

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA ANÁLISE CLIMÁTICA INTRA-URBANA APLICADA EM UMA CIDADE MÉDIA TROPICAL

Methodological Proposal for Intra-Urban Climate Analysis Applied in a Medium-Sized Tropical City

Cássia de Castro Martins Ferreira

Professora Titular do Curso de Geografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
cassia.castro@ufff.br

Yan Carlos Gomes Vianna

Geógrafo, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
yan.vianna@ufff.br

Thiago Alves de Oliveira

Doutorando em Geografia Física, Universidade de São Paulo, Brasil
thiago.a.oliveira@usp.br

Camila de Moraes Gomes Tavares

Professora Curso de Geografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
camilagomes.tavares@ufff.br

Débora Couto de Assis

Pesquisadora Associada no Centro de Inteligência Territorial - CIT, Brasil
cassis.debora@gmail.com

Franciele de Oliveira Pimentel

Doutoranda, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil
tieli.pimentel@gmail.com

Ana Luiza Barboza Ramiro

Graduanda em Geografia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
analuiza.barbosa@estudante.ufff.br

Daiane Evangelista de Oliveira

Geógrafa RSJ Soluções Ambientais e Engenharia, Brasil
daiane.evangelista.oliveira@gmail.com

Recebido: 20/05/2025
Aceito: 17/10/2025

Resumo

A crescente população urbana, agregada à frequente construção e reconstrução das cidades que as dinamizam, vem provocando espaços intraurbanos com desigualdades sociais e ambientais, presentes nos distintos modos de vida dos sujeitos, nos acessos a espaços verdes, na mobilidade urbana, na ocupação de áreas de risco, na vulnerabilidade social e ambiental, entre outros. O presente artigo objetivou criar um modelo de síntese de análise climática intraurbana, capaz de relacionar variáveis meteorológicas (temperatura do ar, temperatura de superfície, precipitação), geoambientais (relevo, cobertura vegetal, recursos hídricos) e geourbanas (uso do solo). Estas variáveis foram integradas utilizando um modelo de ponderação e multicritério, no qual são avaliadas quanto ao peso e ao grau

de relevância, que refletirão sua importância para as diferentes características climáticas no ambiente intraurbano, aplicado à cidade de Juiz de Fora-MG. Os resultados mostraram um espaço intraurbano diversificado, com grandes espaços críticos tanto pelo viés térmico quanto pelo hídrico. Verificou-se uma relação estreita entre a presença de cobertura vegetal e de cursos de água na mitigação dos efeitos da temperatura do ar e dos impactos decorrentes das precipitações. Conclui-se que outras variáveis, além das consideradas, seguindo as particularidades de cada lugar, podem influenciar a dinâmica e os impactos dos fenômenos climáticos, mas, principalmente em um contexto de mudanças climáticas, torna-se emergente o estudo de diagnósticos e modelos de síntese, que poderão ser cada vez mais considerados na gestão pública.

Palavras-chave: clima urbano; temperatura do ar, análise multicritério.

Abstract

The growing urban population, combined with the continuous construction and reconstruction that drive city dynamics, has resulted in intra-urban spaces characterised by social and environmental inequalities. These disparities are evident in aspects such as lifestyle, access to green areas, urban mobility, occupation of risk-prone areas, and levels of social and environmental vulnerability. This article aims to develop a synthetic model for intra-urban climate analysis that integrates meteorological variables (air temperature, surface temperature, and precipitation), geoenvironmental variables (relief, vegetation cover, and water resources), and geourban variables (land use). These variables were combined through a weighted multicriteria model, in which the weight and relevance of each variable were assessed to reflect its influence on different climatic characteristics within the intra-urban environment. The model was applied to the city of Juiz de Fora, MG, Brazil. The results revealed a heterogeneous intra-urban landscape, with critical areas identified from both thermal and hydrological perspectives. A strong relationship was observed between vegetation cover and the presence of water bodies in mitigating the effects of air temperature and precipitation. It is concluded that, beyond the variables considered, other factors—depending on the specific context of each location—may influence the dynamics and impacts of climatic phenomena. However, particularly in the context of climate change, studies incorporating diagnostics and synthesis models are increasingly urgent and should be integrated into public policy and urban planning.

Keywords: urban climate; air temperature; multicriteria analysis.

1. INTRODUÇÃO

Com uma crescente população vivendo nas cidades, apresentando aproximadamente 55% da população global, estimando chegar a 68% até 2050 (ONU, 2018), associada ao aumento do processo de urbanização, e em muitas cidades brasileiras, esse processo vem sendo bastante crítico no contexto ambiental, do bem-estar humano, da infraestrutura obsoleta, da vulnerabilidade social e ambiental, contribuindo para o aumento da exposição dos sujeitos aos diferentes eventos climáticos. Com as mudanças climáticas, altera-se a intensidade, frequência, padrão de distribuição, duração dos eventos climáticos, levando

as cidades a enfrentarem cada vez mais riscos climáticos de diferentes magnitudes e por vezes sem precedentes (IPCC, 2023). São muitos os estudos que evidenciam os problemas ambientais advindos da interação entre cidade e atmosfera (Amorim *et al.* (2024); Porangaba *et al.* (2024); Ribeiro *et al.* (2023); Stathopoulou *et al.* (2009); Grimmond e Oke (1999); Voogt e Oke (1998).

Desta forma, no contexto de um clima em mudança, é urgente que se estabeleçam novas relações sociedade-ambiente, no qual o criar e recriar das cidades deve ser realizado na ótica do planejamento urbano, que por sua vez, deve trazer para dentro de si o debate, ações, gestão e construção de cidades mais preparadas aos novos contextos climáticos que essas mudanças estão infringindo, logo, cidades mais resilientes e abertas aos planos de adaptação.

Essa perspectiva, está presente na Nova Agenda Urbana (UN Habitat, 2016) que destaca um compromisso global para o desenvolvimento urbano sustentável, evidenciando a necessidade de as cidades serem mais inclusivas, resilientes e sustentáveis, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente a ODS 11. Um dos elementos principais dessa agenda é a análise integrada das questões climáticas ao planejamento urbano, chamando a atenção para a importância da análise climática urbana, como variável significativa para a gestão urbana e na tomada de decisões. Esta análise climática urbana, permitiria maior conhecimento da dinâmica, riscos, impactos, frequência, intensidade dos diferentes eventos climáticos, e, do próprio contexto urbano, na sua materialidade, albedo, emissividade, massa construída, verticalidade, Cânions Urbanos, etc. A análise conjunta destas variáveis, permitiria aos planejadores urbanos, terem ciência dos espaços mais frios e quentes, áreas mais propensas a inundações e movimentos de massa, o que poderia orientar ações e obras de engenharia na mitigação destes efeitos. Um maior conhecimento do clima da cidade também reverbera na gestão dos recursos hídricos (Flörke, Schneider e Mac Donald (2018), na saúde e bem-estar social (Gasparrini *et al.*, 2017).

Segundo Oke *et al.* (2017) e Grimmond e Oke (1999) o ambiente urbano influencia de diferentes formas e intensidades a temperatura e umidade do ar, o ciclo da água, altera a dinâmica e velocidade dos ventos, luz solar e interfere as características físico/química da atmosfera, porém, deve tentar manter condições adequadas para a saúde humana e para o próprio funcionamento das cidades.

Ren (2015) mostra que existe uma diversidade de modelos de análise de clima urbano, que consideram, uma tríade de variáveis, permitindo integrar dados

meteorológicos, urbanos e ambientais, sendo fundamentais ao planejamento e gestão das cidades.

Trazemos para análise alguns modelos, metodologias e indicadores de análise de clima urbano, dentre eles destacamos os Modelos geoespaciais, Modelos de balanço de energia e os Modelos numéricos.

Como Modelo Geoespacial evidenciamos o Mapa Climático Urbano (UCMAP), que objetiva criar metodologias de diagnóstico, controle e monitoramento do clima nas cidades, os UCMAPS, consistem em uma ferramenta contendo informações geourbanas e geoambientais, que agregadas e associadas a um modelo espacial, se tornou um importante instrumento de diagnóstico e análise do clima urbano e pode ajudar aos planejadores a entenderem as condições e alterações microclimáticas e ambientais, propiciando criar ações e soluções mitigadoras. Várias cidades no mundo tiveram estudos climáticos baseados nesta metodologia, tais como Lisboa (Portugal), Arnhem (Holanda), Berlim (Alemanha), Gotemburgo (Suécia), Bilbao (Espanha), Stuttgart e Hesse (Alemanha), Sendai (Japão), Manchester e Birmingham (UK), Tokyo e Yokohama (Japan), Beijing e Hong Kong (China), Campinas (Brasil), (Ng; Ren, 2015).

Partindo da proposta dos UCMAPS, Ferreira (2014) propôs uma metodologia de investigação do potencial térmico aplicado às cidades, neste modelo geoespacial, foram espacializadas informações geourbanas e geoambientais, numa escala de detalhe (1:2000), sendo possível identificar as características dos lugares e sua importância hierárquica na definição do potencial térmico do lugar. Desta forma, identificou-se os ambientes intraurbanos que possuíam maior ou menor potencial de aquecer, configurando em uma importante ferramenta de planejamento e gestão urbanas. A metodologia foi ainda aplicada para as cidades de Ubá – MG (Vianna, Pimentel e Ferreira, 2020), Alvinópolis – MG (Alves e Ferreira, 2021) e Juiz de Fora (Ferreira, 2014, Ferreira, Pimentel e Vianna, 2019 e Pimentel e Ferreira, 2021).

