

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Programa de Pós-graduação em Geografia**  
**Instituto de Geociências**

Franciele de Oliveira Pimentel

**O CLIMA URBANO EM JUIZ DE FORA – MG: uma abordagem a partir das**  
**Zonas Climáticas Locais**

Belo Horizonte  
2025

Franciele de Oliveira Pimentel

**O CLIMA URBANO EM JUIZ DE FORA – MG: uma abordagem a partir das  
Zonas Climáticas Locais**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geografia.

**Área de concentração:** Análise Ambiental

**Orientador:** Prof. Dr. Wellington Lopes Assis

Belo Horizonte  
2025

P644c  
2025

Pimentel, Franciele de Oliveira.

O clima urbano em Juiz de Fora – MG [manuscrito] : uma abordagem a partir das Zonas Climáticas Locais / Franciele de Oliveira Pimentel. – 2025. 186 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Wellington Lopes Assis.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Bibliografia: f. 175-186.

1. Climatologia urbana – Teses. 2. Zonas climáticas – Teses. 3. Temperatura atmosférica – Teses. 4. Juiz de Fora (MG) – Clima – Teses. I. Assis, Wellington Lopes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 551.58(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

### **FOLHA DE APROVAÇÃO**

O CLIMA URBANO EM JUIZ DE FORA – MG : Uma Abordagem a partir das Zonas Climáticas Locais

**FRANCIELE DE OLIVEIRA PIMENTEL**

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **24 de setembro de 2025**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Núbia Beray Armond**

Indiana University

**Cássia de Castro Martins Ferreira**

UFJF

**Taíza de Pinho Barroso Lucas**

CEFET-MG

**Carlos Henrique Jardim**

IGC/UFMG

**Wellington Lopes Assis - Orientador**

IGC/UFMG

Belo Horizonte, 24 de setembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Henrique Jardim, Professor do Magistério Superior**, em 25/09/2025, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Wellington Lopes Assis, Professor do Magistério Superior**, em 25/09/2025, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Cássia de Castro Martins Ferreira, Usuário Externo**, em 25/09/2025, às 13:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Taiza de Pinho Barroso Lucas, Usuário Externo**, em 25/09/2025, às 14:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Nubia Beray Armond, Usuária Externa**, em 03/11/2025, às 16:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4555774** e o código CRC **C77D1B30**.

---

## AGRADECIMENTOS

Certa vez me deparei com um provérbio africano que dizia “*ser preciso uma aldeia inteira para criar uma criança*”. Ao longo desta jornada, compreendi que, para escrever uma tese de doutorado, também é preciso uma aldeia. Nada disso seria possível sem a contribuição e a ajuda de tantas pessoas que, de diferentes formas, caminharam comigo. Cada um de vocês fizeram a diferença.

Sou grata a Deus pela vida, pela oportunidade de trilhar este caminho, à espiritualidade que me ampara e às respostas silenciosas que se revelaram ao longo desta jornada.

Agradeço profundamente à minha família, ao meu companheiro de vida, Marlon Lucas, e ao meu sobrinho Rafael, pela paciência, amor e apoio incondicional, mesmo nos momentos mais difíceis e de inseguranças, quando o cansaço e os desafios pareciam maiores que eu. Ao Marlon, em especial, minha gratidão por ter estado ao meu lado em todos os momentos de campo, ajudando ativamente na instalação e no recolhimento dos equipamentos, sendo fundamental para que cada etapa deste trabalho fosse concluída com êxito.

Aos meus pais, minha eterna gratidão por nunca medirem esforços para apoiar minha trajetória acadêmica. Agradeço por todo amor, incentivo e, sobretudo, pela compreensão diante das minhas ausências, das longas horas de dedicação e das demandas que os estudos exigiram. Sem a base, os ensinamentos e o apoio de vocês, eu não teria chegado até aqui.

Expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Professor Dr. Wellington Lopes Assis, pela paciência, profissionalismo e generosidade na partilha de conhecimentos ao longo desses quatro anos. Seu comprometimento, as esmeras correções e a presteza nas respostas aos e-mails foram fundamentais para a realização deste doutorado.

Às amigas que a vida e a UFJF me presentearam, Débora, Daiane, Maryá e Mariângela meus mais sinceros agradecimentos pela amizade, pelo companheirismo, pelas palavras de incentivo e, principalmente, pela parceria que foi essencial para enfrentar essa caminhada. Registro também minha gratidão à Débora, pelo suporte e inúmeras ajuda na aplicação do modelo de estimativa de temperatura, que foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos cefetianos e forasteiros de Leopoldina-MG, do “Café de Quarta” — Flávia, Iza, Cadu, João, Bibina e Léo — que acompanharam de perto toda a saga de fazer o doutorado na capital mineira. Sempre disponíveis para um café, uma boa conversa e um desabafo, vocês tornaram esse processo muito mais leve. Minha profunda gratidão!

Ao professor e colega do CEFET, Josué Lima, expresso meu sincero agradecimento pelas aulas e pelas inúmeras contribuições na organização dos bancos de dados e na elaboração das equações no Excel.

À amiga Vanessa Ramos, que mesmo a 1.400 km de distância sempre se fez presente. Com sua escuta atenta, conselhos sábios e incentivos constantes, acompanhou cada etapa deste percurso e me ofereceu um apoio inestimável.

Ao amigo Yan, geógrafo do Laboratório de Climatologia e Análise Ambiental – LabCAA/UFJF, agradeço pela organização e disponibilização de parte dos dados de monitoramento de campo, que foram fundamentais para a realização desta pesquisa, assim como pela colaboração no processo de calibração dos sensores utilizados, e locais para instalação.

Agradeço, de forma muito especial, a todas as pessoas que gentilmente aceitaram receber os sensores em suas residências e locais de trabalho, viabilizando a coleta dos dados necessários para esta pesquisa. À Débora e ao seu pai, Kléber, pela disponibilidade e ajuda na instalação dos equipamentos em uma empresa no Distrito Industrial de Juiz de Fora. Aos meus sogros, pelo apoio e auxílio na instalação do sensor na zona rural.

Ao diretor da Faculdade de Engenharia da UFJF, Henrique Braga, pela permissão e apoio para a instalação do equipamento no Museu de Ciência e Tecnologia, localizado no centro de Juiz de Fora. Ao Professor Tiago Bernardes, pela colaboração na instalação e pelo cuidado com o equipamento instalado no Colégio Apogeu. Aos queridos tio Marcos e tia Simone, e aos amigos Denise, Thiane, Leonardo Biage, Camila, Guilherme, Marli e Márcio, minha sincera gratidão por ajudarem na busca por locais adequados, por acolherem os sensores em seus lares, contribuindo diretamente para a realização desta pesquisa.

À banca examinadora, composta pelo Professor Dr. Carlos Henrique Jardim (UFMG), pela Professora Dra. Cássia de Castro Martins Ferreira (UFJF) pela Professora Dra. Taiza de Pinho Barroso Lucas (CEFET) e pela Professora Dra. Núbia

Beray Armond, minha gratidão pela disponibilidade, pela leitura e pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

À professora Cássia (UFJF), registro minha gratidão por todo o incentivo e orientação ao longo da minha trajetória acadêmica, desde a primeira iniciação científica, passando pelo mestrado e agora no doutorado. Agradeço especialmente por ter me apresentado ao estudo do Clima Urbano de Juiz de Fora, área que despertou em mim o interesse e as inquietações que hoje se concretizam nesta pesquisa.

À minha coorientadora durante o doutorado sanduíche, Professora Dra. Núbia Beray Armond, agradeço por todo o suporte — desde a elaboração da proposta para a candidatura à bolsa até a orientação durante o período na *Indiana University*. Vivenciar essa experiência internacional foi extremamente significativo para minha formação. Sou profundamente grata pelos insights valiosos, pelos comentários atentos nos textos e pelo apoio contínuo na construção desta pesquisa. Agradeço, ainda, pela oportunidade de acompanhar suas aulas, que contribuíram de forma importante para o meu desenvolvimento acadêmico.

Ao CEFET-MG, agradeço pelo suporte institucional, pela concessão da bolsa de capacitação e da licença, que permitiram minha dedicação a esta pesquisa. À CAPES, por meio do Programa de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE), sou grata pela concessão do auxílio que viabilizou minha estadia na Indiana University.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) por todos os ensinamentos, discussões e contribuições que enriqueceram profundamente minha trajetória acadêmica. Viva a universidade pública, gratuita e de qualidade — que ela seja cada vez mais fortalecida em seu papel fundamental na promoção da transformação social.

Por fim, estendo minha gratidão a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um e cada uma, meu sincero muito obrigada!

É preciso não esquecer nada: nem a torneira aberta nem o  
fogo aceso, nem o sorriso para os infelizes nem a oração de  
cada instante.  
É preciso não esquecer de ver a nova borboleta nem o céu de  
sempre.

O que é preciso é esquecer o nosso rosto,  
o nosso nome, o som da nossa voz, o ritmo do nosso pulso.

O que é preciso esquecer é o dia carregado de atos,  
a ideia de recompensa e de glória.

