

Avaliação por Sensoriamento Remoto dos Extremos de Microclima Urbano para o Avanço do Planejamento Urbano Sustentável

Bewketu Mamaru Mengiste • Yitayal Addis Alemayehu • Gebrie Tsegaye Mersha • Adnan Sirage Ali
Kotebe University of Education, Adis Abeba, Etiópia

Extremos
Microclimáticos

Sensoriamento
Remoto

Ilha de Calor
Urbana

Sustentabilidade
Urbana

O que é **Microclima** Urbano?

Condições climáticas localizadas dentro de áreas urbanas moldadas por edificações, densidade populacional, cobertura do solo e vegetação — diferindo significativamente do contexto rural circundante.

Principais Extremos

- Temperaturas elevadas da superfície (LST)
- Ilhas de Calor Urbano (UHI)
- Fluxo de vento alterado
- Padrões de precipitação modificados
- Estresse térmico exacerbado

Por que Sensoriamento Remoto?

- Abordagem custo-efetiva
- Cobertura espacial e temporal consistente
- Sensores térmicos e multispectrais de **alta** resolução
- Aprendizado de máquina integrado
- Monitoramento em tempo **quasi-real**

Contexto: A urbanização acelerada intensifica os extremos microclimáticos, impactando a saúde pública, a qualidade ambiental e a sustentabilidade urbana — tornando a avaliação baseada em dados essencial para políticas eficazes.

Objetivo Principal

Sintetizar sistematicamente a literatura científica revisada por pares para examinar as tecnologias de sensoriamento remoto empregadas na avaliação dos Extremos de Microclima Urbano (UMCE), seus impactos associados e as estratégias de mitigação propostas, informando o planejamento urbano sustentável e identificando lacunas críticas de pesquisa.

01 Examinar as **tendências espaço-temporais** da distribuição dos estudos sobre UMCE com sensoriamento remoto

03 Identificar os **tipos de dados e métodos** de sensoriamento remoto mais utilizados para monitorar UMCE

02 Avaliar as **limitações** metodológicas e as **lacunas** de pesquisa não resolvidas

04 **Vincular** os achados aos ODS 11 (Cidades Sustentáveis) e ODS 13 (Ação Climática)

Protocolo PRISMA

Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses — garante transparência e reprodutibilidade na seleção e síntese dos estudos.

Bases de Dados

Scopus e Web of Science — escolhidas pela ampla cobertura em ciências ambientais e estudos urbanos. Buscas até dezembro de 2025.

CrITÉrios de Elegibilidade

Estudos empíricos em inglês que aplicaram técnicas de sensoriamento remoto para avaliar UMCE, seus efeitos e estratégias de mitigação.

Estratégia de Busca — Palavras-chave

"Remote Sensing" OR "Satellite Imagery"

AND

"Urban climate" OR "Urban microclimate" OR
"Microclimatic extreme" OR "Urban Heat Island"

AND

"Land Surface Temperature" OR "Driver" OR
"Mitigation strategy" OR "Green infrastructure"

Estudos identificados: **411** → Triagem: **176** → Incluídos na síntese: **66**

atiospacial aspects of UMCE, their effects, and mitigation strategies, while excluding studies that addressed broader climatological phenomena without an urban focus. A comprehensive search was performed across two major databases, Scopus and Web of Science, chosen for their extensive coverage of environmental science and urban studies. The search strategy employed Boolean operators to combine key concepts, applied to titles, abstracts, and keywords, including “Remote Sensing” OR “Satellite Imagery,” “Urban climate” OR “Urban microclimate,” “Microclimatic extreme” OR “Urban Heat Island” OR “Land Surface Temperature,” and “Driver” OR “Mitigation strategy” OR “Green infrastructure.” Searches dates were open to the initial time and include

throughout the review. Each study was critically appraised for methodological rigor, clarity of reporting, and alignment with the boundaries of this review. The appraisal considered factors such as use of remote sensing approaches and characteristics of data transparency in data processing, robustness of analytical techniques, and relevance to urban microclimatic extremes researches. At this phase, the study minimized risk of bias through independent screening of studies considered and considered only empirical studies (reviewed original researches and reviews) with sufficient methodological details to ensure the final synthesis is based on evidence that is both credible and directly relevant to the research objectives.