Os modelos de balanço de energia objetivam a modelagem do clima urbano, a partir dos fluxos e trocas de calor que ocorrem no sistema terra/atmosfera. Visam modelar como o equilíbrio global do balanço de energia é alterado na escala urbana, mediante maior interação entre a radiação solar, uma atmosfera urbana modificada, associada a um uso e ocupação da terra intensificado e coberto por diferentes materiais, são exemplos de pesquisas realizadas nesse caminho Wong *et al.* (2011); Bornstein *et al.* (2012); Moreira *et al.* (2017), Silva Filho *et al.* (2021)

Já os modelos numéricos e estatísticos permitem analisar atmosfera urbana em escalas temporal e espacial distintas, por vezes integrando variáveis da superfície urbana (Alves; Galvani, 2021; Aires *et al.*, 2018; Masson, 2000; Grimmond; Oke, 1999; Masiero *et al.*, 2022; Koutroumanou-Kontosi *et al.* 2022, Hollósi *et al.* 2021).

Quanto a um indicador de qualidade do clima urbano, salientamos a pesquisa de Guerra e Ruiz (2020) que propuseram um indicador para avaliar a qualidade do clima urbano. As variáveis que compuseram este indicador foram agrupadas em três eixos, o ambiental, o morfológico e o climático, sendo, posteriormente, analisados e avaliados por um conjunto de especialistas em clima urbano. A metodologia constou da análise multicritério e geoprocessamento, utilizando indicadores que vão de 0 a 1, sendo os valores mais altos atrelados a uma cidade com melhor qualidade climática e os valores mais baixos, mostram as cidades com menor qualidade climática. Este indicador foi aplicado na cidade de Chillán no Chile, concluindo que a cidade possui uma alta qualidade climática.

Considerando as colocações apontadas sobre a necessidade de conhecimento ambiental urbano como subsídio para os planejadores na busca de atender às necessidades de cidades inclusivas, resilientes e sustentáveis, o presente estudo objetivou criar uma metodologia de análise climática intraurbana que permite relacionar variáveis meteorológicas (temperatura do ar, temperatura de superfície, precipitação), geoambientais (relevo, cobertura vegetal, recursos hídricos) e geourbanas (uso do solo). Estas variáveis são integradas utilizando um modelo de ponderação e multicritério, no qual são avaliadas quanto ao peso e grau de relevância que refletirá sua importância para as diferentes características climáticas no ambiente intraurbano.

2. ÁREA DE ESTUDO

Elencou-se a cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais- Brasil, como área de estudo para o desenvolvimento e aplicação da metodologia de análise climática intraurbana. Essa escolha se faz em função da disponibilidade de dados e pesquisas a respeito do clima da cidade que deram subsídio às decisões e escolhas metodológicas apresentada neste trabalho (Ferreira; Assis, 2014; Ferreira, 2014, Ferreira; Pimentel; Vianna, 2019; Pimentel; Ferreira, 2019; Oliveira, 2021).

Juiz de Fora é uma cidade média, com uma população de 540.756 habitantes (IBGE, 2022). Localizada na Zona da Mata do estado de Minas Gerais (Figura 1). Está localizada na zona Tropical, sendo seu clima influenciado pela sucessão de massas de ar com características distintas, sejam elas quentes e úmidas de origem equatorial, frias e secas

de origem polar, quentes e secas provindas do Anticiclone do Atlântico Sul e depressões associadas às incursões das frentes frias. Este contexto geográfico/climatológico gera uma alteração diária das condições de tempo, ocasionando contrastes térmicos e hídricos que se pronunciam numa escala diária e sazonal (Ferreira *et al.*, 2023). Estes contrastes se acentuam na escala sazonal quando prevalecem no verão sistemas tropicais, provocando temperaturas do ar e precipitação mais elevada na primavera/verão e sistemas extratropicais que propiciam as incursões de frentes frias e massas polares ocasionando a queda das temperaturas do ar e precipitação.

Reboita *et al.* (2015) destaca que o estado de Minas Gerais possui clima de monção, Marengo *et al.* (2012), evidencia que um clima sob a influência da monção pelo menos 50% da precipitação ocorre no período chuvoso.

Um fator relevante na configuração do sítio urbano de Juiz de Fora é a altimetria, que possui desníveis significativos, entre o vale do Rio Paraibuna, com cotas altimétricas próximas de 600 m e as áreas mais elevadas com altitudes acima de 900 m. Esta diferença altimétrica potencializa as temperaturas do ar mais elevadas no fundo de vale, pois conjuga as altitudes mais baixas com a área de ocupação urbana mais adensada. Estas diferenças topográficas influenciam na circulação dos ventos, com o desenvolvimento das brisas vale/montanha (Reboita *et al.* 2015).

Além disso, Juiz de Fora está sob a influência do efeito de continentalidade repercutindo em uma amplitude térmica diária significativa, estas diferenças no período de outono/inverno chegam a 19,5°C (Ferreira *et al.*, 2023).

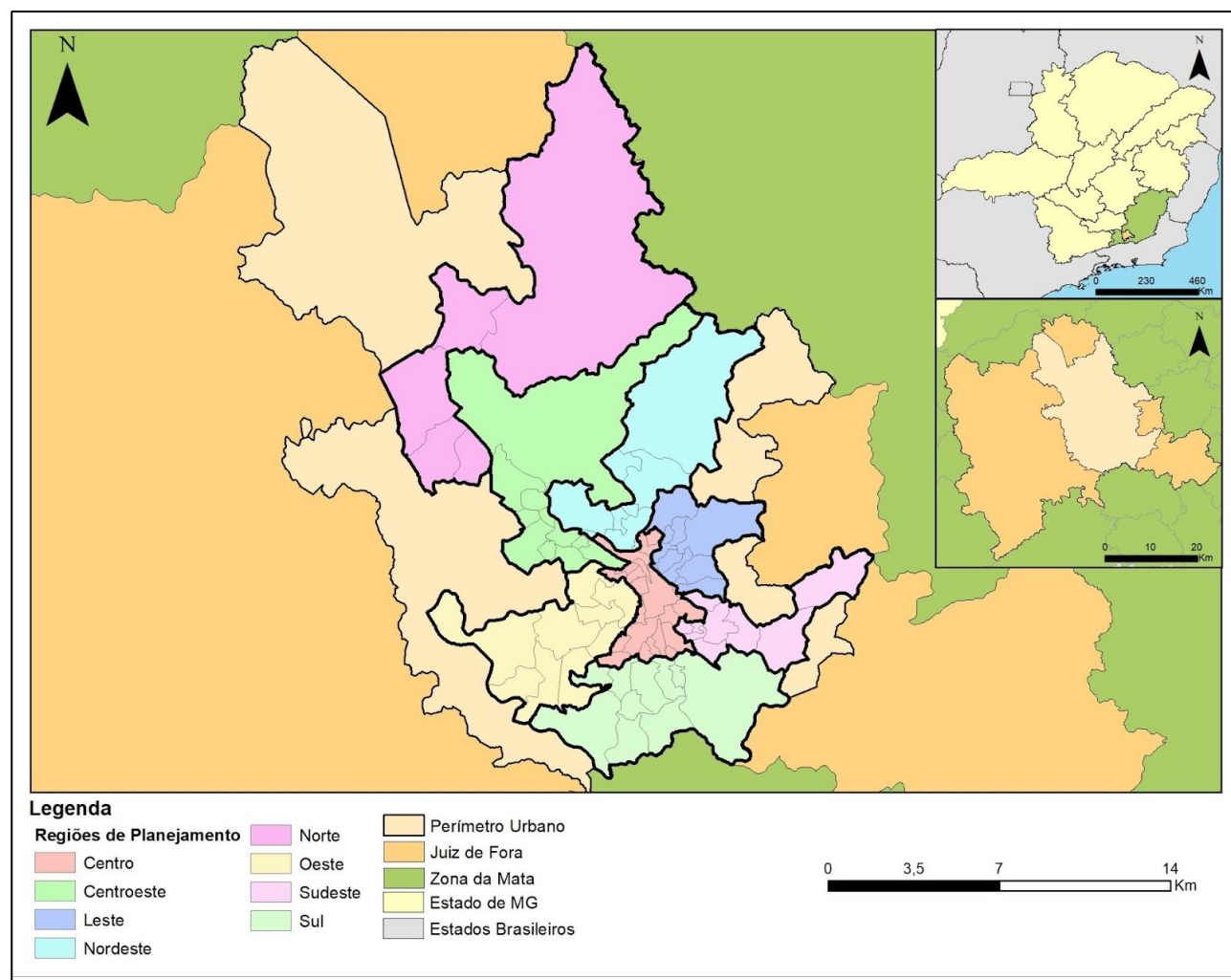


Figura 1- Mapa de Localização da cidade de Juiz de Fora-MG e das Regiões de Planejamento.

Fonte: Organizado pelos autores.

3. METODOLOGIA

A proposta metodológica de criação de um indicador de síntese para análise do clima urbano, passa pela definição e identificação dos diferentes espaços intraurbanos, com suas distintas formas, estruturas, materiais, cobertura vegetal, arruamento, albedo, etc., associado a delimitação dos espaços de vulnerabilidade, viabilizando relacionar a produção de riscos e perigos, com a produção do espaço intraurbano.

