Calor Urbano foi estimado a partir dos indicadores municipais. Foram comparados modelos de regressão ridge, floresta aleatória e gradient boosting, com hiperparâmetros fixos e conservadores, considerando o tamanho reduzido da amostra. O desempenho foi avaliado por validação cruzada leave-one-out, com erro absoluto médio, raiz do erro quadrático médio e R^2 validado. A incerteza das métricas foi estimada por reamostragem bootstrap. A interpretação dos modelos foi realizada por importância por permutação e valores SHAP (Lundberg e Lee, 2017), de modo a identificar quais variáveis mais contribuíram para o comportamento do modelo ajustado. Também foram realizados diagnósticos de multicolinearidade, autocorrelação espacial por Moran's I e estabilidade das classes de prioridade. A classificação final agrupou os municípios em baixa, moderada e alta prioridade relativa de triagem para adaptação ao calor urbano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os indicadores térmicos e de infraestrutura verde evidenciaram forte heterogeneidade entre os municípios da Região Metropolitana de São Paulo. A temperatura média de superfície variou de 21,0 °C a 32,0 °C, enquanto a temperatura máxima de superfície variou de 29,0 °C a 52,0 °C. A cobertura vegetal apresentou amplitude de 9,0% a 52,0%, e a área verde urbana per capita variou de 0,0 a 33,0 m² por habitante. Esses resultados indicam que a exposição ao calor urbano não se distribui de forma homogênea no território metropolitano e reforçam a necessidade de abordagens integradas para subsidiar políticas de adaptação climática, sobretudo em contextos de elevada densidade populacional e desigualdade socioambiental.

A construção do Índice de Exposição ao Calor Urbano permitiu organizar os municípios segundo uma medida sintética de exposição térmica relativa. As análises de sensibilidade indicaram elevada estabilidade dos rankings municipais. A especificação

baseada apenas em temperatura de superfície apresentou correlação de Spearman de 0,997 com o índice principal e manteve 12 dos 13 municípios classificados como alta prioridade. A versão com transformação logarítmica do indicador de ilha de calor urbana manteve os 13 municípios de alta prioridade, com correlação de 0,987. A versão baseada em postos manteve 11 dos 13 municípios, e a versão por componente principal apresentou concordância praticamente completa com o índice principal. Esses resultados sugerem que a identificação dos municípios prioritários não dependeu de uma única formulação do índice, embora as classes devam ser interpretadas como categorias exploratórias de triagem, e não como limiares definitivos de risco.

Entre os modelos avaliados, o gradient boosting apresentou o melhor desempenho exploratório na validação cruzada leave-one-out, com erro absoluto médio de 0,307, raiz do erro quadrático médio de 0,420 e R^2 validado de 0,681. A floresta aleatória apresentou desempenho semelhante, com erro absoluto médio de 0,311, raiz do erro quadrático médio de 0,429 e R^2 validado de 0,668. A regressão ridge teve desempenho inferior, indicando que modelos conservadores baseados em árvores captaram melhor os padrões não lineares presentes nos indicadores municipais. Ainda assim, os resultados devem ser entendidos como evidência exploratória interna ao conjunto de 39 municípios, sem extrapolação preditiva para outros contextos territoriais.

Tabela 1. Síntese dos principais resultados da modelagem exploratória.

Resultado analítico	Síntese observada
Melhor modelo exploratório	Gradient boosting
Desempenho do modelo principal	MAE = 0,307; RMSE = 0,420; R^2 = 0,681
Variáveis mais refletidas no comportamento do modelo	População, cobertura vegetal e densidade populacional
Municípios no núcleo estável de alta prioridade	São Paulo, São Bernardo do Campo, Diadema, Osasco, Barueri, Carapicuíba e Guarulhos
Interpretação das classes	Triagem exploratória, não diagnóstico definitivo de risco

As explicações por SHAP e a importância por permutação indicaram que tamanho populacional, cobertura vegetal e densidade populacional foram as variáveis mais fortemente refletidas no



comportamento do modelo ajustado. Em termos interpretativos, maior cobertura vegetal e maior disponibilidade de áreas verdes tenderam a contribuir para menores valores preditos do índice, enquanto maior concentração populacional e maior densidade tenderam a contribuir para maior exposição térmica estimada. Esse padrão é coerente com a literatura sobre ilhas de calor urbanas e infraestrutura verde, segundo a qual áreas densamente urbanizadas e menos vegetadas tendem a apresentar maior carga térmica, enquanto a vegetação pode contribuir para mitigação por sombreamento, evapotranspiração e resfriamento superficial (Oke, 1982; Bowler et al., 2010).

