RELAÇÕES ENTRE ILHAS DE CALOR URBANAS, ESTRESSE TÉRMICO E CONSUMO MÉDIO PER CAPITA DE ÁGUA NO BRASIL

Cleiton da Silva Silveira [1]; *Isac Lopes Câmara* [2] ; Samuel Rodrigues de Lima [3]

Palavras-chave: Consumo de água; Ilhas de calor urbanas; Heat index

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano acelerado e frequentemente desordenado constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, promovendo alterações significativas no balanço energético das cidades e favorecendo a intensificação das ilhas de calor urbanas. O aumento da impermeabilização do solo, da densidade construtiva e da redução da cobertura vegetal gera o fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU), caracterizado pelo aumento da temperatura do ar nos núcleos urbanos em comparação às áreas rurais ou menos urbanizadas (Stewart; Oke, 2012).

No contexto brasileiro, o crescimento urbano tem sido um vetor de modificações no meio natural, resultando em processos de degradação ambiental. Tais transformações acarretam consequências climáticas notáveis, especialmente em áreas urbanas, onde o clima local é diretamente influenciado por fatores antrópicos que geram gradientes de temperatura em diferentes áreas das cidades, e esse fenômeno ocorre principalmente devido a variações no uso do solo (Amorim, 2010).

O estresse térmico provocado pelo aumento das temperaturas eleva diretamente a demanda hídrica e energética das populações urbanas (Santamouris et al., 2015), impactando os níveis de consumo residencial, comercial e institucional (Mekonnen et al., 2025). No Brasil, o Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA) disponibiliza o indicador operacional de consumo de água (IN022), correspondente ao consumo médio per capita de água (L / hab.dia), permitindo avaliar a evolução temporal do consumo em escala nacional.

Paralelamente, índices biometeorológicos de conforto térmico como *Heat Index* (HI), *Temperature Humidity Index* (THI), *Relative Strain Index* (RSI) e *Wet Bulb Globe Temperature* (WBGT) têm sido amplamente empregados na caracterização do conforto térmico humano ao integrarem variáveis como temperatura do ar e umidade relativa. Nas últimas décadas, a literatura científica registrou uma expansão significativa no desenvolvimento de índices voltados à mensuração térmica em diversos microclimas (MohaN; Gupta; Bhati, 2014), muitos dos quais foram normatizados pela *International Organization for Standardization* (ISO). Esses indicadores são tradicionalmente classificados em duas grandes categorias: os índices empíricos (ou experimentais), formulados a partir de ensaios laboratoriais baseados em parâmetros ambientais e da fisiologia humana; e os índices racionais, fundamentados em modelos matemáticos e equações de balanço térmico humano.

Nesse sentido, a presente pesquisa propõe a integração de dados sobre o consumo hídrico e índices de conforto térmico, com o objetivo de investigar as correlações entre o agravamento do estresse térmico e a evolução do consumo médio *per capita* de água no território brasileiro, compreendendo o período de 2008 a 2022.

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: cleitonsilveira@ufc.br
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA), Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: isaclopesc26@gmail.com
3) Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, Ceará, Brasil. E-mail: samuellima2206@gmail.com

METODOLOGIA

Os dados referentes ao consumo médio *per capita* foram extraídos da plataforma do Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA). Para tal, empregou-se exclusivamente o indicador operacional de consumo médio de água (IN022), abrangendo a série temporal anual disponível de 2008 a 2022 e contemplando todas as regiões do Brasil.

Para caracterizar as condições climáticas utilizaram-se os dados meteorológicos da base Xavier et al. (2016). Esta base consiste em séries diárias interpoladas em uma grade regular de todo o território brasileiro, fornecendo variáveis de temperatura (máxima/mínima) e umidade relativa.