A metodologia está apoiada nos fundamentos teóricos do sistema clima urbano, numa perspectiva sistêmica e hierárquica, dando ênfase na interrelação dos fatores naturais e antrópicos, na produção do espaço intraurbano, nos fatores geográficos que configuram e reconfiguram os microclimas nos distintos espaços da cidade.

A construção da proposta metodológica seguiu os preceitos já utilizados na construção dos Mapas climáticos urbanos (Katzschner, 2015; Ng; Ren, 2015), o indicador de qualidade climática urbana proposto por Guerra e Ruiz (2021) e a metodologia de

potencial térmico (Ferreira, 2014; Ferreira; Pimentel; Vianna, 2019). No qual, utilizam dados meteorológicos, geourbanos e geoambientais, integrados em uma plataforma SIG, e utilizando a análise multicritério. O indicador avança, ao integrar mais variáveis ao modelo, tais como: a delimitação das Zonas Climáticas Locais (Stewart; Oke, 2012); áreas com risco de inundação e áreas com registro de ocorrência de movimentos de massa.

Os percursos metodológicos seguidos na construção do modelo de análise climática urbana tiveram a seguinte sequência, primeiramente foram realizados o levantamento das variáveis que iriam compor o estudo. O segundo percurso metodológico, consistiu no emprego da análise multicritério, que possibilita uma análise espacial integrada, com maior participação dos pesquisadores na definição da análise, possibilitando criar modelos descritivos e preditivos, segundo um objetivo previamente estipulado (Ferreira; Pimentel; Vianna, 2019; Teixeira; Amorim, 2022).

De forma a discriminar os percursos metodológicos utilizados na construção da proposta de um modelo de análise climática intraurbana, visando dar subsídios ao planejamento e gestão das cidades, destacamos primeiramente as variáveis utilizadas e como estas foram construídas e inseridas no modelo.

O primeiro percurso metodológico, consistiu no levantamento, organização e espacialização das variáveis utilizadas (Tabela 1). Para a classificação das unidades climáticas da cidade de Juiz de Fora, utilizando o modelo de análise climática intraurbana foi necessário definir quais variáveis deveriam compor e que teriam maior ou menor influência, no que tange às características climáticas dos diferentes ambientes intraurbanos, logo, que poderiam influenciar em maior/menor temperatura do ar, seriam mais/menos expostos a riscos de movimentos de massa e inundações, por exemplo. Para isso foi feita uma consulta junto a 08 (oito) especialistas na área de climatologia e que possuem estudos na cidade de Juiz de Fora, para que pudessem avaliar as variáveis que melhor definiriam as características geoecológicas, geourbanas e meteorológicas, além de consulta bibliográfica, permitindo a definição das variáveis citadas na figura 2.

Para cada uma das variáveis trabalhadas foi construído um mapa básico que subsidiou a criação de outros mapas temáticos (Figura 2).

Os mapas básicos e temáticos geraram um conjunto de dados geoespaciais que possibilitaram criar uma série de integrações entre as variáveis, visando alcançar um mapa de síntese e que se aproximasse da realidade. Estes mapas foram reclassificados, no quais os pesos empregados adotaram o procedimento da análise orientada por conhecimentos

especializados, nesta etapa, os especialistas foram novamente consultados, para indicar os pesos para cada variável utilizada e para cada componente das legendas.

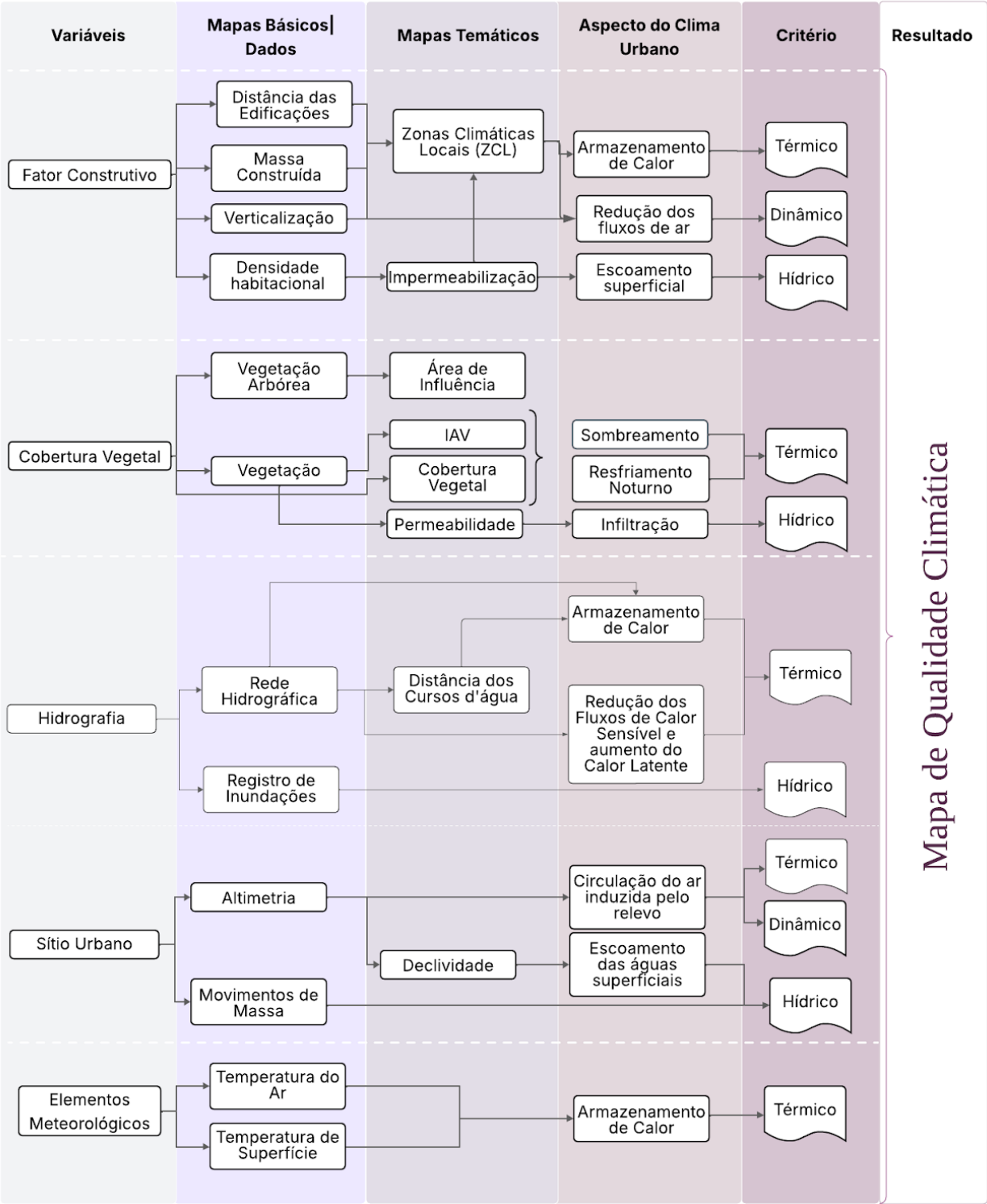


Figura 2- Caminhos metodológicos para a criação de um mapa de síntese de análise climática urbana.
Fonte: Organizado pelos autores.

Os mapas básicos e temáticos foram construídos numa base geocodificada, na escala de 1:2000, para a área urbana de Juiz de Fora-MG, foi realizada uma padronização dos valores reclassificados para cada componente de legenda, que foram divididas em 5 classes, sendo o valor 1 para as áreas com os melhores indicadores e o valor 5 para aquela com os piores indicadores. Os valores 2, 3 e 4 tiveram indicadores intermediários.

Além disso, foi definido um peso para cada mapa básico/temático baseado no grau de importância para a definição do indicador, abastecendo, desta forma, a análise multicritério. Para a análise multicritério foi utilizada a álgebra de mapas, que possibilitou detectar as áreas que se classificavam como sendo melhores, intermediárias e piores no contexto do estudo, resultando em um mapa síntese final.

O presente estudo foi aplicado para toda a área urbana da cidade de Juiz de Fora-MG, sendo mapeadas 13 variáveis consideradas pelos especialistas como importantes na definição de um modelo de análise climática intraurbana permitindo classificar a cidade de forma integrada, segundo critérios térmico, dinâmico e hídrico (Figura 2).

Posteriormente, seguiu-se a construção e classificação da variável que compõe cada mapa, seguindo a indicação do quanto a variável em uma escala de 1 a 5, seriam mais ou menos importantes para a caracterização da sua resposta térmica, hídrica ou dinâmica para a classificação climática. Desta forma, receberam os menores valores quando a variável possui baixo impacto no clima, no seu contexto térmico, hídrico ou dinâmico e um valor maior, quando possui um alto impacto. Este procedimento foi feito para cada mapa, seguindo os passos a seguir:

3.1. Impermeabilidade

A impermeabilização do solo cria uma camada de isolamento entre o solo e a atmosfera, dificultando a infiltração das águas pluviais, desta forma, ela reduz a absorção das águas pluviais, intensificando o tempo que a água leva para chegar aos cursos d'água aumentando os riscos de inundações. E intensificando as trocas energéticas entre o solo impermeabilizado e o ar, pois aumenta a absorção de energia solar (Ferreira, 2014).