O que é preciso é ser como se já não fôssemos,  
vigiados pelos próprios olhos  
severos conosco, pois o resto não nos pertence.  
(Maireles, 1950)

## RESUMO

A urbanização é uma realidade planetária e constitui uma das principais transformações socioespaciais do século XXI, promovendo a expansão e o adensamento das áreas construídas e alterando profundamente as propriedades físicas da superfície urbana. A modificação do albedo e o aumento da capacidade de armazenamento de calor intensifica a absorção da radiação solar favorecendo o aquecimento da atmosfera próxima à superfície. Como resultado, cada cidade passa a produzir um clima próprio, condicionado não apenas pela forma urbana, mas também pelas características do sítio e pela dinâmica atmosférica: o clima urbano. Nesse contexto, esta tese analisa a produção do clima intraurbano em Juiz de Fora (MG), cidade média inserida em ambiente tropical de altitude e caracterizada por relevo fortemente compartimentado. Em contextos de sítio urbano complexo, os padrões térmicos intraurbanos não podem ser plenamente explicados por abordagens tipológicas isoladas, como a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL/LCZ) proposta por Stewart e Oke (2012). O objetivo é analisar a variabilidade espaço-temporal da temperatura do ar em Juiz de Fora a partir das ZCLs, articulando essa classificação ao papel do sítio urbano, do relevo e hidrografia, e à atuação da dinâmica atmosférica regional e sinótica. Os resultados evidenciaram que os padrões térmicos intraurbanos não respondem de forma homogênea às tipologias das ZCLs, sendo condicionados pela interação entre morfologia urbana. Observa-se uma diferenciação térmica entre áreas densamente urbanizadas e setores associados à maior cobertura vegetal, bem como a ocorrência de inversões térmicas em fundos de vale. Verificou-se que sistemas atmosféricos como frentes frias e o ASAS exercem papel determinante na modulação da estrutura térmica urbana, influenciando a intensidade, a persistência e a organização das ilhas de calor e de frescor. Sendo assim, cidades em ambiente tropical de altitude com relevo complexo, a produção do clima urbano resulta da interação indissociável entre forma urbana, orografia, hidrografia e dinâmica atmosférica. Nesse sentido, os padrões térmicos classicamente associados às Zonas Climáticas Locais são espacialmente reconfigurados, o que evidencia os limites de abordagens tipológicas descontextualizadas do sítio urbano e reforça a necessidade de análises integradas para a compreensão da estrutura térmica intraurbana.

**Palavras-chave:** zonas climáticas locais; clima urbano; Juiz de Fora.

## ABSTRACT

Urbanization is a global reality and constitutes one of the main socio-spatial transformations of the 21st century, promoting the expansion and densification of built-up areas and profoundly altering the physical properties of the urban surface. Changes in albedo and the increased heat storage capacity intensify the absorption of solar radiation, favoring the warming of the near-surface atmosphere. As a result, each city develops its own climate, conditioned not only by urban form but also by site characteristics and atmospheric dynamics: the urban climate. In this context, this thesis analyzes the production of the intra-urban climate in Juiz de Fora (MG), a medium-sized city located in a tropical highland environment and characterized by highly compartmentalized relief. In complex urban site contexts, intra-urban thermal patterns cannot be fully explained by isolated typological approaches, such as the Local Climate Zones (LCZ) classification proposed by Stewart and Oke (2012). The objective is to analyze the spatio-temporal variability of air temperature in Juiz de Fora based on LCZs, articulating this classification with the role of the urban site, relief and hydrography, and the influence of regional and synoptic atmospheric dynamics. The results showed that intra-urban thermal patterns do not respond homogeneously to LCZ typologies, being conditioned by the interaction between urban morphology. A thermal differentiation is observed between densely urbanized areas and sectors associated with greater vegetation cover, as well as the occurrence of thermal inversions in valley bottoms. It was also verified that atmospheric systems such as cold fronts and the South Atlantic Subtropical Anticyclone play a determining role in modulating the urban thermal structure, influencing the intensity, persistence, and spatial organization of urban heat and cool islands. Thus, in cities located in tropical highland environments with complex relief, the production of the urban climate results from the inseparable interaction between urban form, orography, hydrography, and atmospheric dynamics. In this sense, thermal patterns classically associated with Local Climate Zones are spatially reconfigured, highlighting the limitations of typological approaches detached from the urban site and reinforcing the need for integrated analyses to better understand intra-urban thermal structure.

**Keywords:** local climate zones; urban climate; Juiz de Fora.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS – Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

CLP – Camada Limite Planetária

CEPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

DT – Depressão Tropical

ENOS - El Niño–Oscilação Sul

FBDS - Fundação Brasileira Desenvolvimento Sustentável

FE – Frente Estacionária

FF – Frente Fria

FVC – Fator de Visão do Céu

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICU- Ilha de Calor Urbana

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

OMS – Organização Mundial de Saúde

ONI – Oceanic Niño Index

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration* (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica – EUA)

PJF – Prefeitura de Juiz de Fora

SCU – Sistema Clima Urbano

SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission* (Missão de Topografia por Radar de Ônibus Espacial)

UBL – *Urban Boudary Layer* (Camada Limite Urbana)

UCL – *Urban Canopy Layer* (Camada de Cobertura Urbana)

UR – Umidade Relativa

USGS – *United States Geological Survey* (Serviço Geológico dos Estados Unidos)

UTM – *Universal Transverse Mercator* (Sistema de Coordenadas Universais Transversas de Mercator)

LI – Linhas de Instabilidade

TT – Tempestade Tropical

VANT – Veículo Aéreo não Tripulado

WUDAPT – *World Urban Database and Access Portal Tools* (Ferramentas de Portal de Acesso e Banco de Dados Urbano Mundial)

ZCN – Zona Climática Natural

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCLs – Zonas Climáticas Locais

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Critérios do Sistema Clima Urbano.....	26
Figura 2 – Escalas geográficas do clima.....	33
Figura 3 – Escalas do clima e suas subdivisões.....	34
Figura 4 – Subdivisões da atmosfera urbana de Juiz de Fora.....	40
Figura 5 – Divisão das classes para as Zonas Climáticas Locais (ZCL`S).....	42
Figura 6 – Classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL`S).....	43
Figura 7 – Roteiro metodológico.....	47
Figura 8 – Sensores com datalogger.....	53
Figura 9 – Gráfico de correlação entre os dados de temperatura.....	53
Figura 10 – Aferição do termo-higrômetro.....	54
Figura 11 – Gráfico de correlação do termo-higrômetro datalogger.....	55
Figura 12 – Aferição do termo-higrômetro.....	55
Figura 13 – Gráfico de correlação entre os dados de temperatura datalogger.....	56
Figura 14 – Mapa com a localização dos pontos de monitoramento.....	57
Figura 15 – Características dos pontos 1 ao 6.....	58
Figura 16 – Características dos pontos 7 ao 14.....	59
Figura 17 – Organograma do mapeamento das Zonas Climáticas “Naturais”.....	62
Figura 18 – Interpoladores testados para a estimativa de temperatura média do ar nas Zonas Climáticas Naturais em Juiz de Fora -MG.....	65
Figura 19 – Organograma para elaboração das Zonas Climáticas Naturais.....	68
Figura 20 – Gráfico com amostras de treinamentos para geração das ZCLs.....	71
Figura 21 – Organograma do mapeamento das Zonas Climáticas Locais.....	73
Figura 22 – Modelo de Espacialização da Temperatura do Ar .....	79
Figura 23 – Mapa da localização do Município de Juiz de Fora – MG .....	81
Figura 24 – Mapa da Evolução da Mancha Urbana em Juiz de Fora – MG.....	84
Figura 25 – a) Mapa de Altimetria de Juiz de Fora- MG.....	88
Figura 25 – b) Mapa de Morfologia em Juiz de Fora – MG.....	88
Figura 26 - Vista parcial da área urbana central de Juiz de Fora.....	90
Figura 27 – Mapa da Declividade em Juiz de Fora – MG.....	92
Figura 28 – Mapa da Orientação das Vertentes em Juiz de Fora – MG.....	93
Figura 29 – a) Mapa do Uso e Ocupação da Terra em Juiz de Fora – MG.....	96
Figura 29 – b) Mapa da Temperatura de Superfície em Juiz de Fora – MG.....	96

Figura 30 – Climograma das Normais Climatológicas.....	98
Figura 31 – Tendência anual das temperaturas.....	100
Figura 32 – Balanço hídrico mensal de Juiz de Fora.....	102
Figura 33 – Avenida Presidente Getúlio Vargas no início do século XX.....	105
Figura 34 – Zonas Climáticas Naturais em Juiz de Fora (1915- 1920).....	106
Figura 35 – Zonas Climáticas Locais a partir do método “WUDAPT”.....	109
Figura 36 – Gráfico de distribuição das acurácias para cada ZCL.....	110
Figura 37 – Zonas Climáticas Locais Método Sobreposição e Vetorização.....	114
Figura 38 – Mapa de temperatura de superfície.....	117
Figura 39 – Sistemas atmosféricos atuantes durante o primeiro campo.....	118
Figura 40 – Análise Rítmica entre 13/07/2023 e 16/09/2023.....	120
Figura 41 – Esquema ilustrativo do sombreamento no Ponto 2 (ZCL 2) às 15 horas para o mês de julho.....	124
Figura 42 – Representação da inversão térmica em Juiz de Fora – MG.....	126
Figura 43 – Temperatura das 9, 15, 21 e 3h, entre 13/07/2023 e 15/09/2023.....	127
Figura 44 – Ocorrências de Inversão Térmica por Sistema Atmosférico, entre 00 e 6 horas da manhã nas ZCL 2, ZCL10 e ZCL D.....	128
Figura 45 – Número de ocorrências de inversão térmica por horário.....	129
Figura 46 – Fotografias da Estação Climatológica da UFJF ( ZCL D).....	131
Figura 47 – Sistemas atmosféricos atuantes durante o segundo campo.....	132
Figura 48– Análise Rítmica entre 01/10/2023 e 13/11/2023.....	134
Figura 49 – Temperatura das 9, 15 e 21h, entre 01/10/2023 e 12/11/2023.....	141
Figura 50 - Sistemas atmosféricos atuantes entre os dias 01/02/2024 e 29/02/2024 em Juiz de Fora- MG.....	142
Figura 51 – Análise Rítmica entre 01/02/2024 e 29/02/2024.....	145
Figura 52 – Temperatura das 9, 15 e 21h, entre 01/02/2024 e 29/02/2024.....	150
Figura 53 – Gráficos de dispersão da temperatura média nas Zonas Climáticas Locais, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos entre outubro e novembro de 2023.....	152
Figura 54 - Gráficos de dispersão da temperatura média nas Zonas Climáticas Locais, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos em fevereiro de 2024.....	155