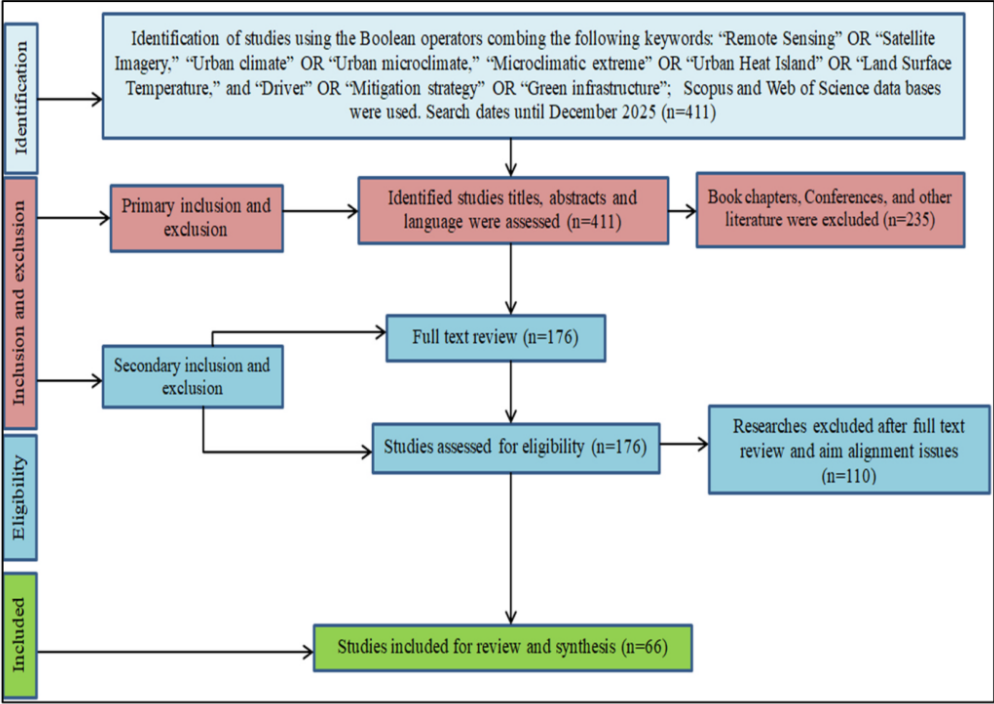


Fig. 1. Methodological flow of the study.

Fases de Seleção

411 Estudos identificados nas bases Scopus e Web of Science
Inclusão e exclusão predeterminados

235 Excluídos (capítulos, conferências, idioma, escopo)
Metodológicas e resultados relacionados ao tema

176 Texto completo avaliado para elegibilidade
Rigor metodológico, clareza do relato e alinhamento ao tema

110 Excluídos após revisão completa
(desalinhamento de objetivos)

66 Estudos incluídos na síntese final

l or developed nations. Similarly, UMCi case studies were cities from Australia, Turkey, Ethiopia, Bangladesh,

3.2.3. *Microwave and radar-based datasets*
Microwave and radar sensors enable surface at

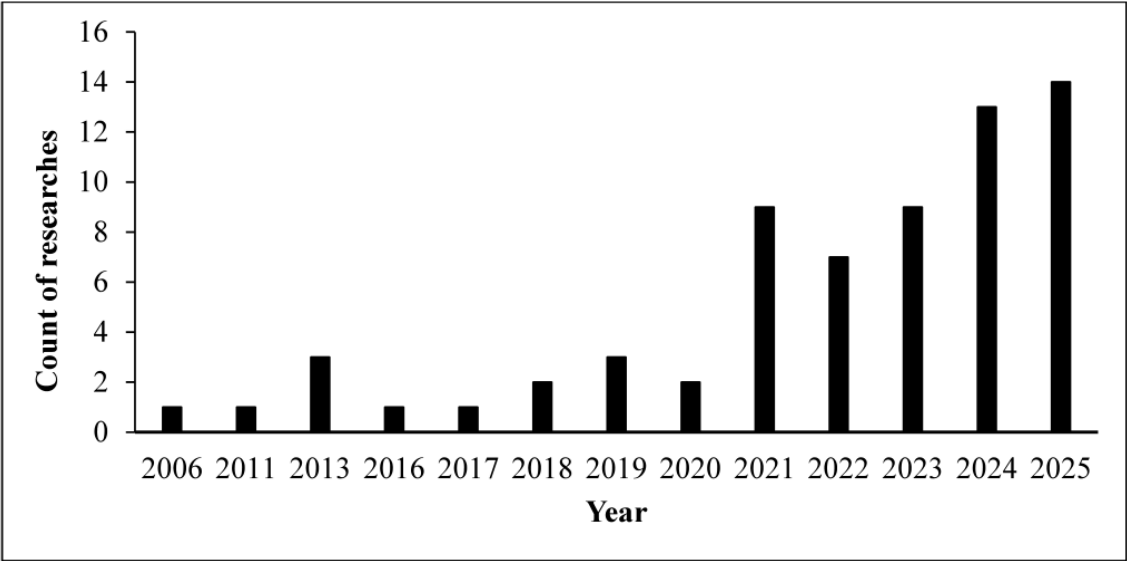


Fig. 2. Year of publications.