Foi construído considerando duas classes dicotômicas: impermeável (área urbana e afloramento rochoso) e permeável (áreas com cobertura vegetal, água e pavimentos permeáveis).

A atribuição das notas seguiu conforme listado na tabela 1.

Tabela 1: Notas atribuídas ao atributo Permeabilidade e Impermeabilidade do solo.

Atributo: Permeabilidade e Impermeabilidade do solo	Nota
Áreas impermeáveis	1
Áreas permeáveis	5

Fonte: Organizado pelos autores.

3.2. Vegetação arbórea

Esta variável foi considerada importante, pois é considerada como a principal responsável por mitigar as temperaturas do ar e de superfície intra-urbanas (Novais *et al.*, 2022; Crispin *et al.*, 2020; Gartland, 2010; Kumar *et al.* 2024). Segundo Mascaró (2008) a presença de árvores de grande porte na área urbana tem como função principal o sombreamento, pois reduzem os “efeitos da geometria e da orientação do recinto urbano, diminuindo a assimetria das sombras decorrentes da orientação do eixo da rua. Devido ao baixo valor do albedo, a energia que gasta nos processos fisiológicos e a quantidade de vapor de água que produz, a vegetação constitui o material ideal para ser utilizado como sombreamento de verão da cidade”. (Mascaró, 2008, p.36-37)

Além disso, possui uma importante função de infiltração da água precipitada, levando a uma redução de enchentes urbanas. As notas atribuídas a esta variável estão na tabela 2.

Os dados de vegetação arbóreas foram extraídos diretamente do MapBiomas, representando 15% da área urbana da cidade de Juiz de Fora.

Tabela 2: Notas atribuídas ao atributo Vegetação Arbórea.

Atributo: Vegetação Arbórea	Nota
Outros usos	1
Vegetação Arbórea	5

Fonte: Organizado pelos autores.

3.3. Abrangência da vegetação arbórea

Marques da Silva (2023), Queirós e Rocha (2021) e Kumar *et al.* (2024) salientam que a vegetação arbórea possui uma área de influência no seu entorno, principalmente no que tange a dinâmica térmica.

Desta forma, após a construção do mapa de vegetação arbórea, foi estabelecido uma zona de frescor em torno desta vegetação, foram criados 3 buffers, um de até 40 metros ao redor da área vegetada, outro entre 41 e 70 metros e por fim, um de 71 a 100 metros (tabela 3).

Tabela 3: Notas atribuídas ao atributo Área de abrangência da vegetação arbórea.

Atributo: Área de abrangência da vegetação arbórea	Nota
Buffer de 40 metros a partir da vegetação arbórea	3
Buffer de 41 a 70 metros a partir da vegetação arbórea	2
Buffer de 71 a 100 metros a partir da vegetação arbórea	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.4. Zona Climática Local

As Zonas Climáticas locais foram adotadas como uma variável, pois sintetiza as características físicas e culturais que compõem as diferentes paisagens urbanas. Desta forma, Stewart e Oke (2012) consideram que as distintas formas e estruturas urbanas alteram a dinâmica dos fluxos de ar na camada de dossel urbano, pois interferem no transporte de calor, no comportamento da radiação de ondas curtas e longas. Pois, a superfície com distintos materiais contribui com a diminuição/aumento das taxas de albedo, emissividade e da umidade, podendo ocasionar em um maior/menor aquecimento/resfriamento da superfície.

Desta forma, as zonas climáticas foram agrupadas segundo qualidade ambiental tendo como principal critério o de sua resposta térmica e percentual de impermeabilização, conforme tabela 4.

Tabela 4: Notas atribuídas ao atributo Zonas Climáticas Locais.

Atributo: Zonas Climáticas Locais	Nota
A LCZ 1 compacta e arranha-céus, a LCZ 7 de edificações pequenas edificações aglomeradas sem muita organização, a LCZ 8 de edifícios grandes e baixos, como galpões, a LCZ 10 de grandes indústrias e a LCZ E de afloramentos rochosos ou grandes pavimentos.	1
LCZ 2 compacta média sem arborização e LC3 compacta pequenas edificações sem vegetação	2
LCZ D e F pouca vegetação e solo exposto.	3
LCZ que estão no grupo das abertas sejam com edificações: baixas, médias e altas. LCZ 4, 5 e 6.	4
LCZ 11 e 12 que representa os espaços de vegetação arbórea densos ou espaçados e a LCZ G que representa os corpos hídricos.	5

Fonte: Organizado pelos autores.

3.5. Distância dos cursos d'água e presença da lâmina d'água.

A construção destes mapas visam identificar o efeito da presença do corpo d'água e a distância em relação a ele, como um elemento atenuador na formação da ilha de calor urbano, sendo pontos com maior presença de umidade relativa do ar e menor temperatura do ar e de superfície, em função da maior assimilação do calor latente quando comparado ao calor sensível (Ferreira, 2014; Kumar *et al.*, 2024).

Desta forma, após a construção do mapa de hidrografia, foi estabelecido uma zona de frescor em torno desta hidrografia, desta forma, foram criados 3 buffers, um de até 40 metros ao redor do curso d'água, outro entre 41 e 70 metros e por fim, um de 71 a 100 metros (tabelas 5 e 6).

Tabela 5: Notas atribuídas ao atributo Cursos d'água

Atributo: Lâmina d'água	Notas
Áreas com espelho d'água	5
Outras áreas	1

Fonte: Organizado pelos autores.

Tabela 6: Notas atribuídas ao atributo Distância do curso d'água.

Atributo: Distância dos cursos d'água	Notas
O curso d'água até 40 metros mais próximos a ele	5
De 41 até 70 metros a partir do curso d'água	3
De 71 até 100 metros a partir do curso d'água	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.6. Altitude

O fator relevo é significativo na cidade de Juiz de Fora, pois a cidade teve seu crescimento inicialmente ao longo do vale do Rio Paraibuna e seus tributários, que ficam em torno de 600 m, posteriormente o crescimento se expande para as encostas e áreas mais elevadas, atingindo cotas altimétricas superiores a 900 m. Gerando uma amplitude significativa entre algumas regiões da cidade, este fato é ainda mais potencializado, pois a área da cidade mais adensada, com maior trânsito, menor presença de áreas verdes, é justamente a que está em cotas mais baixas. Potencializando, desta forma, as temperaturas de superfície e ar, associado ao relevo (Ferreira *et al.*, 2023).

Este mapa foi construído utilizando curvas de nível provenientes de dados obtidos por LiDAR (*Light Detection and Ranging*) disponibilizados pela Prefeitura de Juiz de Fora, sendo de 1m para área urbana e 5m para área rural, as duas bases foram compatibilizadas e após isso transformadas em Modelo Digital do Terreno -MDE.

Atribuição das notas seguiu a concepção que as áreas mais baixas seriam aquelas que associadas aos demais fatores (urbanização, massa construída, uso do solo) contribuiria com o registro de temperaturas mais altas, seguindo o princípio que a cada 100m o ar se resfria aproximadamente 0,6°C (Kattel *et al.*, 2019; Baratto *et al.*, 2022) (tabela 7).

Tabela 7: Notas atribuídas ao atributo Altitude.

Atributo: Altitude (m)	Notas
➤ 500	1
501 - 600	2
601 - 700	3
701 – 800	4
< 801	5

Fonte: Organizado pelos autores.

3.7. Temperatura de superfície

A temperatura de superfície foi considerada por evidenciar as áreas que possuem coberturas do solo mais quentes/frias, auxiliando na detecção dos focos de calor.

Os dados da temperatura de superfície são oriundos do *Landsat* Collection 2 (C2) Level-2 Science Products (L2SP)¹ do Landsat 8/9. A imagem utilizada foi do dia 10 de novembro de 2023, um dia sob atuação de uma onda de calor, sob atuação de uma condição de estabilidade atmosférica associada à atuação do Anticiclone do Atlântico Sul (ASAS).

Dependendo da área, o raster pode vir com algumas falhas devido ao uso da emissividade do satélite Aster. Os dados foram reamostrados para o tamanho do pixel de 5m.

Os dados de temperatura de superfície foram reclassificados por meio de quartis sendo as classes da legenda que estão as temperaturas de superfície mais elevadas consideradas de pior qualidade, quando analisadas sob o efeito térmico (tabela 8).

Tabela 8: Notas atribuídas ao atributo Temperatura de Superfície.

Atributo: Temperatura de Superfície (°C)	Notas
28,5 – 34,6	5
34,7 – 36,5	4
36,6 – 38,0	3
38,1 – 40,0	2
40,1 – 51,6	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.8. Temperatura do ar

A espacialização da temperatura do ar na área urbana da cidade de Juiz de Fora, nos permite identificar as diferenças na temperatura do ar intraurbana. Esta variável, conjugada com as demais, nos permite relacionar como a cidade nas suas diferentes formas, estruturas, materiais, geometria urbana, entre outras influenciam significativamente na temperatura do ar.