Figura 55 – Gráficos de dispersão das Zonas Climáticas Locais às 21 horas, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos em outubro e novembro de 2023.....	156
Figura 56 – Gráficos de dispersão das Zonas Climáticas Locais às 21 horas, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos para o mês de fevereiro de 2024.....	159
Figura 57 - Distribuição da Temperatura Média do Ar em Juiz de Fora (01/10 a 13/11/2023).....	164
Figura 58 – Distribuição da Temperatura Média do Ar em Juiz de Fora sob Diferentes Sistemas Atmosféricos.....	167
Figura 59 – Distribuição da Temperatura do Ar às 21 horas, em Juiz de Fora sob Diferentes Sistemas Atmosféricos.....	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de temperatura do ar em relação à altitude.....	63
Tabela 2 - Fatores de arrefecimento nas proximidades de corpos hídricos.....	69
Tabela 3 – Distribuição das formas de Relevo de Juiz de Fora – MG.....	90
Tabela 4 – Distribuição da Orientação das Vertentes de Juiz de Fora - MG.....	94
Tabela 5 – Distribuição do Uso e Cobertura das Terras em Juiz de Fora - MG.....	97
Tabela 6 – Temperaturas extremas registradas entre 1974-2021.....	101
Tabela 7 - Balanço Hídrico de Juiz de Fora - MG entre 1991-2020.....	102
Tabela 8 – Distribuição das Zonas Climáticas em Juiz de Fora - MG.....	112
Tabela 9 – Valores médios dos sensores instalados nas Zonas Climáticas Locais (ZCL) entre 13/07/2023 e 16/09/2023.....	121
Tabela 10 – Valores médios dos sensores instalados nas Zonas Climáticas Locais (ZCL) entre 01/10/2023 e 13/11/2023.....	136
Tabela 11 – Valores médios dos sensores instalados nas Zonas Climáticas Locais (ZCL) entre 01/02/2024 e 29/02/2024.....	146

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Articulação dos sistemas segundo os canais de percepção.....	28
Quadro 2 – Categorias Taxonômicas da Organização Geográfica do Clima e suas Articulações com o Clima Urbano.....	37
Quadro 3 – Zonas Climáticas Naturais (ZCN) de Juiz de Fora- MG (1915-1920).....	105

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES CONCEITUAIS</b>	<b>24</b>
2.1 Da Climatologia Geográfica ao Sistema Clima Urbano	24
2.2 O Clima Urbano e seus Subsistemas em Juiz de Fora	30
2.3 As Escalas e a Abordagem Geográfica do Clima	32
2.4 Circulação na Camada Limite Planetária	38
2.5 Zonas Climáticas Locais (ZCLs)	41
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>47</b>
3.1 Revisão Teórica e Bases Conceituais	48
3.2 Base de Dados Cartográficos	48
3.2.1 Mapa de Altimetria, Declividade, Orientação das Vertentes e Classificação das Formas do Relevo	48
3.2.2 Mapeamento da Temperatura de Superfície	49
3.3 Experimentos de Campo e Equipamentos	51
3.3.1 Pontos de Monitoramento	56
3.4 Organização e Tratamento Estatístico dos Dados	60
3.4.1 Análise dos Dados Coletados em Campo	60
3.4.2 Análise Rítmica e Sinótica	60
3.4.3 Agrupamento de Dados Térmicos com Algoritmo K-Means	60
3.4.4 Elaboração das Zonas Climáticas “Naturais” de Juiz de Fora	61
3.5 Elaboração das Zonas Climáticas Locais de Juiz de Fora	70
3.5.1 ZCLs a partir do Método “World Urban Database” (WUDAPT)	70
3.5.2 ZCLs a partir do Método de Sobreposição e Vetorização	72
3.6 Mapeamento e Modelagem da Temperatura por Tipos de Tempos	76
<b>4 A GEOGRAFIA DE JUIZ DE FORA</b>	<b>80</b>
4.1 Breve Histórico de Ocupação	81
4.1.1 A Evolução da Mancha Urbana de Juiz de Fora	84
4.2 Os Fatores Estáticos em Juiz de Fora	86
4.3 Os Fatores Dinâmicos e o Clima em Juiz de Fora	97
4.3.1 Classificação Climática para Juiz de Fora	101
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>103</b>
5.1 Zonas Climáticas “Naturais” em Juiz de Fora entre 1915 e 1920	103
5.2 Zonas Climáticas Locais para Juiz de Fora (MG)	107
5.2.1 ZCLs a partir do Método “World Urban Database” (WUDAPT)	107
5.2.2 Método de Sobreposição de Camadas e Vetorização	112
5.3 Temperatura de Superfície nas ZCLs de Juiz de Fora	115
5.4 Resultados do Primeiro Trabalho de Campo	118
5.4.1 Episódios de Inversão Térmica	128
5.5 Resultados do Segundo Trabalho de Campo	131
5.6 Resultados do Terceiro Trabalho de Campo	142
5.7 Comportamento Térmico das ZCLs nos Tipos de Tempos	151
5.8 Modelagem e Espacialização da Temperatura do Ar	164
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>171</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>175</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre os impactos das ações humanas no clima não é recente. Ainda no início do século XIX, Alexander Von Humboldt já identificava, em escala local, a influência das mudanças no uso e na ocupação da terra sobre as condições climáticas. Durante sua expedição pela América do Sul, ao observar extensas áreas de monocultura na Venezuela, o naturalista relacionou o desmatamento à aridez do solo e à redução do nível das águas do Lago de Valência (WULF, 2016). Mais de dois séculos depois, essa relação entre sociedade e clima permanece no centro das investigações geográficas, especialmente no contexto urbano, onde as transformações antrópicas sobre a superfície terrestre se intensificam.

Em áreas urbanas, a substituição de superfícies naturais por materiais artificiais, a modificação da morfologia do terreno e a reorganização dos fluxos de energia e matéria produzem padrões climáticos próprios, distintos daqueles observados em áreas não urbanizadas. Essa problemática adquire ainda maior relevância no contexto contemporâneo, em que mais da metade da população mundial reside em cidades, com estimativas indicando que cerca de 58% da humanidade vive em áreas urbanas (ONU, 2025), tornando o clima urbano um tema central para a compreensão das dinâmicas socioambientais.

Historicamente, os primeiros estudos sistemáticos sobre o clima urbano foram desenvolvidos em países centrais, em função do processo precoce de industrialização e urbanização. Ao longo do século XX, pesquisas pioneiras evidenciaram a tendência ao aumento da temperatura do ar nas cidades em relação às áreas rurais, fenômeno posteriormente denominado ilha de calor urbana. As contribuições de autores como Howard (1818), Landsberg (1956), Chandler (1965) e Oke foram fundamentais para a consolidação teórica e metodológica da Climatologia Urbana, sobretudo no que se refere à compreensão do balanço de energia, das camadas limites urbanas e da estrutura térmica intraurbana.

No Brasil, os estudos sobre clima urbano ganharam consistência a partir da formulação da teoria do Sistema Clima Urbano (SCU), proposta por Carlos Augusto Figueiredo Monteiro. Ao conceber o clima urbano como um sistema aberto, resultante da interação entre fatores naturais e sociais (Monteiro, 1976), consolidou um

referencial teórico que orientou grande parte da produção científica nacional, integrando os processos atmosféricos às dinâmicas de produção do espaço urbano.

Nas últimas décadas, o sistema de classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCL) – Local Climate Zone (LCZ), proposto por Stewart e Oke (2012), consolidou-se como uma abordagem de referência para a análise das dinâmicas térmicas em áreas urbanizadas. Fundamentado na categorização de zonas urbanas e naturais a partir de atributos físicos e morfológicos da superfície, o sistema de classificação das ZCLs parte do pressuposto de que essas características exercem influência direta sobre o balanço de energia na Camada de Cobertura Urbana. Sua ampla aceitação decorre da possibilidade de padronização e comparação entre diferentes contextos urbanos, sendo amplamente aplicado em estudos que utilizam dados de estações meteorológicas, transectos móveis e sensoriamento remoto. (Alexander & Mills, 2014; Wang et al., 2024)

Recentemente, observa-se um crescimento expressivo de estudos que associam a classificação das ZCLs a técnicas avançadas de modelagem da temperatura de superfície, com o uso de aprendizado de máquina, deep learning e plataformas de processamento em nuvem. (Fan et al., 2023; Fernandes et al., 2023, Wang et al., 2024).

Apesar desses avanços, a literatura recente evidencia uma predominância de classificações automáticas fortemente orientadas por critérios morfológicos, frequentemente desvinculadas de variáveis físicas fundamentais, como a elevação do terreno e a proximidade de corpos d'água.

Revisões sistemáticas indicam que, embora reconhecida, a influência do relevo e da hidrografia sobre a estrutura térmica intraurbana ainda é pouco incorporada às análises das ZCLs.

A topografia pode exercer papel determinante na configuração térmica das ZCLs, sobretudo em cidades caracterizadas por grande variabilidade altimétrica. Em contextos urbanos com relevo acentuado, processos como ventos anabáticos e catabáticos, escoamento de ar frio e inversões térmicas em fundos de vale produzem contrastes térmicos significativos, mesmo em escalas espaciais reduzidas. Em cidades brasileiras inseridas no domínio dos mares de morros, a altitude atua como

fator estruturante do clima urbano, promovendo diferenças térmicas relevantes entre áreas adjacentes.