A temperatura média diária foi estimada a partir dos valores máximos e mínimos observados. Com base nos dados de temperatura média e umidade relativa, procedeu-se ao cálculo do seguinte índice biometeorológico: *Heat Index* (HI), conforme equação (1).

$$HI = 5/9\,[(C1 + C2T + C3UR + C4TUR + C5T^2 + C6UR^2 + C7T^2UR + C8TUR^2 + C9T^2UR^2) - 32] \quad (1)$$

Onde:

$C1$ = - 42,379; $C2$ = 2,04901523; $C3$ = 10,14333127; $C4$ = - 0,22475541; $C5$ = - 6,83783X10^{-3};
$C6$ = - 5,481717X10^{-2}; $C7$ =1,22874X10^{-3}; $C8$ = 8,5282X10^{-4}; $C9$ = - 1,99X10^{-6}

O processamento ocorreu inicialmente em escala diária, com posterior agregação em médias mensais e anuais. Tal estratégia metodológica visa mitigar possíveis vieses estatísticos que ocorrem ao se aplicarem funções não lineares diretamente sobre médias climatológicas pré-agregadas.

Posteriormente, foram realizadas análises descritivas e inferenciais, empregando o método interquartil para a identificação de *outliers* e o cálculo de métricas como médias, medianas, desvio-padrão e coeficiente de variação. Adicionalmente, estabeleceram-se intervalos de confiança de 95% e modelos de regressão linear. Os resultados são apresentados por meio de gráficos de consumo, tendência e mapeamentos espaciais, abrangendo todas as regiões do território brasileiro.

As análises foram executadas por meio de algoritmos customizados em linguagem *Python*, valendo-se de bibliotecas apropriadas para processamento de dados e análise estatística.

RESULTADOS

As análises revelaram um incremento consistente no consumo médio *per capita* nacional ao longo do recorte temporal estudado. A média anual elevou-se de aproximadamente 162 L/hab.dia, em 2008, para cerca de 188 L/hab.dia em 2022, o que representa um crescimento acumulado de 16%. Esse comportamento foi corroborado pela regressão linear, que apresentou um coeficiente angular de 1,57 L/hab.dia por ano e um coeficiente de determinação (R^2) de 0,86, ratificando uma robusta tendência temporal de ascensão.

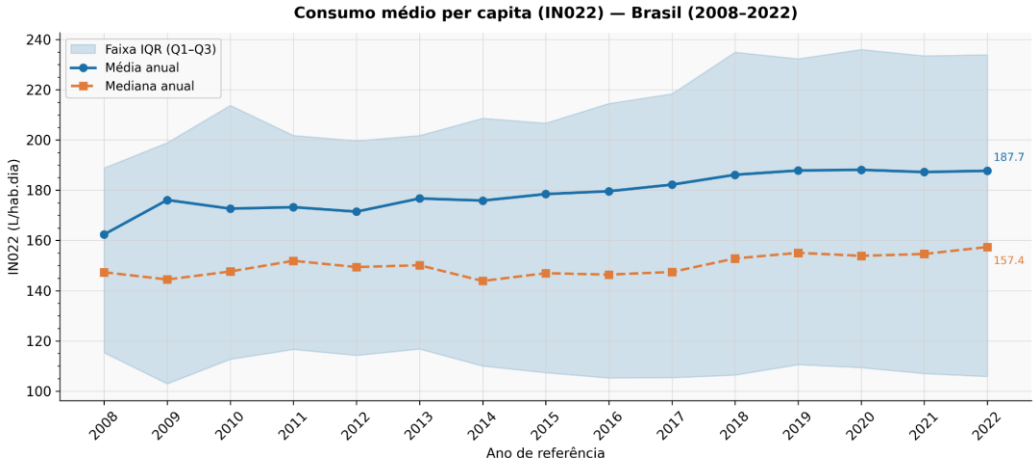


Figura 1. Série anual de consumo médio per capita de água. Fonte: autoria própria.