Os dados de temperatura do ar foram coletados em dois trabalhos de campo, realizados em dois períodos distintos, durante o ano de 2023, um primeiro levantamento foi realizado em 13 de julho a 16 de setembro e o outro se estendeu entre 01 de outubro a 12 de novembro. Os termômetros foram instalados em diferentes ambientes seguindo a classificação realizada na delimitação das Zonas Climáticas Locais, tentando abranger lugares com diferentes características. Os termômetros com *data logger* foram programados para realizarem os registros a cada horário, posteriormente foram retiradas as temperaturas máxima e mínima e calculadas as médias diárias. Os dados foram organizados em uma planilha, espacializados e posteriormente interpolados. A técnica utilizada para a interpolação dos dados de temperatura do ar foi a Krigagem. Os dados de temperatura do ar tiveram o mesmo comportamento dos dados de temperatura de superfície, optando-se neste trabalho em utilizar os dados apenas da temperatura de superfície, para evitar a sobreposição de informações, e consequente sobre peso nesta variável.

3.9. Verticalização

A verticalização foi uma variável trabalhada para gerar dois dados, um primeiro que mostrasse os cânions urbanos e um segundo para o cálculo da massa construída. Oke (1981) destaca que a geometria urbana tem uma função importante na intensidade da ilha de calor, associado a geometria urbana, temos os cânions urbanos, que produz uma “regulação da perda de calor por radiação de onda longa” no seu interior (Nakata- Osaki, *et al.*, 2016, p.75), apresentando, portanto, uma importante variável na análise do ambiente térmico urbano.

Para a caracterização e classificação das edificações baseou-se nas classes que Stewart e Oke (2012) propuseram para separar as características das zonas climáticas urbanas. A origem dos dados vem da base de lotes da prefeitura de Juiz de Fora e sobre ele foi feito mapeamento do número de pavimentos pelo *Google Street View*. Sobre os lotes foram aplicadas correções quando a edificação ocupa menos que 75% da área do lote, o mesmo foi reduzido para o tamanho da edificação, evitando superestimar tais valores. A atribuição das notas está presente na tabela 9.

Tabela 9: Notas atribuídas ao atributo Verticalização.

Atributo: Verticalização (Andares)	Notas
1 - 2	5
3 - 5	4
6 - 8	3
9 - 12	2
Acima de 12	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.10. Massa Construída

A massa construída foi incorporada ao estudo, pois influencia no armazenamento da radiação solar incidente, associado aos materiais e as dimensões das construções, constituindo-se, desta forma, em uma variável importante na definição de campos térmicos intraurbanos (Pimentel e Ferreira, 2019).

Utilizou-se para cálculo dessa variável a fórmula descrita por Vianna *et al.* (2020). A base de dados é a mesma dos dados de verticalização. A classificação foi feita por quartis com base na massa construída do total de lotes da cidade (tabela 10).

Tabela 10: Notas atribuídas ao atributo Massa Construída.

Atributo: Massa Construída	Notas
0-535.146	5
535.146-762.750	4
762.751-1.319.513	3
1.319.513-3.426.851	2
3.426.851-3.565.0479	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.11. Índice de Áreas Verdes

Em um estudo realizado por Kumar *et. al.* (2024) destacam como a presença de áreas verdes são importantes na minimização do calor em várias cidades do mundo. O estudo aponta que a temperatura chega a ser 5° mais baixa em alguns tipos de áreas verdes, como jardins botânicos. Considerando as áreas verdes como áreas mitigadoras de calor e também como áreas onde ocorrem maior infiltração da água no solo, retardando a chegada da mesma nos cursos d'água, esta variável vem sendo considerada em diferentes planos de adaptação climática urbana, como fundamentais na redução das temperaturas intraurbanas e na redução dos efeitos das chuvas em superfície (Prefeitura do município de São Paulo, 2021).

Os dados utilizados referentes ao Índice de Áreas verdes-IAV são do estudo realizado por Araújo (2014) para a cidade de Juiz de Fora. Esse índice relaciona a superfície de áreas verdes públicas dividida por habitante por região urbana na cidade. Conforme o referido

trabalho aponta a Organização Mundial de Saúde (OMS) adota o valor de 9 m²/hab como desejável para uma boa qualidade de vida (tabela 11).

Tabela 11: Notas atribuídas ao atributo Índice de Áreas Verdes.

Atributo: Índice de Áreas Verdes (IAV) – m²/hab	Notas
➤ 9	3
3,9 – 8,9	2
1 – 3,8	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.12. Movimentos de Massa

Esta variável foi adotada no modelo, por representar as áreas que já estão ocorrendo movimentos de massa e que deveriam ser melhor monitoradas seja pela sua suscetibilidade ambiental. Evidenciando as áreas já atingidas pelos impactos meteóricos.

Para a caracterização desta variável, optou-se por utilizar o número de ocorrências de movimento de massa, registradas nos últimos 10 anos conforme Oliveira (2021). Optou-se por essa variável, em vez da suscetibilidade a movimento de massa da carta de riscos, pois mesmo que uma área tenha suscetibilidade a tal evento, isto pode ser contornado com adequado emprego de técnicas de engenharia e planejamento adequado no seu uso e ocupação. Por exemplo: a RU do Morro do Imperador, na carta de riscos, possui áreas com altíssimo risco de movimento de massa, devido a sua elevada declividade, mas dada a ocupação da área de moradias de alto padrão, não foi registrada nenhuma ocorrência nos últimos 30 anos. A classificação foi realizada por quartis com base no registro das ocorrências (tabela 12).

Tabela 12: Notas atribuídas ao atributo Movimento de Massa.

Atributo: Movimento de Massa Número de ocorrências	Notas
0	5
4	4
2-3	3
4 - 7	2
➤ 8	1

Fonte: Organizado pelos autores.

3.13. Inundação

Esta variável foi adotada no modelo, por representar as áreas que houve registros de inundação. A da cidade de Juiz de Fora se desenvolveu ao longo das várzeas dos cursos d'água e ficando desta forma, mais suscetível em algumas localidades a ocorrência de

inundação, mesmo neste caso, desconsiderando os recursos tecnológicos que já foram empregados ao longo do tempo, visando mitigar estas ocorrências.

Os registros de inundação são oriundos do mesmo levantamento de dados da variável movimentos de massa (Oliveira, 2021).

Tabela 13: Notas atribuídas ao atributo Registros de Inundação.

Atributo: Registros de Inundação	Notas
Áreas sem registro de inundação	5
1 a 2 registros	4
3 a 5 registros	3
6 a 9 registros	2
10 a 50 registros	1

Fonte: Organizado pelos autores

3.14. Mapa de Análise Intraurbana

Este mapa é o resultado de síntese, no qual foram analisadas de forma conjunta todas as 14 variáveis adotadas no modelo, permitindo fazer uma análise integrada e espacial.

O mapa de análise climática é resultado da soma dos 14 rasters das variáveis utilizadas (Figura 1). Esse procedimento é realizado na *Calculadora de Raster* no software de Geoprocessamento. Sendo a equação:

$$\text{"IVA"} + \text{"Vegetação Arbórea"} + \text{"Vegetação Buffer"} + \text{"Impermeabilização"} + \text{"Água Buffer"} + \text{"Represas e Principais cursos hídricos"} + \text{"Verticalização"} + \text{"Massa Construída"} + \text{"ZCL"} + \text{"Altitude"} + \text{"S"}$$

Desse resultado foi exportado a tabela de atributos e feito uma análise do total de pixels da imagem (2.541.519). Desses, foram arredondados os valores de pixels que suas quantidades fossem insignificantes, o critério foi número de pixels menor que 0,01% do total de pixels, ou seja, menor que 2541 pixels. Esses valores aparecem no início ou no fim da distribuição por isso foram arredondados para o valor mais próximo significativo, através da ferramenta de reclassificação. Isso é comum de acontecer devido às diferentes bases de dados utilizadas com resoluções diversas.

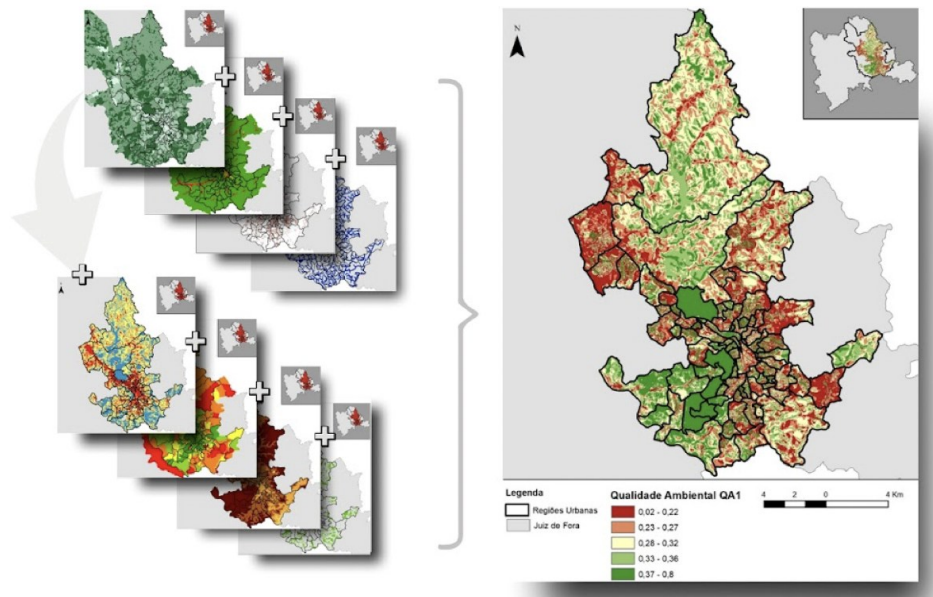


Figura 3 - Representação da análise integrada dos dados utilizados no modelo de análise do clima intraurbano. **Fonte:** Organizado pelos autores.