Além das características morfológicas e topográficas, a estrutura térmica urbana é fortemente modulada pelas condições atmosféricas de grande escala. Situações sinóticas anticiclônicas, associadas à subsidência e à fraca ventilação, favorecem o acúmulo de calor nas áreas urbanas, enquanto episódios de instabilidade atmosférica contribuem para a dissipação do calor armazenado, reduzindo a intensidade das ilhas de calor, especialmente no período noturno. Apesar de bem documentados em regiões temperadas, esses efeitos ainda são pouco investigados de forma integrada em cidades tropicais com relevo complexo.

É nesse contexto que se insere a presente tese, que investiga a estrutura térmica intraurbana de Juiz de Fora, cidade média localizada na Zona da Mata Mineira, caracterizada por relevo fortemente compartimentado e pela presença de vales encaixados associados à rede hidrográfica.

Parte-se da tese de que, em um ambiente tropical de altitude, a estrutura térmica intraurbana resulta da interação entre forma urbana, orografia e hidrografia, de modo que os padrões térmicos associados às Zonas Climáticas Locais são espacialmente reconfigurados e temporalmente modulados pela atuação dos sistemas atmosféricos.

Diante do exposto, formulam-se algumas hipóteses orientadoras da pesquisa. Parte-se do pressuposto de que as ZCLs não apresentam comportamento térmico homogêneo em cidades marcadas por relevo complexo, sendo suas respostas térmicas condicionadas, sobretudo, pelas variações altimétricas e pela organização da rede hidrográfica.

Além disso, supõe-se que a atuação dos sistemas atmosféricos regionais e sinóticos modula a intensidade, a distribuição espacial e a persistência das ilhas de calor e de frescor intraurbanas, promovendo uma reconfiguração temporal do comportamento térmico das ZCLs. Por fim, considera-se que, em situações atmosféricas mais estáveis, os contrastes térmicos intraurbanos tendem a se intensificar, enquanto em situações instáveis esses contrastes tendem a ser atenuados.

Reconhece-se, ainda, que as ZCLs constituem um instrumento analítico relevante para a compreensão do clima urbano, porém não suficiente quando aplicadas de forma estática e isolada em contextos urbanos de relevo complexo.

Diante dessas lacunas, o objetivo geral desta pesquisa é analisar a estrutura térmica da cidade de Juiz de Fora a partir de sua variabilidade espaço-temporal, considerando a ocorrência de ilhas de calor e de frescor e de núcleos de aquecimento, tendo como referência a classificação das Zonas Climáticas Locais (Local Climate Zones – LCZ) proposta por Stewart e Oke (2012), em diálogo crítico com o papel do sítio urbano e da dinâmica atmosférica.

### **Objetivos Específicos**

a) Analisar, em termos espaço-temporais, as ilhas de calor atmosférica e de superfície no espaço urbano de Juiz de Fora.

b) Identificar de que maneira componentes climáticos estáticos (relevo, cobertura do solo) e dinâmicos (circulação atmosférica, uso do solo) modulam a variabilidade térmica intraurbana.

c) Compreender em que medida as ZCNs (Zonas Climáticas Naturais) e ZCLs (Zonas Climáticas Locais) contribuem para explicar a heterogeneidade térmica de Juiz de Fora

d) Analisar como os sistemas atmosféricos regionais e sinóticos modulam a distribuição espacial e temporal das temperaturas intra-urbanas de acordo com as Zonas Climáticas Locais (ZCLs).

e) Identificar os padrões recorrentes, as situações excepcionais e a ocorrência de fenômenos específicos, como inversões térmicas em fundos de vale.

O presente trabalho estará organizado em cinco partes, além da introdução e considerações finais.

O Capítulo 1 apresenta os aspectos gerais e as bases conceituais que fundamentam o Sistema Clima Urbano (SCU), abordando suas escalas, hierarquias e os principais processos de circulação atmosférica na camada limite planetária. Também são discutidos estudos de caso que contribuem para o entendimento do clima urbano em diferentes contextos.

O Capítulo 2 descreve os materiais e procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, incluindo a organização da base cartográfica, os experimentos e equipamentos utilizados nas coletas de campo, além dos métodos de organização e tratamento estatístico dos dados. Este capítulo também contempla a metodologia empregada para a definição das unidades climáticas locais.

O Capítulo 3 é dedicado à caracterização do município de Juiz de Fora, com ênfase nos fatores físicos, tanto estáticos quanto dinâmicos, que influenciam o clima da região. Além disso, traça-se um panorama histórico da ocupação territorial da cidade, elemento fundamental para compreender suas transformações ambientais e climáticas.

O Capítulo 4 reúne os resultados e as discussões referentes ao clima urbano de Juiz de Fora. São apresentados os produtos cartográficos do mapeamento das Zonas Climáticas Naturais (ZCN) e das Zonas Climáticas Locais (ZCL), bem como os resultados das campanhas de campo. O capítulo contempla também a análise da distribuição espacial da temperatura do ar, com destaque para a identificação das ilhas de calor e de frescor urbanas. As discussões são fundamentadas na articulação entre os dados empíricos e os referenciais teóricos do Sistema Clima Urbano, permitindo uma interpretação integrada da dinâmica térmica da cidade.

Por fim, nas Considerações Finais, retomam-se as principais conclusões à luz das premissas e hipóteses formuladas, ressaltando os avanços alcançados e as limitações do estudo, além da contribuição da pesquisa para a compreensão do clima urbano e para o planejamento climático de cidades médias brasileiras.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E BASES CONCEITUAIS

### 2.1 Da Climatologia Geográfica ao Sistema Clima Urbano

É de amplo conhecimento que a relação entre a Geografia e a Climatologia é demasiada antiga. Contudo, a Climatologia enquanto ciência possui corpo teórico e metodológico próprio, não pertencendo somente à Geografia, mas sendo contemplada por várias áreas do conhecimento, com suas diferentes formas de análise e tratamento de dados, como a Arquitetura, a Agronomia, a Engenharia Sanitária e Ambiental.

Vale destacar que é na Meteorologia que a Climatologia permaneceu por um longo tempo, como parte de um só ramo do conhecimento, no estudo da atmosfera terrestre (MENDONÇA E DANNI-OLIVEIRA, 2007).

E inserida na Geografia que a Climatologia vai sendo ressignificada em diferentes momentos históricos. Desde a superação da fase tradicional, influenciada pelo caráter meteorológico e sob domínio das médias e da atmosfera estática, até a incorporação de aspectos da distribuição espacial e a busca por padrões, comprometida com os objetivos da ciência geográfica.

Conforme é explicado por Sant'anna Neto (2015, p.33) o clima abordado enquanto fenômeno geográfico vai aparecer pela primeira vez em 1909, no clássico Tratado de Geografia Física de Emmanuel De Martone:

Na obra, o grande geógrafo francês, ao tratar o papel do clima como fenômeno geográfico, considerava a zona de contato entre a atmosfera e o globo sólido e líquido como universo de análise.

No entanto, a noção de Climatologia Geográfica a qual conhecemos hoje, que superou as análises fragmentadas dos elementos climáticos, as noções de valores estáticos e médias da atmosfera, e passou a incorporar as sucessões de tipos de tempo, foi preconizada por Maximiliano Sorre. O clima na concepção de Sorre (1951, p.90) é definido a partir “da série de estados atmosféricos sobre determinado lugar em sua sucessão habitual”.

Sant'anna Neto (2015) explica que Sorre é considerado o mentor da Climatologia eminentemente geográfica. Motivado pelas discussões teóricas, trouxe

luz ao caráter dinâmico e genético do clima. Apesar de não colocar em prática a pesquisa climatológica, as contribuições de Sorre foram fundamentais para que o professor Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro introduzisse um novo método, denominado análise rítmica.

Dessa forma, Monteiro será responsável por uma nova forma de se estudar o clima dentro da Geografia, pautada no ritmo e na sucessão habitual dos tipos de tempos. Conforme afirma Zavattini e Boin (2013) quando se fala da Escola Brasileira de Climatologia Geográfica, por essência, está se falando do legado de Monteiro.

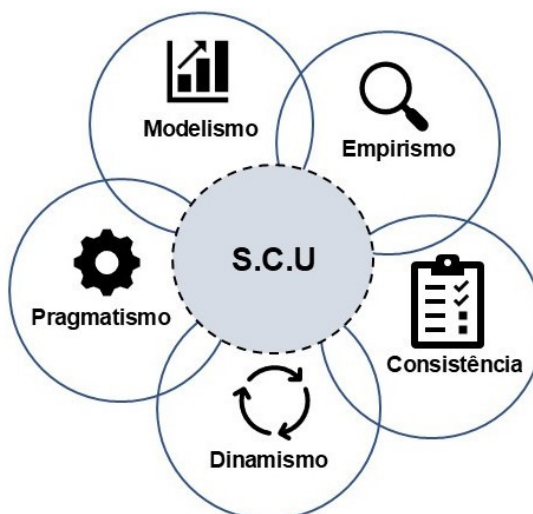
A partir da década de 70, precisamente após a publicação de sua tese de livre docência em 1976, Monteiro passa a dedicar seus estudos ao clima das cidades, sob um contexto histórico e geográfico conduzido pelo intenso processo de urbanização, em que “a cidade se tornava cada vez mais a morada do homem” (MONTEIRO, 2013, p.10)

Nesse raciocínio, Mendonça (2015, p.155) explica a intensificação nas últimas décadas dos estudos dedicados ao meio ambiente urbano:

Um dos motivos da especial atenção destinada pela ciência às cidades decorre do fato de que, na atualidade, mais de 50% da população humana vive em áreas urbanas. Entrementes, não é a condição demográfica em si que coloca a importância do estudo da cidade em relevo, mas, sim a complexidade da vida que nelas se manifestam para a maioria dos homens.