Principais Achados

Crescimento acelerado pós-2019

Volume e cobertura geográfica expandiram substancialmente a partir de 2019

Pico em 2024–2025

13 estudos em 2024 e 14 em 2025 — crescimento exponencial recente

Antes de 2018

Produção limitada, de 1 a 3 estudos anuais, refletindo o estágio inicial da área

Impulsionadores do crescimento

Maior disponibilidade de dados satelitais, técnicas de ML e urgência das mudanças climáticas

pectral and atmospheric remote sensing data were the ed, each appearing in fewer than three studies, suggesting bility and the need for advanced analytical capabilities. been found to significantly mitigate UHI effects, offer cooling benefits. The use of remote sensing and machin has enhanced the analysis of urban heat vulnerabil

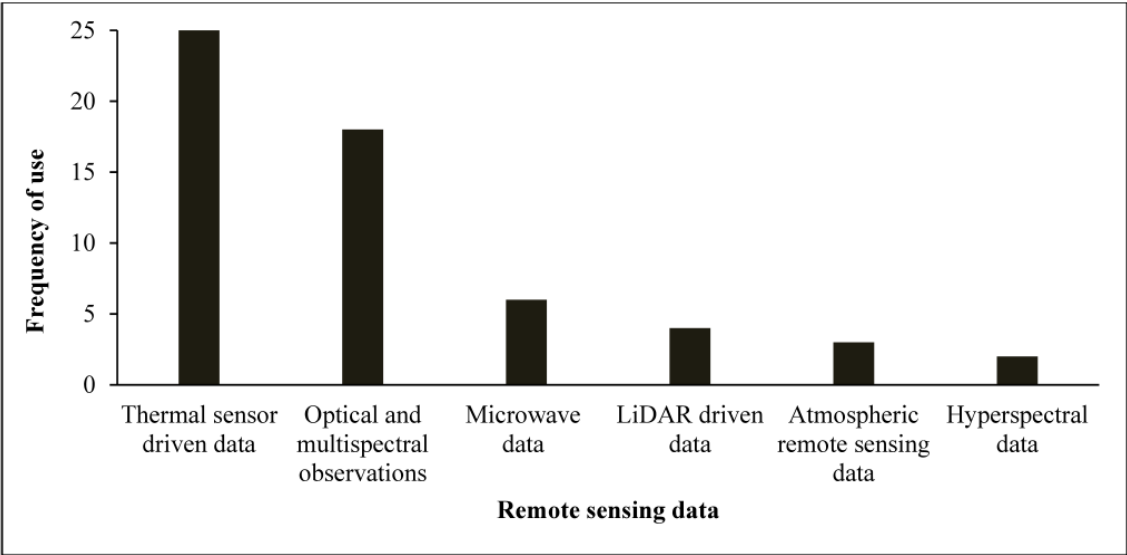


Fig. 3. Count of remote sensing data usage.

Categorias de Dados

- ~25 Sensor Térmico** — LANDSAT TIRS, MODIS, ECOSTRESS, VIIRS (mais utilizado)
- ~18 Óptico/Multiespectral** — Landsat OLI, Sentinel-2, WorldView-3 (NDVI, EVI)
- ~6 Microondas/Radar** — Sentinel-1 SAR, PALSAR (umidade do solo)
- ~4 LiDAR** — estrutura 3D urbana, canópia de árvores, elevação
- <3 Hiperespectral e Atmosférico** — MODIS, VIIRS, OMI (Aura), TROPOMI

Fenômeno	Método / Análise	Dados Usados
UHI e Temperatura Superficial	NDVI, análise espaço-temporal da LST, SUHI via MODIS/Landsat	Térmico (LANDSAT, MODIS)
Calor Antropogênico	Abordagem de balanço de energia superficial via SR	Multiespectral + Térmico
Microclima e Temperatura do Ar	Regressão com variáveis VHR (vegetação, superfícies impermeáveis, radiação)	Óptico VHR + LiDAR
Suscetibilidade a Inundações	ML integrado: SVM, Random Forest, XGBoost, MLP + algoritmo BES	SAR + Óptico + DEM
Resposta da Vegetação ao Clima	EVI derivado de imagens satelitais para avaliar reações ao calor e precipitação	Multiespectral (NDVI, EVI)
Modelagem Preditiva (ML)	SMLR e XGBoost explicável (SHAP) para previsão e interpretação ambiental	Multi-fonte + Socioeconômico

Maior intensidade UHI

Os valores mais altos de LST e UHI são registrados nas áreas densamente construídas, especialmente à noite — em áreas centrais e suburbanas.