Posteriormente foi realizado o procedimento de normalização, este procedimento é realizado para que os valores no interior do mapa fiquem entre 0 e 1, representando as diferentes classes no mapa, sendo 1 ambientes que possuem uma caracterização climática que produziram menores impactos em superfície e nos sujeitos e 0 para aqueles ambientes que estão com as características climáticas que poderiam impactar mais a superfície e os sujeitos. Facilitando o comparativo entre áreas diferentes e modelos com muitas variáveis. Para isso foi utilizado a fórmula:

$$X_c = \frac{X - X_{min}}{X_{Max} - X_{Min}}$$

No raster Calculator a aplicação desta fórmula fica:

Float(("QualidadeAmbiental"-10)/Float(41-10))

Onde:

“QualidadeAmbiental” é o raster do somatório das variáveis, não normalizado, mas após exclusão dos valores insignificantes

X_{min} = 10, que é o menor valor com número de pixels significantes.

X_{Max} = 41 maior valor com número de pixels significantes do raster de qualidade ambiental

Os valores resultantes foram classificados pelo percentil em 5 classes:

Tabela 16: Classes do mapa de Análise climática intraurbana.

Categoria	Qualidade Climática
Muito Baixa	0 – 0,30
Baixa	0,31-0,40
Média	0,41 – 0,50
Alta	0,51 – 0,64
Muito Alta	0,65 – 1,00

Fonte: Organizado pelos autores.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As intensas alterações no ambiente urbano podem gerar mais riscos, como o aumento das temperaturas de superfície, que contribui para a elevação da temperatura do ar; a impermeabilização do solo, que aumenta o escoamento superficial e reduz a infiltração da água, resultando em mais inundações e enchentes. Dessa forma, o conflito frequente entre os processos sociais e naturais gera problemas recorrentes associados à formação do clima urbano. Amorim (2013, p. 174) destaca que “novas características geoecológicas e urbanas modificam os elementos (controles, atributos) do clima, dando-lhe respostas próprias do clima urbano”.

Observa-se, portanto, que a cidade de Juiz de Fora-MG, com suas diferentes formas, geometrias, orientações das edificações, materiais utilizados nas construções e pavimentos, usos do solo, densidade populacional, verticalização, cânions urbanos, distribuição irregular de áreas verdes, altimetria, declividade, geração de calor antropogênico e alterações na composição físico-química da atmosfera em função da maior emissão de poluentes, apresenta um balanço de energia típico de áreas urbanas. Nessa condição, a atmosfera urbana torna-se mais eficiente na retenção de calor, associada a uma cidade que absorve e armazena mais energia e, portanto, emite mais radiação para a atmosfera. Todas essas características e variáveis se combinam dentro da cidade, criando múltiplos microambientes e, conseqüentemente, diferentes condições microclimáticas — alguns locais mais quentes, outros mais frios, úmidos, secos etc. Isso gera fenômenos como ilhas de calor, ilhas de frescor e potencializa efeitos como a inversão térmica e o efeito estufa.

O modelo de síntese de análise do clima intraurbano permite realizar uma análise isolada ou integrada das variáveis que compõem e sofrem influência do clima urbano. Assim, as variáveis foram selecionadas por sua capacidade de influenciar positiva ou negativamente o balanço de energia e/ou os impactos das precipitações na superfície. Por exemplo, quanto maior a incidência de variáveis com alto potencial de armazenar energia ou de intensificar o impacto das chuvas, maior será a classificação da área como de alta

atenção climática, exigindo ações do poder público para mitigar a temperatura do ar e minimizar os impactos das precipitações. Por outro lado, áreas com variáveis com alto potencial de mitigação da temperatura e dos efeitos das precipitações serão classificadas como de baixa atenção quanto aos efeitos/impactos climáticos.

Ao analisarmos o mapa de síntese (Figura 4), observamos que a impermeabilização do solo, associada à massa construída, ausência de arborização ou áreas verdes, maior verticalização e presença de cânions urbanos, resulta em temperaturas de superfície mais elevadas, influenciando também na temperatura do ar adjacente. Essa é a realidade da região central, com aproximadamente 97,4% de sua superfície impermeável e apenas 2,6% de áreas verdes, além da concentração de edificações com mais de oito pavimentos (Gartland, 2010).

No que tange aos cânions urbanos, destaca-se que sua morfologia dificulta a dissipação de energia térmica armazenada pelas edificações, além de influenciar na exposição da superfície à radiação solar direta (Oke, 1981). Na região central da cidade, esse fenômeno é mais evidente, com ruas estreitas ladeadas por edifícios altos, o que provoca sombreamento e reduz a velocidade dos ventos e os processos convectivos, contribuindo para o acúmulo de calor. Essas ruas também apresentam alto fluxo de veículos, o que agrava a poluição do ar e o aumento da temperatura. Essa situação é marcante no centro da cidade.

A taxa de impermeabilização do solo é maior na região central. Oke (1982, 2017) enfatiza que uma das principais diferenças nos processos térmicos entre a cidade e seu entorno rural está na forma como os fluxos de calor sensível e latente são distribuídos. Nas áreas urbanas, há menos perda de calor por evaporação, devido à predominância de superfícies impermeáveis e com alta capacidade térmica, o que aumenta o fluxo de calor sensível. Durante o dia, há maior armazenamento de calor, e à noite, a perda térmica depende da quantidade de calor retida pela superfície.

Ao analisarmos a ocorrência de áreas verdes, corpos hídricos, áreas permeáveis e temperaturas do ar e da superfície, Gartland (2010) destaca que áreas com vegetação tendem a se manter frescas sob exposição solar, desde que bem irrigadas, reduzindo a temperatura de superfície. Oke (1978) recomenda um índice mínimo de 30% de cobertura vegetal em áreas urbanas para manter um balanço térmico adequado, alertando que valores abaixo de 5% podem gerar características semelhantes às de um deserto — situação próxima da realidade da região central. A vegetação e as lâminas d'água apresentam alto albedo e baixa emissividade, sendo eficientes na manutenção de

ambientes mais frescos. Destaca-se que a região Oeste bem como parte das regiões Norte e Centro-Oeste, apresentam áreas verdes mais expressivas, o que reduz a temperatura e melhora o conforto térmico. No entanto, nas regiões Centro-Oeste e Norte, a vegetação é distribuída de forma esparsa, o que reduz sua eficácia no clima local. A presença de cursos d'água também contribui para a ventilação e melhora da aerodinâmica urbana, o que pode ajudar a reduzir as temperaturas do ar e da superfície.

O mapa climático intraurbano de síntese (Figura 4 e Tabela 17) permite a análise integrada das variáveis analisadas. Identifica-se que as regiões Norte e Nordeste apresentam temperaturas mais amenas, influenciadas pela cobertura vegetal e pela Represa João Penido. A presença de vegetação atua como fator mitigador da temperatura do ar. Os dados de temperatura do ar refletem a expressiva cobertura vegetal e o corredor de ventos proporcionado pelo rio Paraibuna e pela Represa João Penido, ambos com efeito atenuador. No entanto, ao se considerar as áreas edificadas dessas regiões, observa-se um aumento expressivo do potencial térmico, redução do potencial dinâmico e, consequentemente, uma piora da qualidade climática.

Conforme apresentado na Figura 4 e Tabela 17, a vegetação se destaca como um elemento de grande relevância para a qualidade climática de uma área, corroborando a literatura (Novais *et al.*, 2022; Crispin *et al.*, 2020; Gartland, 2010; Kumar *et al.*, 2024). Regiões com maior percentual de cobertura vegetal apresentaram melhor qualidade climática, como é o caso da região Oeste da cidade. Esta área, também conhecida como "cidade alta", possui altitudes superiores em relação ao vale do Rio Paraibuna, destacando-se principalmente a região central. Esse fator altimétrico contribui para temperaturas do ar mais amenas em comparação às áreas situadas no vale, sendo também um aspecto relevante na definição das classes climáticas. Dentre as variáveis analisadas, destacamos a relevância da cobertura vegetal na regulação térmica e hídrica nas diferentes regiões de planejamento da cidade.