Monteiro (1976) instigado pela Teoria Geral dos Sistemas de Ludwig Von Bertalanffy, propõe uma inovadora abordagem teórica e metodológica. Dessa forma, lança mão de cinco critérios norteadores, com o objetivo de sistematizar o desenvolvimento do que ele denominou de Sistema Clima Urbano (S.C.U) (FIG.1). O S.C.U é apresentado como um sistema multicritério que integra natureza (clima) e sociedade (urbanização). Os cinco critérios não são isolados, mas interdependentes, funcionando como pilares para uma abordagem sistêmica e aplicada à climatologia urbana. Essa estrutura busca fornecer um referencial teórico-prático para análise, diagnóstico e intervenção em cidades, considerando os impactos climáticos das transformações urbanas.

Figura 1 – Critérios do Sistema Clima Urbano.



Fonte: Adaptado de Monteiro e Mendonça (2013).

- *Dinamismo* – O Clima para Monteiro (1976) enquanto uma “sucessão de tempos” se apoia na perspectiva do dinamismo e no ritmo climático sorreano.
- *Consistência* - dotado de uma estrutura e funcionalidade, remetendo à capacidade que a metodologia deve possuir ao ser replicada em diferentes realidades e complexidades climáticas, levando-se em consideração as especificidades locais.
- *Empirismo* - de acordo com esse critério, o aparato teórico deve ser passível de observação empírica, bem como ser dotado de capacidade de verificação ou refutação.
- *Modelismo* - deve ser levada em consideração a relevância dos mapeamentos, tabulações, modelagens que podem ser auxiliados com a precisão dos Sistemas de Informações Geográficas.
- *Pragmatismo* - baseando-se na lógica formal da Teoria Geral dos Sistemas (TGS), os objetivos da proposta teórica devem ser definidos, sendo capazes de fazer perguntas e emitir respostas e se prestar a capacidade de resolver problemas.

A partir dos critérios norteadores, Monteiro apresenta enunciados básicos com o intuito de se tornarem um referencial informativo, trazendo, assim a definição elementar para a abrangência de um clima local e a cidade: “o clima urbano, sendo é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre (fenômeno natural) e a sua urbanização (fenômeno social)” (Monteiro, 2013, p.21).

Ou seja, sua visão partia do pressuposto de que o clima urbano deve ser pensado como um produto de uma relação dialética complexa e sistêmica entre fatores naturais e produzidos, a partir de intensa circulação e trocas de matéria e de energia.

Na perspectiva de uma visão interativa relacionando os processos e respostas, Monteiro (1976), a partir do S.C.U, propôs três campos de abordagens (Quadro 1).

Quadro 1: Articulação dos sistemas segundo os canais de percepção.

<b>Subsistemas</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
<b>Canais</b>	<b>Termodinâmico</b>	<b>Físico-Químico</b>	<b>Hidrometeorológico</b>
<b>Caracterização</b>	Conforto Térmico	Qualidade do Ar	Impacto Meteorológico
Fonte	Atmosfera; radiação; circulação horizontal	Atividade urbana; veículos automotores, indústrias obras limpas.	Atmosfera, estados especiais (desvios de ritmo).
Trânsito no Sistema	Intercâmbio de operador e operando	De operando ao operador	De operador ao operando
Mecanismo de Ação	Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação; núcleo e ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódio (eventual)
Observação	Meteorológica especial. Trabalho de campo	Sanitária e meteorológica especial	Meteorológica hidrológica (Trabalho de Campo)
Correlações disciplinares tecnológicas	Bioclimatologia, Arquitetura e Urbanismo	Engenharia sanitária	Engenharia sanitária e infraestrutura urbana
Produtos	Ilhas de calor; Ventilação Aumento de precipitação	Poluição do ar	Ataque á integridade urbana
Efeitos diretos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários, doenças respiratórias, oftalmológicas etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	Controle do uso da terra; tecnologia de conforto habitacional.	Monitoramento e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infraestrutura urbana, compreensão da dinâmica fluvial, uso da terra.
Responsabilidade	Natureza e Homem	Homem	Natureza

Fonte: Adaptado de Monteiro (2015, p.126).

1) *Subsistema Termodinâmico* – sendo o canal de percepção o conforto térmico, engloba as componentes termodinâmicas em interação direta entre a atmosfera e a superfície da cidade. O resultado dessa troca dinâmica pode condicionar a existência de ilhas de calor/ilhas de frescor, inversões térmicas, aumento da precipitação, desencadeando efeitos diretos, como o desconforto e a redução do desempenho humano. Esse campo de abordagem enfatiza a importância da existência de áreas verdes urbanas, como elemento de intervenção para autorregulação.

2) *Subsistema Físico-Químico* – seu canal de percepção é a qualidade ambiental do ar, com o objetivo de analisar a dinâmica da poluição atmosférica associada a outras formas de poluição como as águas e os solos, destacando a ocorrência das chuvas-ácidas. Apesar da enorme importância de estudos que se dediquem a pesquisar o subsistema físico-químico, uma vez que a consequência da qualidade do ar impacta diretamente na saúde dos cidadãos, esse subsistema é o menos abordado nos estudos brasileiros. Os motivos são principalmente os de ordem financeira, pelo do elevado custo dos equipamentos de aferição, e pela dificuldade de aquisição e de manutenção deles. (MENDONÇA, 2015; SILVA, 2016).

3) *Subsistema Hidrodinâmico* - seu canal de percepção são os meteoros de impactos, focado em análises pluviométricas relacionadas à impermeabilização dos solos, destacando as ocorrências de enchentes nas cidades. Mendonça (2015) explica que os estudos dedicados ao subsistema hidrodinâmico vêm evidenciando as incompatibilidades entre as estratégias de planejamento urbano, ou da falta dele, com a dinâmica climática tropical. A comprovação desse descompasso são justamente os números crescentes de vitimizados das inundações urbanas brasileiras.

## 2.2 O Clima Urbano e seus Subsistemas em Juiz de Fora

Em Juiz de Fora, as pesquisas direcionadas ao Clima Urbano concentram-se principalmente nos Subsistemas Termodinâmicos e Hidrometeorológicos, seguindo a tendência predominante dos estudos brasileiros nessa área.

Martins (1996), em um dos primeiros estudos realizado na cidade, sobre a temperatura do ar, identificou ilhas de calor de forte intensidade, chegando a 12,8 °C no inverno, principalmente sob a atuação do sistema Tropical Atlântico, e de menor intensidade durante a influência de frentes polares. O autor atribuiu essas diferenças

térmicas à influência do sítio urbano, marcado pelo vale onde a cidade se encontra, e ao adensamento urbano, que juntos favorecem a retenção e o acúmulo de calor.

Ferreira *et al.* (2015) analisaram a série histórica de temperatura do ar (1972–2014) por meio de regressão linear simples e do teste de Mann-Kendall. Detectaram tendência de aumento na temperatura média máxima nos meses de abril, setembro e dezembro, enquanto a temperatura mínima não apresentou tendência de crescimento. A variabilidade observada nas mínimas foi relacionada à frequência de frentes frias. Os autores sugerem que a transferência da estação climatológica do centro da cidade para o campus da UFJF, em área mais elevada e afastada do intenso processo de urbanização, pode ter influenciado a ausência de tendência nas mínimas.

Assis (2016) realizou um estudo na área central de Juiz de Fora, englobando 12 regiões urbanas, com o intuito de investigar como os padrões de uso e ocupação da terra influenciavam nos índices de conforto térmico. Após as aferições de temperatura, umidade e velocidade do vento em pontos pré-estabelecidos, observou diversas presenças de “canyons urbanos” formando corredores de vento. O sombreamento causado pela verticalização foi um dos principais responsáveis pelos índices de desconforto térmico. Além disso, durante o mês de agosto, foi constatado que as zonas de conforto/desconforto sofriam variação espacial ao longo do dia em função das variáveis climáticas.

Pimentel e Ferreira (2019) aplicaram a metodologia de análise de Potencial Térmico em 35 regiões urbanas de Juiz de Fora e constataram que áreas densamente ocupadas, com intenso fluxo de veículos e baixa cobertura vegetal apresentam menor capacidade de resfriamento noturno, favorecendo a formação de ilhas de calor. O estudo destacou um eixo crítico ao longo da Avenida Juscelino Kubitschek, principal ligação entre a Região Urbana Central e o Distrito Industrial, onde a elevada circulação de veículos leves e pesados, aliada ao uso extensivo de coberturas metálicas em grandes galpões, potencializa o aquecimento e contribui para a intensificação das condições de calor urbano.

Ribeiro *et al.* (2018), por meio de transectos móveis noturnos realizados em cinco dias não consecutivos durante o verão de 2014, identificaram ilhas de calor urbanas com intensidade de até 7,6 °C, concentradas principalmente na área central

de Juiz de Fora. Os autores atribuíram esse aquecimento acentuado à baixa cobertura vegetal arbórea, à elevada densidade populacional e habitacional, além do intenso fluxo diário de veículos, fatores que, em conjunto, potencializam a retenção e a emissão de calor no ambiente urbano.

Carvalho *et al* (2022) comparou as condições térmicas noturnas entre a área central e a periferia de Juiz de Fora entre dezembro de 2018 e novembro de 2019, utilizando termômetros automáticos e o Modelo de Potencial Térmico. Os resultados mostraram que, em todos os meses analisados, as temperaturas na área central foram significativamente mais altas que na periferia, com um potencial de aquecimento 64% superior. Esses achados confirmam a presença e intensidade da ilha de calor urbana, associando-a à maior concentração de edificações, vias asfaltadas e menor cobertura vegetal na região central, em contraste com áreas periféricas mais arborizadas.