Espaços verdes como resfriamento

A intensidade UHI é mais baixa em parques urbanos — vegetação com densidade > 0,3 tem efeito de resfriamento mais pronunciado.

Superfícies impermeáveis

A expansão de áreas construídas e índices NDBI elevados associam-se a LST mais alta e intensificação dos efeitos UHI.

Corpos d'água

Superfícies de água demonstram influência positiva e significativa na mitigação UHI, mantendo temperaturas comparativamente menores.

Tendência global de aquecimento

O aumento médio da LST é maior em climas úmidos e não-lineares em cidades áridas, indicando impacto não uniforme da urbanização.

Emissões de CO₂

Áreas urbanas compactas com pouca vegetação exibem intensidades de CO₂ até 3,5x maiores comparadas a áreas com vegetação abundante.

Achado Principal	Evidência / Contexto
LST e UHI mais altos em áreas centrais/suburbanas, especialmente à noite	Padrões de ICU espacial e temporal — alta consistência entre estudos
Áreas compactas com pouca vegetação emitem até 3,5x mais CO ₂	Zonas de estresse térmico ligadas à degradação ecológica e saúde pública
Corpos d'água reduziram positivamente os efeitos UHI	Evapotranspiração e alta capacidade calorica mantêm temperaturas menores
ML e SR são usados para análise de vulnerabilidade em múltiplas escalas	Alta resolução espacial, cobertura temporal e melhor acurácia preditiva
Séries multiespectrais de alta resolução temporal são mais utilizadas em estudos florestais	Monitoramento de mudanças de cobertura vegetal e produção primária líquida
Temperatura do ar superficial cresce com a urbanização futura	Expansão contínua de áreas impermeáveis intensifica efeitos microclimáticos

Infraestrutura Verde e Cobertura Vegetal

Aumento da vegetação demonstra efeito de resfriamento e correlação negativa com LST — estratégia mais citada na literatura.

Zonas Climáticas Locais (LCZ)

Framework LCZ diferencia LST entre contextos urbanos e rurais — possibilita planejamento climático mais preciso e sensível ao contexto local.

Controle da Expansão de Áreas Construídas

Alta densidade de construção (NDBI elevado) associa-se a maior LST e UHI intenso — gestão do uso do solo é fundamental.

Monitoramento por SR e ML

Análise de tendências via sensoriamento remoto e aprendizado de máquina são ferramentas críticas para monitoramento e intervenções direcionadas.

Proteção de Corpos Hídricos

Áreas próximas à água registram temperaturas comparativamente menores devido à evaporação e alta capacidade calorífica.

Conclusão

O desenvolvimento do uso do solo equilibrado — integrando construções com coberturas naturais e monitoramento orientado por dados — contribui para os ODS 11 e 13.

Implicações para Políticas

Planejamento Urbano

Dados de SR de alta resolução são essenciais para identificar variação intra-urbana de temperatura e exposição localizada ao calor.

Gestão de Riscos Climáticos

Dados temporais frequentes permitem monitoramento quasi-tempo-real de extremos e sistemas de alerta precoce para ondas de calor e inundações.

Equidade e Vulnerabilidade

Integrar indicadores SR a dados socioeconômicos é crítico para capturar a vulnerabilidade diferencial de grupos populacionais.

Recomendações Metodológicas

Multi-sensor e Multi-escala

Integrar dados ópticos, térmicos, radar e LiDAR para caracterização mais abrangente dos UMCE.

Validação em Campo

Fortalecer redes de validação in situ, especialmente em regiões tropicais e de países em desenvolvimento.

Acesso Aberto e Capacitação

Promover acesso a datasets de SR e investir em capacitação técnica local para pesquisadores e gestores em países de baixa renda.

Pontos Fortes

- + Protocolo PRISMA rigoroso garantindo reprodutibilidade e transparência metodológica
- + Síntese abrangente de 66 estudos empíricos com controle de qualidade estruturado
- + Conexão direta dos resultados com os ODS 11 e 13 — boa relevância de política
- + Identificação clara das lacunas geográficas (predominância de estudos na Ásia)

Limitações e Lacunas

- Resolução espacial e temporal — limita captura de eventos extremos rápidos
- Interferência atmosférica (nuvens, bruma) limita confiabilidade óptica em regiões tropicais
- SR sozinho não captura dimensões socioeconômicas da vulnerabilidade climática
- Concentração geográfica em países desenvolvidos — lacunas no Sul Global, inclusive Brasil



Obrigado!

Valdson Fraga de Oliveira

Mengiste et al. (2026)

Environmental and Sustainability Indicators 30 (2026) 101215

DOI: 10.1016/j.indic.2026.101215