Ao analisarmos as duas regiões de planejamento que mais contrastam em termos de características climáticas — a região Central e a região Oeste —, observamos diferenças significativas. A região Central é marcada por elevada densidade de ocupação, verticalização acentuada, intenso fluxo de veículos e alta impermeabilização do solo. Já a região Oeste apresenta maior cobertura vegetal, solo mais permeável, menor densidade de ocupação, localização periférica e altitudes mais elevadas, além de ser menos verticalizada. Esse conjunto de características contribui para temperaturas do ar e da superfície mais amenas, ressaltando a função mitigadora das áreas com cobertura vegetal nas cidades e

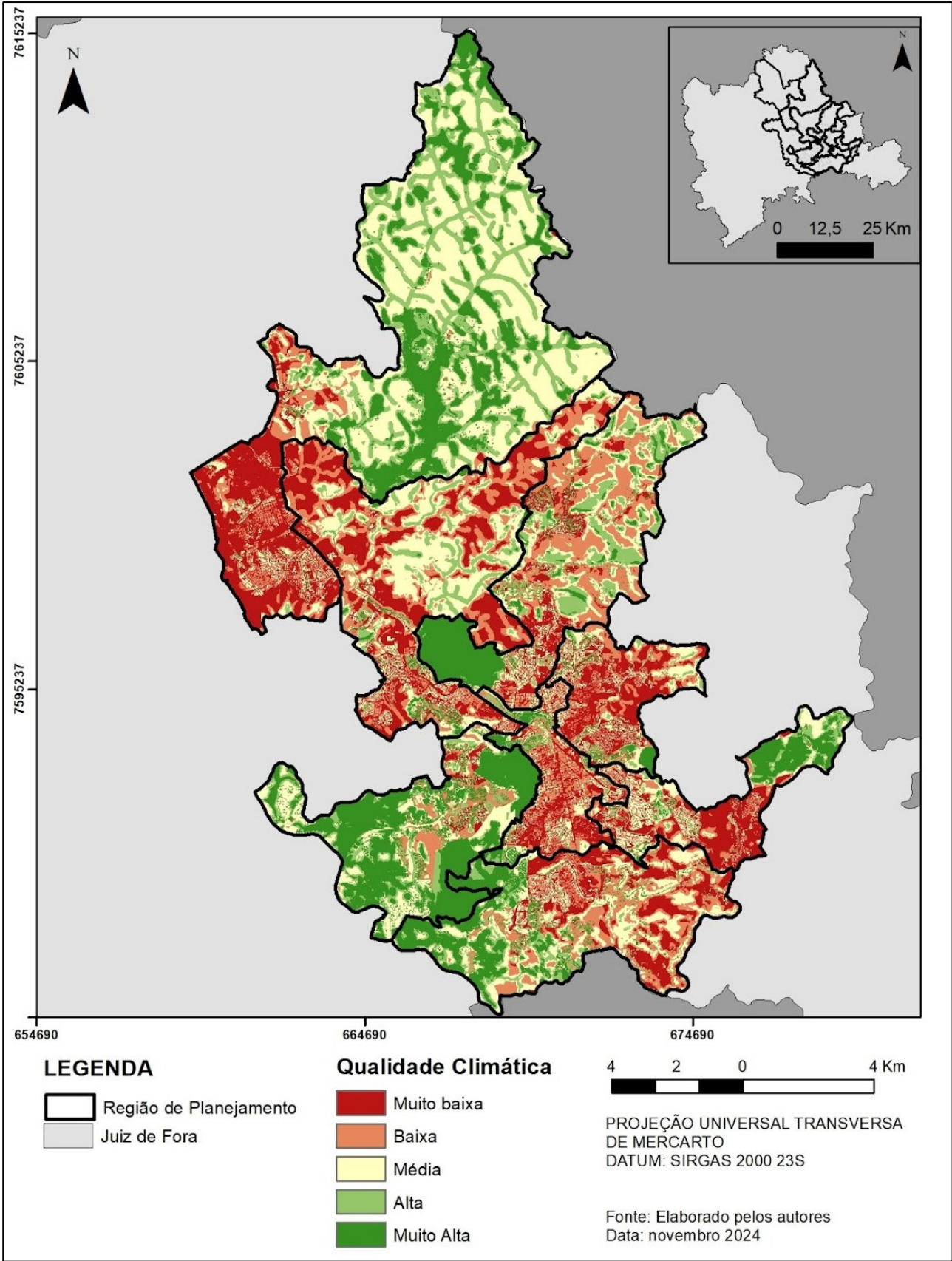


Figura 4 – Mapa de síntese de análise climática urbana.
Fonte: Organizado pelos autores.

Tabela 17: Caracterização das classes do mapa de Qualidade Climática.

Categoria	Qualidade climática	Caracterização
Muito baixa	0-0,30	Áreas que predominam temperatura de superfície mais elevadas, associadas a alta massa construída, maior verticalização, baixa IAV e vegetação arbórea. Apresentou ocorrência de movimentos de massa e inundações.
Baixa	0,31 -0,40	Áreas em situação um pouco melhor do que na classe “Muito Baixa” apresentando as variáveis geoambientais e geourbanas potencializadoras dos campos térmicos e hídricos e com baixa influência do campo dinâmico. Ressalta-se a baixa presença das variáveis que possuem efeito mitigador para os campos térmicos e hídricos, como a cobertura vegetal, IAV, raio de influência da vegetação.
Média	0,41 - 0,50	Área intermediária, porém, ainda são presentes as variáveis geourbanas e geoambientais que influenciam no campo térmico e hídrico e minimiza o campo dinâmico.
Alta	0,51 - 0,64	Áreas que predominam temperatura de superfície amenas, associadas a uma menor massa construída e verticalização, maior presença de IAV e vegetação arbórea. Apresentou menor ocorrência de movimentos de massa e inundações.
Muito Alta	0,65 – 1,00	Áreas consideradas com uma melhor qualidade climática, quando analisados os campos térmicos, hídrico e dinâmico. Apresentam a ocorrência de mais áreas verdes, influenciando na mitigação da temperatura e nas ocorrências de movimentos de massa e inundações.

Fonte: Organizado pelos autores.

Destaca-se que, em todas as regiões de planejamento, as áreas mais densamente ocupadas — com maior massa construída, ausência ou escassez de vegetação arbórea e áreas verdes, impermeabilização predominante e maior verticalização — apresentaram qualidade climática inferior quando comparadas a áreas com presença de vegetação e menor adensamento urbano. Essa situação é evidente na análise isolada dos mapas de temperatura da superfície e do ar.

Ao considerarmos o critério hídrico, identificamos que áreas já críticas do ponto de vista térmico também se destacam negativamente. Observa-se maior incidência de movimentos de massa — frequentemente associados à ausência de vegetação, elevada impermeabilização do solo e maiores declividades — nas regiões de planejamento Leste, Centro-Oeste e Sul. Já as regiões Sul, Nordeste e Centro apresentam maior risco de inundações, especialmente nas áreas próximas a cursos d'água, onde há maior adensamento urbano, impermeabilização do solo e ausência de cobertura vegetal. Tais fatores agravam as condições dessas áreas, já classificadas como críticas sob o ponto de vista térmico. Segundo Amorim (2000), as alterações na paisagem urbana também influenciam o balanço hídrico, uma vez que os cursos d'água são retificados e/ou

canalizados, e a cobertura do solo, modificada, altera a relação entre permeabilidade e impermeabilidade. Essas intervenções favorecem a ocorrência de inundações, enchentes urbanas, enxurradas, entre outros eventos extremos.

Dessa forma, a análise conjunta de variáveis e elementos meteorológicos, em escala de detalhe, possibilita uma representação espacial individualizada e integrada dessas variáveis, expressa no mapa síntese da qualidade climática. Esse instrumento pode ser utilizado para diversas finalidades, com destaque para o planejamento e a gestão urbanos, além da formulação de planos de adaptação às mudanças climáticas.

5. CONCLUSÕES

A metodologia utilizada para a geração do mapa síntese de análise climática intraurbana possui uma abordagem sistêmica, na qual são considerados diversos dados e informações que, posteriormente, são avaliados e classificados de forma empírica por climatologistas. Esses especialistas avaliam a influência das variáveis como elementos e fatores com potencial para gerar mais ou menos calor, além de seu impacto nas repercussões das chuvas em superfície. Essa abordagem pode ser considerada uma limitação à aplicação e reprodução do modelo, devido ao grau de subjetividade envolvido. No entanto, apesar disso, os mapas básicos e a classificação das variáveis possuem a vantagem de serem facilmente reproduzidos, atualizados, testados e aperfeiçoados com rapidez.

O número de variáveis utilizadas e a necessidade de seu mapeamento detalhado podem representar um obstáculo à aplicação dessa metodologia em diversas cidades brasileiras, especialmente naquelas que não dispõem de um levantamento cartográfico minucioso de suas áreas urbanas.

A cidade, com suas diferentes materialidades — aqui destacadas pela geometria urbana (disposição, altura, densidade dos edifícios, tipos de pavimentação e coberturas, distribuição e incidência de espaços verdes e livres) — constitui um espaço em que esses diversos materiais reagem e interagem com a radiação solar e com a temperatura do meio. Isso gera características microclimáticas locais que podem levar à formação de ilhas de calor. Portanto, tais aspectos devem ser considerados no planejamento e na gestão urbanos, pois contribuem para o desenvolvimento de cidades mais saudáveis e sustentáveis.

REFERÊNCIAS

AIRES, M.; OLIVEIRA, J. L. F.; CASTRO JÚNIOR, J. M.; OLIVEIRA, M. M. F.; EBECKEN, N. F. F. Análise e modelagem numérica da atmosfera na avaliação e prevenção de riscos decorrentes de eventos meteorológicos extremos: estudo de caso para Petrópolis, RJ – Brasil. In: LOURENÇO, L.; VIEIRA, A. **Metodologia de análise de riscos através de estudos de casos**. Coimbra: Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, 2018. cap. 12, p. 311-330.