No subsistema hidrometeorológico Oliveira (2021) analisou a precipitação e seus impactos na área urbana de Juiz de Fora entre 1980 e 2018, desenvolvendo um levantamento sobre os eventos considerados extremos na série analisada. Ao final da pesquisa Oliveira (2021) identificou que eventos extremos de precipitação vêm apresentando uma tendência crescente, em função da intensificação da impermeabilização dos solos, sobretudo nas regiões de maior crescimento populacional. Além disso, os eventos de meteoros de impactos possuem um recorte sazonal, pois sua concentração se dá ao longo da estação chuvosa (outubro a março). Associado a sistemas frontais e à Zona de Convergência do Atlântico Sul, o mês de janeiro foi responsável pela maioria dos impactos na cidade, inclusive, janeiro do ano de 1985, sendo caracterizado pelo maior número de eventos e episódios extremos.

As pesquisas realizadas sobre o Clima Urbano de Juiz de Fora revelam os padrões e particularidades que caracterizam a cidade. Os estudos apontam para a presença recorrente de ilhas de calor, fortemente influenciada pelo adensamento construtivo, pela baixa cobertura vegetal e pela dinâmica de circulação veicular, além de demonstrarem que as alterações no uso e cobertura da terra impactam diretamente a variabilidade e o conforto térmico.

### 2.3 As Escalas e a Abordagem Geográfica do Clima

Quando enunciamos que o clima de um lugar (espaço) é a resultante do comportamento dinâmico mais habitual ou recorrente da atmosfera, cronologicamente desenvolvido (tempo) sobre aquele dado lugar, teremos o problema de definir que lugar é este. Ele pode variar desde o globo terrestre, passando pelos continentes, regiões, países, até atingir um dado lugar (ponto) que pode ser uma pequena ilha, uma grande, média ou pequena cidade que, por sua vez, poderá ser subdividida em bairros, setores, ruas etc. Creio que ao apontar o caráter específico de cada caso, poderemos extrair vários pontos de relevância na abordagem geográfica do clima. Monteiro (1999, p.10)

A análise geográfica do clima em algum momento se dedica à espacialização dos fenômenos no tempo e no espaço, e isso se dá através das escalas em que são percebidas. Dessa forma uma das preocupações que o pesquisador deve ter durante as pesquisas em climatologia é a adequação à escala de análise a qual seu estudo pretende investigar. Tal premissa é significativa para que os métodos e técnicas de mensuração e representação sejam coerentes, uma vez que, as escalas podem se sobrepor, pois a atmosfera é um imenso fluido, sem um limite físico explícito de transição, dotada de interações.

No que diz respeito às definições e organizações de escala do clima, ao menos três autores da Climatologia Geográfica trouxeram importantes contribuições: Monteiro (1976), Ribeiro (1993) e Sant'Anna Neto (2013).

Ribeiro (1993, p. 288) define escala como “uma referência de valor arbitrada segundo critérios que interessam à compreensão de um fenômeno”. O pesquisador tem como ponto de partida para a análise dos fenômenos da atmosfera a compreensão da extensão (o espaço) e a duração desses fenômenos (o tempo).

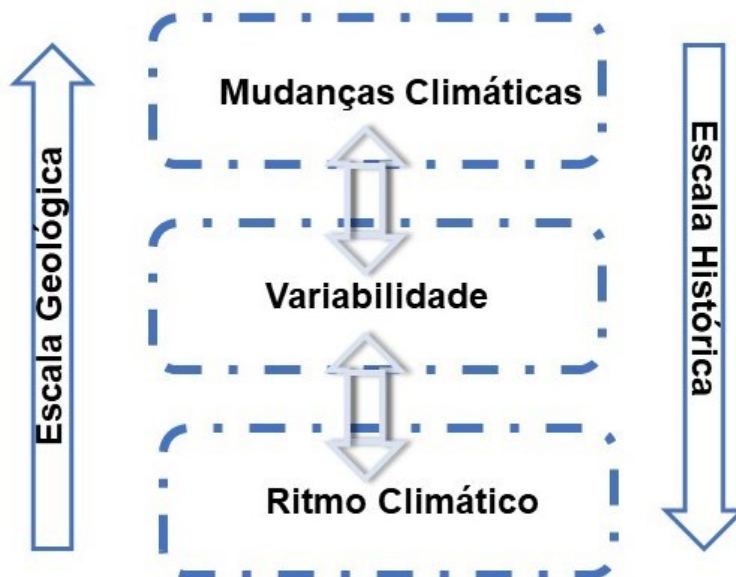
Ribeiro (1993, p.288-289) vai apresentar seis critérios orientadores para propor um sistema de taxonomia para o fenômeno climático a partir das três grandezas Micro, Meso e Macroclimáticas:

- 1) São consideradas **escalas superiores** aquelas mais próximas do nível planetário e **escalas inferiores** àquelas mais próximas dos indivíduos habitantes da superfície terrestre;
- 2) As combinações de processos físicos interativos numa escala superior resultam em modificações sucessivas no comportamento da atmosfera nas escalas inferiores;

- 3) As combinações particulares de processos físicos nas escalas inferiores possuem limitada repercussão nas escalas superiores;
- 4) O grau de dependência da radiação extraterrestre na definição climática é maior nas escalas superiores, enquanto a influência dos elementos da superfície, inclusive a ação antrópica, vai-se tornando mais pronunciada na medida em que se atingem as escalas inferiores;
- 5) Quanto mais extenso o resultado de determinada combinação, maior será o tempo de sua permanência, sendo o inverso igualmente verdadeiro;
- 6) A extensão de uma determinada combinação na atmosfera resulta num atributo tridimensional, sendo, portanto, volumétrica a noção de extensão, em Climatologia, e tendo como limite superior o próprio limite da atmosfera terrestre.

Contudo, Sant'Anna Neto (2013) trazendo a discussão da escala para a Geografia do Clima ressalta que as escalas climáticas não devem ser entendidas somente nas dimensões espaciais ou temporais, mas, como processos dinâmicos altamente sensíveis a três conceitos chaves: o ritmo, a variabilidade e a mudança. Estas escalas de processos referem-se à velocidade, duração e intensidade dos mecanismos que compõe o tempo e o clima. Figura 2.

Figura 2 - Escalas geográficas do clima.



Fonte: Adaptado de Sant'anna Neto (2013)

Na perspectiva da dimensão temporal, Sant'anna Neto (2013) afirma que existem duas maneiras de abordagem: a paleoclimática (tempo geológico) e a da variabilidade climática, a partir de ciclos que podem se repetir de forma periódica (tempo histórico).

Do ponto de vista paleoclimático o pesquisador se refere ao ciclo de Milankovitch, e suas variações na órbita da Terra em torno do Sol e na inclinação do eixo de rotação da Terra. Essas variações seriam responsáveis pela quantidade e a distribuição de radiação solar que atinge a superfície da Terra, levando aos períodos de glaciação/deglaciação.

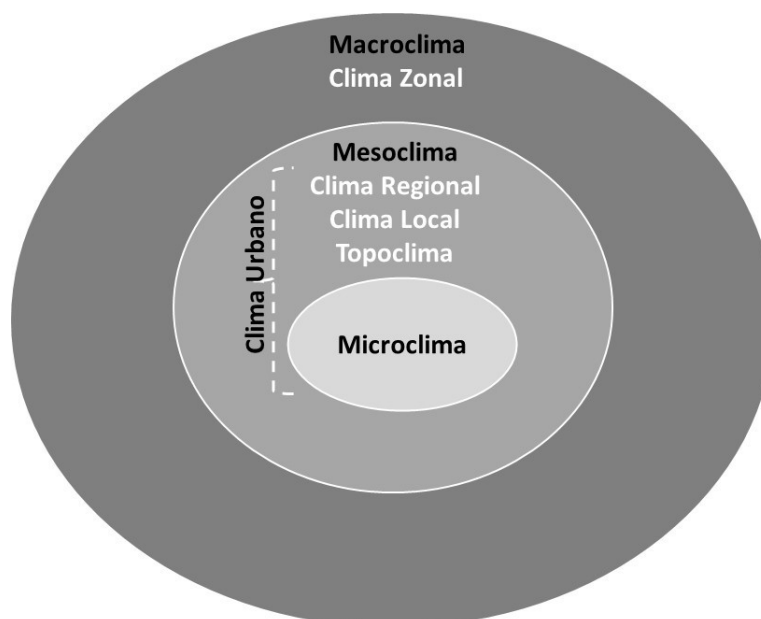
Já do ponto de vista do tempo histórico, Sant'anna neto (2013) explica que variações do clima estão ligadas à presença humana e sua transformação das paisagens e modificação dos ambientes (regional e local), ou como grupo social que vivencia as suas variações.

Do mesmo modo que se tem a necessidade de se adequar a investigação a uma escala climática de análise, se torna imprescindível a hierarquização do sistema de ordens de grandeza climática.

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) explicam que a noção de escala em Climatologia implica uma ordem hierárquica das grandezas climáticas tanto espaciais quanto temporais.

Na síntese da figura 3, tem-se uma organização das escalas do clima e suas subdivisões.

Figura 3: Síntese da organização das escalas do clima e suas subdivisões.



Fonte: Elaborado pela autora.

O *Macroclima* compreende o *Clima Zonal*, e abrange a escala cartográfica de milhões de km<sup>2</sup>, sendo a maior das unidades climáticas, englobando na perspectiva vertical toda a atmosfera e a sua circulação geral. Nessa escala, Sant'Anna Neto (2013) explica que processos climáticos zonais podem afetar os climas regionais e locais de formas variadas e contraditórias, modificando os padrões preexistentes. Sendo assim, o desenvolvimento de dado processo desencadeado nas escalas superiores pode manifestar-se de forma oposta em diferentes regiões do planeta, como por exemplo, o fenômeno ENOS.