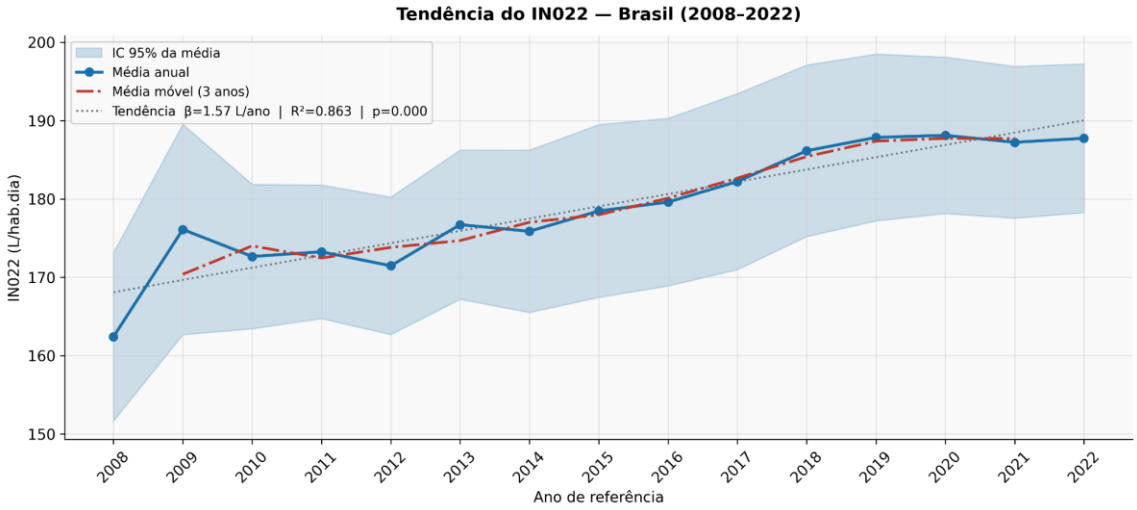


Figura 2. Tendência temporal do consumo médio per capita de água no Brasil entre 2008 e 2022. Fonte: autoria própria.

A comparação entre as medidas de tendência central demonstrou um aumento mais acentuado da média em relação à mediana, evidenciando uma distribuição assimétrica à direita. Tal padrão sugere a influência de municípios com consumos atípicos, significativamente superior à média nacional. Paralelamente, os gráficos de intervalo interquartil indicaram uma expansão progressiva da variabilidade espacial, enquanto o desvio-padrão anual saltou de 83 para 120 L/hab.dia, reforçando a crescente heterogeneidade do consumo entre os municípios brasileiros.

No que tange às variáveis climáticas, o mapeamento espacial do índice HI, demonstrou uma intensificação das condições de desconforto térmico em diversas regiões do país. Em suma, os dados evidenciam a concomitância entre o aumento da demanda hídrica e o agravamento do estresse térmico. Essa sincronia sugere uma possível associação entre as variáveis, hipótese que demanda investigação futura mediante o emprego de modelos estatísticos multivariados e análises de correlação específicas.