ALVES, E. D. L.; GALVANI, E. Modelagem da ilha de calor urbana de superfície utilizando regressão geograficamente ponderada (GWR). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

ALVES, R. S.; FERREIRA, C. C. M. Os campos térmicos na cidade de pequeno porte, Alvinópolis-MG: simulação computacional e episódios de inverno de 2018. In: FERREIRA, C. C. M.; FIALHO, E. S.; OLIVEIRA, T. A. (Org.). **Experimentos em Climatologia Geográfica**. Juiz de Fora: Editora UFJF, 2021. v. 1, p. 157-186.

AMORIM, M.; DUBREUIL, V.; TEIXEIRA, D. C. F.; AMPRIM, A. T. Exceptional heat island intensities also occur in medium-sized cities. **Urban Climate**, v. 53, p. 101821, 2024.

AMORIM, M. C. C. T. **O clima urbano de Presidente Prudente/SP**. 2000. 378 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

AMORIM, M. C. C. T. Ritmo climático e planejamento urbano. In: AMORIM, M. C. C. T.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MONTEIRO, A. (Org.). **Climatologia urbana e regional: questões teóricas e estudos de caso**. São Paulo: Outras Expressões, 2013. p. 173-190.

ARAÚJO, C. M. A. **Áreas verdes públicas de Juiz de Fora: uma análise do estado da arte nos dias de hoje**. 2014. 136 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.

BARATTO, J.; GOBO, J. P. A.; GALVANI, E.; WOLLMANN, C. A. Metodologia para a estimação da temperatura do ar em função da altitude a partir de dados de perfil topoclimático. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 30, n. 18, p. 112–132, 2022.

BORNSTEIN, R.; STYRBICKI-IMAMURA, R.; GONZALEZ, J. E.; LEBASSI-HABTEZION, B. Interactions of global-warming and urban heat islands in different climate-zones. In: FERNANDO, H. J. S.; KLAIC, Z.; McCULLEY, J. L. (Ed.). **National security and human health implications of climate change**. Dordrecht: Springer, 2012.

CRISPIM, D. L.; BEZERRA, P. E. S.; LIMA, G. V. B. A.; PEREIRA, M. M.; FERNANDES, L. L. Análise de índice de vegetação e a temperatura da superfície no município de Santa Luzia do Pará, Amazônia. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 10, p. 77–86, 2020.

FERREIRA, C. C. M. Modelo para análise das variáveis de cobertura da terra e a identificação de microclimas, em centros urbanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 14, p. 50-75, 2014.

FERREIRA, C. C. M.; ASSIS, D. C. O mapeamento do albedo e análise de sua influência na caracterização de microclimas de áreas urbanas. In: FERREIRA, C. C. M. (Org.). **Experimentos em Climatologia Geográfica**. Dourados: UFGD, 2014. v. 1, p. 201–220.

FERREIRA, C. C. M.; PIMENTEL, F. O.; VIANNA, Y. C. G. Proposta metodológica aplicada ao estudo de clima urbano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, p. 2023–2040, 2019.

FERREIRA, C. C. M.; SANCHES, F. O.; OLIVEIRA, T. A.; VIANNA, Y. C. G.; TAVARES, C. M. G. **Clima de Juiz de Fora**: 50 anos de dados meteorológicos. Juiz de Fora: Editora UFJF, 2023. 82p.

FLÖRKE, M.; SCHNEIDER, C.; MCDONALD, R. I. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. **Nature Sustainability**, v. 1, p. 51–58, 2018.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 256p.

GASPARRINI, A. et al. Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. **The Lancet: Planetary Health**, v. 1, n. 9, p. 360–367, 2017.

GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 38, p. 1262, 1999.

GUERRA, P. S.; RUIZ, C. H. Propuesta de un indicador para evaluar la calidad climática urbana: estudio de caso en una ciudad media mediterránea chilena. **Cuadernos de Geografía**: Revista Colombiana de Geografía, v. 30, n. 1, p. 144–157, 2021.

HOLLÓSI, B.; ŽUVELA-ALOISE, M.; OSWALD, S. Applying urban climate model in prediction mode—evaluation of MUKLIMO_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 144, p. 1181–1204, 2021.

IPCC. **Climate Change 2023**: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023.

KATTEL, D. B.; YAO, T.; ULLAH, K.; RANA, A. S Seasonal near-surface air temperature dependence on elevation and geographical coordinates for Pakistan. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 138, p. 1591–1613, 2019.

KATZSCHNER, L. On the issue of scales of urban climatic maps. In: NG, E.; REN, C. (Org.). **The urban climate map**: a methodology for sustainable urban planning. New York: Routledge, 2015. p. 205–222.

KOUTROUMANOU-KONTOSI, K.; CARTALIS, C.; PHILIPPOPOULOS, K.; AGATHANGELIDIS, I.; POLYDOROS, A. A methodology for bridging the gap between regional- and city-scale climate simulations for the urban thermal environment. **Climate**, v. 10, n. 106, 2022.

KUMAR, P. et al. Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: drivers, effectiveness, and future needs. **The Innovation**, v. 5, n. 2, p. 100588, 2024.

MARENGO, J. A. et al. Review: recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 1, p. 1–21, 2012.

MARQUES DA SILVA, J. Influência da vegetação arbórea no conforto térmico de área urbana. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 1, p. 633–645, 2023.

MASCARO, J. J. Significado ambiental-energético da arborização urbana. **RUA: Revista de Urbanismo e Arquitetura**, 2008.

ASIERO, E.; CHRISTOFORO, A. L.; KOWALSKI, L. F.; FERNANDES, M. E. Urban morphology and prediction models of microclimatic phenomena in dry atmospheric context. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, n. 18, p. 259–284, 2022.

MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 94, p. 357–397, 2000.

MOREIRA, E. B. M.; NÓBREGA, R. S.; SILVA, B. B.; RIBEIRO, E. P. O modelo SEBAL para estudos de clima intraurbano: aplicação em Recife, Pernambuco, Brasil. **RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 39, p. 247–265, 2017.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 73–87, 2016.

NG, E.; REN, C. **The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning**. London: Routledge, 2015. 542p.

NOVAIS, J. W. Z.; RIBEIRO, T. S.; SILVA, R. B. D. S. L.; SOUZA, P. J. Influência da inserção de vegetação na temperatura do ar de um loteamento de interesse social em Cuiabá/MT. **Nature and Conservation**, v. 15, n. 1, p. 48–54, 2022.

OKE, T. R. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, p. 1–24, 1982.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen & Co Ltd. 1978.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237–254, 1981.

OLIVEIRA, T. A. **O clima urbano como risco climático: os impactos das chuvas em Juiz de Fora no período de 1980–2018**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **68% of the world population projected to live in urban areas by 2050, says UN**. 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-PressRelease.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2024.

PIMENTEL, F. O.; FERREIRA, C. C. M. Clima urbano: o uso de modelos geoespaciais na investigação do comportamento térmico em Juiz de Fora–MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2021.

PORANGABA, G. F. O.; GALVANI, E.; AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor superficiais e ondas de calor em Três Lagoas, MS: análise pela ótica do risco e da vulnerabilidade socioambiental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 35, p. 275–296, 2024.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Plano de Ação Climática do Município de São Paulo – PlanClima SP**. São Paulo: Secretaria do Verde e do Meio Ambiente, 2021. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/mudancas_climaticas/. Acesso em: 7 mai. 2025.

QUEIRÓS, G. R. S.; ROCHA, M. N. Influência da vegetação e corpos hídricos no clima urbano na sede municipal de Quixeramobim–CE. **Revista GeoUECE**, v. 10, n. 19, p. e202104, 2021.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, dez. 2015.

REN, C. A review of the historical development of urban climatic map study. In: NG, E.; REN, C. **The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning**. London; New York: Routledge, 2015. cap. 2, p. 10–35.

RIBEIRO, M. C. A.; PINTON, L. G.; CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Spatial and temporal dynamics of the urban heat island effect in a small Brazilian city. **Geographical Research**, v. 60, p. 1–13, 2023.

SILVA FILHO, A.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, C. A. S.; ALMEIDA JÚNIOR, E. S. Estimativa do balanço de energia pelo método da razão de Bowen a partir de medidas de protótipo de estação micrometeorológica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, p. 134-150, 2019.

STATHOPOULOU, M. A. SYNNEFA, A.; CARTALIS, C.; SANTAMOURIS, M.; KARLESSI, T.; AKBARI, H. A surface heat island study of Athens using high-resolution satellite imagery and measurements of the optical and thermal properties of commonly used building and paving materials. **International Journal of Sustainable Energy**, v. 28, p. 59-76, 2009.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, p. 1879–1900, 2012.

TEIXEIRA, D. C. F.; AMORIM, M. C. C. T. Multicriteria spatial modeling: methodological contribution to the analysis of atmospheric and surface heat islands in Presidente Prudente, Brazil. **Climate**, v. 10, p. 56, 2022.

UNITED NATIONS – UN-HABITAT. **Nova Agenda Urbana**. 2016. Disponível em: <http://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Portuguese-Angola.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2024.

VIANNA, Y. C. G.; PIMENTEL, F. O.; FERREIRA, C. C. M. Modelagem e identificação de campos térmicos em Ubá–MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 1–28, 2020.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature. *International Journal of Remote Sensing*, v. 19, p. 895, 1998.

WONG, N. H.; JUSUF, S. K.; TAN, C. L. Integrated urban microclimate assessment method as a sustainable urban development and urban design tool. **Landscape and Urban Planning**, v. 100, p. 386–389, 2011.

Recebido: 20/05/2025

Aceito: 17/10/2025