O Clima Zonal, comandado sobretudo pelo fator latitude, está decomposto em um conjunto de unidades climáticas menores, em que novos fatores geográficos assumirão o protagonismo na ação modificadora da circulação geral da atmosfera, como acontece no caso dos climas regionais, que por sua vez, poderão ser desmembrados nos climas sub-regionais.

Ribeiro (1993) discorre que um clima regional pode apresentar muitas variações em seu interior em razão da presença de diferentes paisagens fisiográficas e ou antrópicas capazes de influenciar no fluxo energético ou na circulação regional. Nesse raciocínio Sant'Anna Neto (2013) explica que na hierarquia escalar regional, há a possibilidade tanto de se estabelecer relações com as escalas superiores, assimilando como se dá as interações dos sistemas atmosféricos com as transformações das paisagens, quanto com as escalas inferiores, identificando e particularizando os climas locais.

No contínuo da subdivisão dos climas sub-regionais, aparecerão os *mesoclimas*, que se destacam como uma grandeza intermediária entre a maior unidade e a menor unidade climática, e sua extensão é variável podendo ser decomposto nas subdivisões de Clima Regional, Clima Local e Topoclima. Além disso, a definição do que abrange um mesoclima pode-se ter entendimentos diferentes, dependendo do pesquisador. Para Monteiro (1976) “um mesoclima pode ser definido como um conjunto de topoclimas” resgatando o termo introduzido por Thornthwaite (1953).

O *Topoclima* terá como princípio definidor o relevo e entendido por Ribeiro (1993) como uma variação do *Clima Local*, sendo a rugosidade e a orientação das vertentes as responsáveis pela diferenciação a exposição da radiação. Dessa forma no hemisfério Sul as vertentes mais aquecidas serão aquelas orientadas para o Norte,

deixando à sombra as vertentes voltadas para o Sul (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2007).

O *Clima Urbano* enquanto um produto de complexa relação entre o meio físico e a sociedade, transita entre diferentes escalas, a partir do mesoclima até a menor unidade escalar, o microclima. Nesse sentido, Jesus (2008, p.171) destaca que:

É a partir do nível escalar da mesoescala em direção às escalas inferiores do clima, que se percebe as correlações mais complexas e mais interativas entre o sistema climático e a sociedade. As intervenções antrópicas são capazes de produzir microclimas e alterar substancialmente o clima local, projetando seus efeitos gradativamente no âmbito das escalas intermediárias do clima (climas sub-regionais e mesoclimas).

O *Microclima* é tratado com certa unanimidade como a especialização da menor unidade escalar, e definido por Geiger (1950) como o clima mais próximo ao solo. No entanto, em relação a sua extensão existem controvérsias, pois, conforme explicam Monteiro (1976), Ribeiro (1995), Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o microclima é reconhecido como a mais imprecisa unidade escalar climática, em que sua extensão pode variar de centímetros até centenas de m<sup>2</sup>.

Todavia, se tratando dos climas que se definem entre os níveis local e microclimático, são particularmente importantes para avaliação dos impactos ambientais, pois se organizam onde a ação antrópica é evidente (JARDIM e GALVANNI, 2022).

Monteiro (1976) inspirado por esforços de sistematização dentro da Geomorfologia Climática e preocupado em obter respostas para perguntas como: *O que está contido dentro de quê? Quais só os elementos que compõe o conjunto? E em que níveis escalares os elementos podem ser posicionados?* Apresentou uma relação entre unidades geomorfológicas e climáticas baseadas no quadro taxonômico proposto por Tricart e Cailleux (1956). Dessa forma, expôs as escalas do clima para uma abordagem geográfica, que estão explicitadas no quadro 2. Além disso, trouxe algumas propostas de estratégias e técnicas para mensuração e análise do fenômeno climático compatível com cada escala.

Quadro 2 – Categorias Taxonômicas da Organização Geográfica do Clima e suas Articulações com o Clima Urbano

Ordens de grandeza	Unidades de superfície	Escala cartográfica de tratamento	Espaços Climáticos	Espaços Urbanos	Estratégias de abordagem		
					Meios de observação	Fatores de organização	Técnicas de análise
II	(milhões de Km)	1:45.000.000 1:10.000.000	Zonal	-	Satélites Nefanálises	Latitude Centros de ação atmosférica	Caracterização geral comparativa
III	(milhões de Km)	1:5.000.000 1:2.000.000	Regional	-	Cartas sinóticas Sondagens aerológicas	Sistemas meteorológicos (Circulação secundária)	Redes transectos
IV	(centenas de Km)	1:1.000.000 1:500.000	Sub-regional	Megalópole Grade área metropolitana	Rede meteorológica de superfície	Fatos geográficos	Mapeamento sistemático
V	(dezenas de Km)	1:250.000 1:100.000	Local	Área metropolitana Metrópole	Posto meteorológico Rede complementar	Integração geológica Ação antrópica	Análise espacial
VI	(centenas de m)	1:50.000 1:25.000	Mesoclima	Cidade grande bairro ou subúrbio de metrópole	Registro móveis (Episódios)	Urbanismo	Especiais
-	Dezenas de metros	1:10.000 1:5.000	Topoclima	Pequena cidade Subúrbio da cidade	(Detalhe)	Arquitetura	
-	Metros	1:2.000	Microclima	Grande edificação Habitação Setor de Habitação	Baterias de instrumentos especiais	Habitação	

Fonte: Adaptado de Monteiro (2015, p.130)

Nesse sentido, o clima urbano de Juiz de Fora, enquanto objeto de estudo desta Tese, entendido como um fenômeno complexo associado a circulação atmosférica regional, perpassa por análises da mesoescala, passando desde o topoclima/ clima local até os diversos microclimas presentes na cidade.

No entanto, conforme é esclarecido por Assis (2010), o objetivo das nomeações é facilitar a compreensão e mapeamento, uma vez que, os limites e a transição entre as unidades climáticas serão sempre arbitrários e artificiais.

#### 2.4 Circulação na Camada Limite Planetária

É sabido que a atmosfera é uma camada de gases que envolve a Terra, em cerca de 1% do raio do planeta (BARRY E CHORLEY, 2013), e nela não podemos encontrar nenhum limite físico de qualquer espécie. No entanto, algumas camadas podem apresentar propriedades físicas mais evidentes, principalmente quando se leva em consideração a influência direta que a superfície terrestre, através da força de atrito, exerce nos níveis considerados mais inferiores da atmosfera. Dessa forma conforme explica Varejão Silva (2006), costuma-se dividir a atmosfera em duas partes:

- Camada Limite Planetária (CLP) – aquela encontrada justaposta a superfície terrestre, onde o ser humano habita e desenvolve suas inúmeras atividades, cuja rugosidade é capaz de provocar atritos e influenciar o escoamento do ar, através de fluxos turbulentos e caóticos, o que pode afetar o clima local e regional.
- Atmosfera Livre – encontrada acima da camada CLP, onde a superfície terrestre já não tem nenhuma capacidade de exercer influência direta.

O foco de interesse para a Climatologia Geográfica se estabelecerá na Camada Limite Planetária e nos principais processos que afetam a sua circulação incluindo a turbulência, a convecção e a advecção. A turbulência é um movimento caótico e irregular do ar que ocorre em escalas pequenas, e é responsável pela mistura vertical de ar na camada limite. A convecção é o movimento vertical do ar causado pela diferença de temperatura entre o solo e o ar acima dele, e é responsável pela

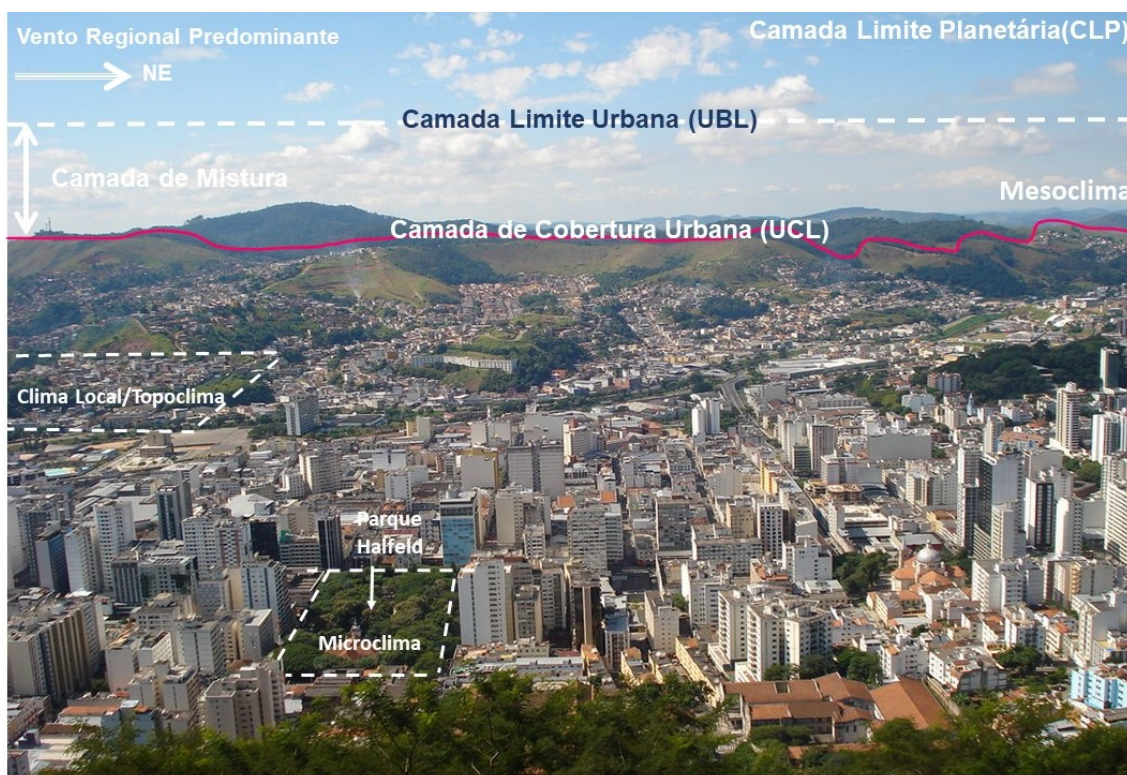
formação de nuvens e precipitação. Já a advecção é o transporte horizontal de ar na camada limite, causado por diferenças de pressão e temperatura.