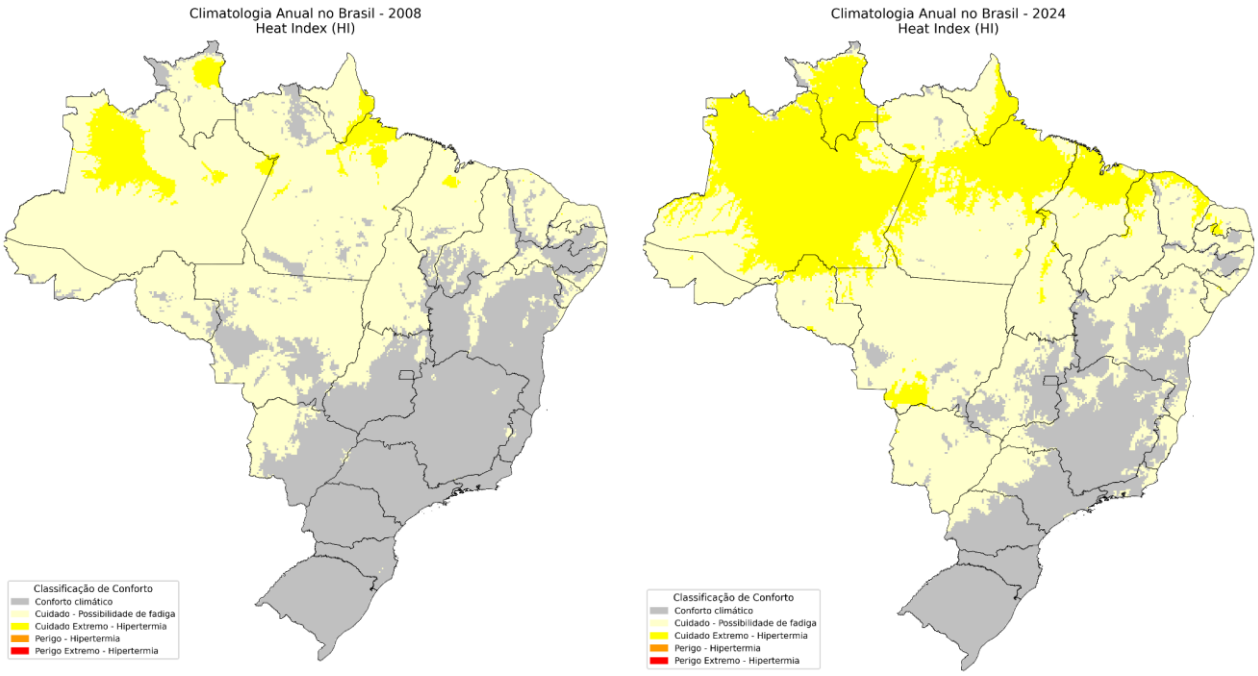


Figura 3. Mapas comparativos de índice (HI) – Brasil 2008 e Brasil 2024. Fonte: autoria própria.

CONCLUSÕES

Em síntese, os resultados deste estudo evidenciam que o Brasil apresentou uma tendência consistente de aumento do consumo médio per capita de água entre 2008 e 2022, acompanhada por um crescimento da heterogeneidade espacial entre os municípios e pela intensificação do processo de urbanização. Esse comportamento sugere que as transformações urbanas, associadas ao aumento da exposição das populações ao estresse térmico e à intensificação das ilhas de calor urbanas, podem ter contribuído para a elevação da demanda hídrica, embora a magnitude dessa influência deva ser investigada por meio de análises integradas envolvendo variáveis climáticas, socioeconômicas e demográficas.

Adicionalmente, a análise do índice biometeorológico ratifica um agravamento generalizado das condições de estresse térmico no território nacional, evidenciando que o aquecimento local e a demanda hídrica são processos que avançam de forma concomitante.

Diante dos resultados, ressalta-se que, embora a causalidade direta demande investigações complementares, a convergência entre o aumento do consumo e a intensificação do calor urbano fundamenta a hipótese de uma interdependência crítica entre clima e consumo de água.

Infere-se, portanto, que a incorporação de indicadores biometeorológicos ao planejamento urbano constitui uma estratégia fundamental para subsidiar políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas, especialmente em contextos marcados pela intensificação do estresse térmico, pela expansão das ilhas de calor urbanas e pelo aumento da demanda por recursos hídricos.

Por fim, considerando que esta pesquisa está em andamento, serão empregados modelos preditivos mais robustos e testes de tendência de Mann-Kendall, para gerar informações que permitam antecipar as pressões sobre os recursos hídricos em um cenário de aquecimento global crescente. A resiliência das cidades brasileiras dependerá, fundamentalmente, da capacidade de integrar essas variáveis climáticas à gestão da infraestrutura hídrica e urbana.

REFERÊNCIAS

a) Artigo em revista
AMORIM, M. C. C. T. Climatologia e gestão do espaço urbano. Mercator, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 71-90, 2010.

MEKONNEN, G. T.; BERLIE, A. B.; WUBIE, M. A.; LEGESSE, S. A. Surface Urban Heat Island Intensity and Urban Utility Consumption: Impact Analysis and Projections. *The Scientific World Journal*, v. 2025, art. 3250112, 2025.

MOHAN, M.; GUPTA, A.; BHATI, S. A Modified Approach to Analyze Thermal Comfort Classification. *Atmospheric and Climate Sciences*, v. 4, n. 1, p. 7–19, 2014.

SANTAMOURIS, M.; CARTALIS, C.; SYNNEFA, A.; KOLOKOTSA, D. On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings*, v. 98, p. 119–124, 2015.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 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, 2016.