A classificação final identificou 13 municípios no grupo de alta prioridade relativa: São Paulo, São Bernardo do Campo, Diadema, Osasco, Barueri, Carapicuíba, Guarulhos, Santo André, Mauá, Jandira, Taboão da Serra, Itaquaquecetuba e Mogi das Cruzes. Entre esses, São Paulo apresentou o maior valor do Índice de Exposição ao Calor Urbano, seguido por São Bernardo do Campo, Diadema, Osasco, Barueri, Carapicuíba e Guarulhos. Esse conjunto formou o núcleo mais estável de alta prioridade nas análises de sensibilidade, indicando maior consistência da classificação dentro da base analisada. Por outro lado, municípios próximos aos limites entre classes, como Mogi das Cruzes, Ferraz de Vasconcelos, Embu das Artes e Suzano, devem ser interpretados com maior cautela, pois sua classificação mostrou maior sensibilidade ao método de agregação e ao critério de corte.

Os resultados reforçam que a priorização municipal para adaptação ao calor não deve ser compreendida apenas como a identificação dos municípios mais quentes. A exposição térmica metropolitana resulta da interação entre condições biofísicas, estrutura urbana, densidade populacional, distribuição da vegetação, acesso às áreas verdes e desigualdades socioambientais. Assim, o uso de aprendizado de máquina explicável mostrou-se útil para estruturar uma triagem transparente, capaz de indicar onde análises locais mais detalhadas são necessárias. A abordagem não substitui estudos em escala intraurbana, medições microclimáticas, avaliações de qualidade das áreas verdes ou análises de exposição individual, mas oferece um primeiro nível de apoio à decisão para planejamento urbano resiliente, adaptação climática e justiça socioambiental.

CONCLUSÃO

A abordagem proposta mostrou-se adequada para organizar, em escala municipal, indicadores térmicos, ambientais, territoriais e socioambientais relacionados à adaptação ao calor urbano na Região Metropolitana de São Paulo. O Índice de Exposição ao Calor Urbano apresentou estabilidade nas análises de sensibilidade, e os modelos baseados em árvores, especialmente o

gradient boosting, tiveram melhor desempenho exploratório que as alternativas linear e basal. As análises explicáveis indicaram que população, cobertura vegetal e densidade populacional foram as variáveis mais relevantes para o comportamento do modelo ajustado. Os resultados permitiram identificar municípios com alta prioridade relativa de triagem, oferecendo subsídios para planejamento urbano resiliente, expansão e qualificação da infraestrutura verde e avaliação de desigualdades socioambientais. As classes obtidas devem ser interpretadas como apoio inicial à decisão, não como diagnóstico definitivo de risco, sendo recomendadas análises locais mais detalhadas antes da definição de intervenções.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à FAPESP, Processo nº 2023/03387-5, e ao CNPq, Processo nº 401721/2023-0, pelo apoio às pesquisas relacionadas a infraestrutura verde urbana, soluções baseadas na natureza e cidades saudáveis, resilientes e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

- Bowler, D. E.; Buyung-Ali, L.; Knight, T. M.; Pullin, A. S. Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97, 147-155, 2010.
- Lundberg, S. M.; Lee, S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*, 4765-4774, 2017.
- Oke, T. R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 1-24, 1982.
- Wolch, J. R.; Byrne, J.; Newell, J. P. Urban green space, public health, and environmental justice: The challenge of making cities “just green enough”. *Landscape and Urban Planning*, 125, 234-244, 2014.