O clima urbano enquanto uma resultante de modificações das condições climáticas locais, provocadas pela ocupação, e pelas propriedades térmicas dos materiais que compõem a cidade (OKE,1973), irá estabelecer relações de interdependência direta com a camada limite urbana. Os efeitos das características da superfície, como as propriedades de albedo e emissividade dos edifícios e das ruas, afetam significativamente as condições atmosféricas locais.

Nesse sentido Oke (1973) traz uma importante contribuição direcionada à classificação das camadas limites no meio urbano: a primeira camada, engendrada por processos locais e de mesoescala e a segunda por processos de microescala. Fig.4.

1. Camada Limite Urbana (*UBL – Urban Boundary Layer*) engloba a camada superior ao limite urbano, onde as características serão reguladas pela circulação da atmosfera regional.
2. Camada de Cobertura Urbana (*UCL - Urban Canopy Layer*) localizada acima do nível dos telhados (dossel urbano), é formada por microclimas e topoclimas que atuam dentro do meio urbano, que irão se formar em função da heterogeneidade propiciada pela produção do espaço urbano, em que está submetido a uma enorme variedade de elementos que o compõe.

Figura 4 – Representação das subdivisões da atmosfera urbana sob a vista parcial da área central de Juiz de Fora.



Fonte: Adaptado de Oke (1978) e Assis (2010).

De acordo com Gartland (2010), a camada limite é mais espessa durante o dia, quando as superfícies quentes aquecem o ar, que, por ser mais leve, sobe até a atmosfera mais fresca e se mistura. Durante a noite, a superfície terrestre tende a perder calor e se resfriar. Portanto, a camada limite se contrai. Oke (1978) ainda destaca que, nas cidades durante a noite, a superfície vai se tornando mais fria do que o ar acima, proporcionando uma camada de ar frio abaixo do ar quente. Logo, essa liberação de calor das superfícies urbanas causa a inversão de ar quente acima da camada limite.

## 2.5 Zonas Climáticas Locais (ZCLs) – *Local Climates Zones (LCZ's)*

As Zonas Climáticas Locais (ZCLs) foram introduzidas nos estudos ambientais urbanos por meio da proposta de Stewart e Oke (2009). A ideia central consiste em um sistema refinado de classificação e ordenamento da paisagem em escala local, fundamentado no tipo de uso e cobertura do solo em áreas urbanas e rurais.

Essa proposta surgiu da necessidade de compartimentar e representar com maior precisão os diferentes tipos de áreas urbanizadas, os quais eram frequentemente desconsiderados nos estudos convencionais sobre o comportamento da ilha de calor. Segundo Stewart e Oke (2009), os principais objetivos do sistema de classificação são:

a) Proporcionar uma estrutura padronizada de análise, baseada na forma e função urbana, que permita a realização de estudos comparativos sobre clima local e ilha de calor em diferentes cidades ao redor do mundo;

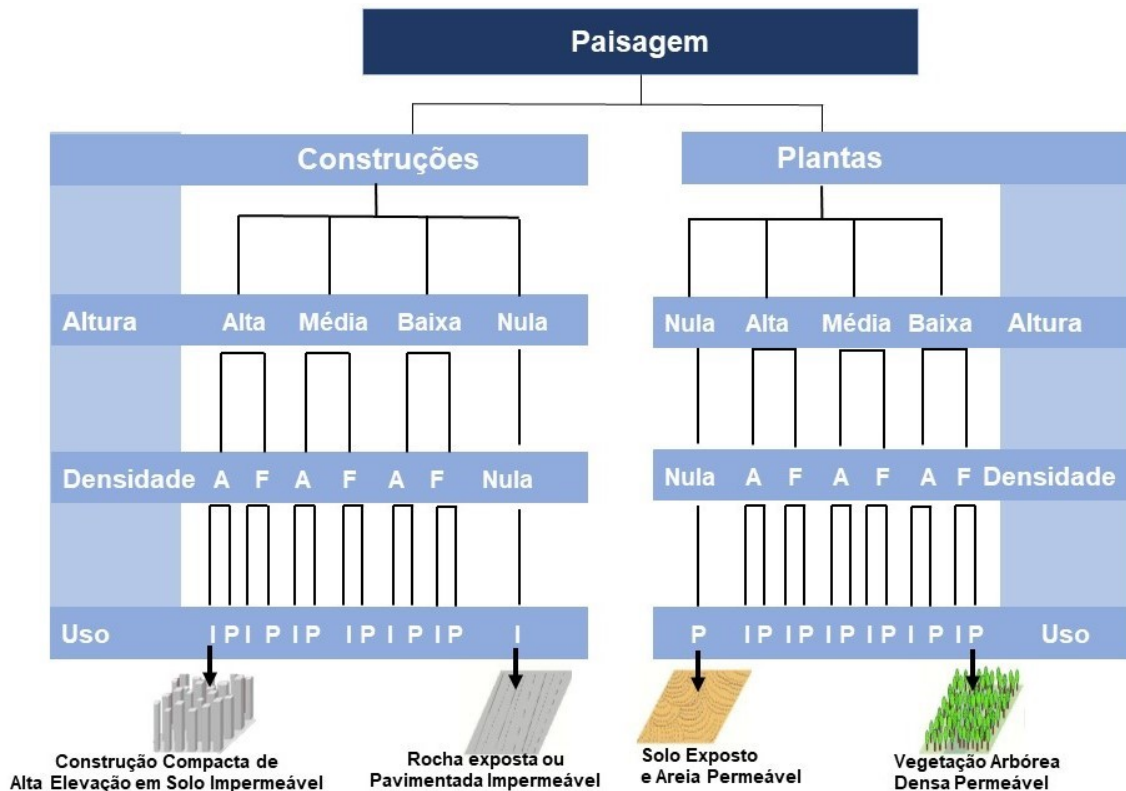
b) Fornecer um protocolo objetivo para mensurar a magnitude da ilha de calor urbana de maneira replicável, independentemente da localização geográfica da cidade analisada.

O principal apontamento crítico de Stewart (2011) é que a maioria das investigações publicadas se apoiava apenas qualitativamente nas dicotomias urbanas e rurais para descrever as paisagens locais. Além disso, o pesquisador argumenta que os termos urbano e rural, por si só, não são capazes de descrever suficientemente a heterogeneidade de um local ou de seus arredores.

A definição de cada classe de ZCLs, conforme Stewart e Oke (2012), se dá a partir de regiões com cobertura de superfície, estrutura, material e atividade humana uniformes, que abrangem centenas de metros a vários quilômetros em escala horizontal. Para isso, foi proposta a divisão da paisagem em diversas classes de acordo com as propriedades térmicas, como a morfologia (altura e densidade do objeto) e o tipo de cobertura da terra (permeável ou impermeável). Além disso, alguns agrupamentos foram adicionados para representar paisagens definidas não por suas

características morfológicas ou de cobertura da terra, mas por materiais de construção e emissões de calor antrópicas.

Figura 5 - Divisão das classes em função da **rugosidade** (edifícios, plantas), **altura do objeto** (alta, média, baixa, nula), **densidade do objeto** (A = aberto; F= fechado) e **cobertura da terra** (I = impermeável; P = permeável).





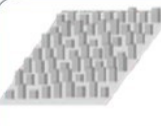
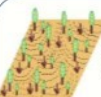
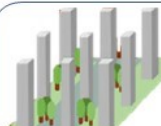

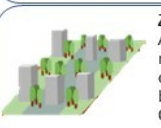

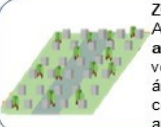
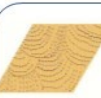
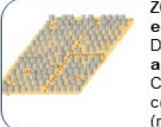
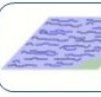

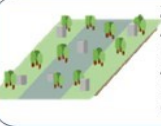



Fonte: Adaptado de Stewart (2011).

Assim, a sistematização das ZCLs compreende 17 zonas, sendo a primeira proposta padronizada de classificação abrangente baseada no clima das paisagens urbanas e rurais para a investigação de ilhas de calor. Cada zona representa uma área que é local em escala e única em cobertura da terra, morfologia de construção e clima térmico em nível local (STEWART, 2011). Em termos práticos, nota-se a preocupação com a horizontalidade escalar e sua uniformidade de atividades humanas. Cada zona homogênea é identificada com base em parâmetros construtivos e a cobertura da terra recebe uma sigla, que vai desde a ZCL1 até a ZCL10, para os

tipos de construções, e ZCLA até a ZCLG, para as diferentes variações da cobertura da terra, conforme as imagens demonstrativas abaixo. Figura 6.

Figura 6 – Zonas Climáticas Locais.

Tipos de Construções	Tipos de Cobertura da Terra
 <p><b>ZCL 1 – Compacta de Alta Elevação</b> Densa mistura de prédios altos (<b>dezenas de andares</b>). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo em sua maioria pavimentada. Materiais de construção: Concreto, aço, pedra e vidro.</p>	 <p><b>ZCL A - Vegetação Arbórea Densa</b> Paisagem densamente arborizada de árvores caducifólias e/ou perenes. Cobertura do solo predominantemente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.</p>
 <p><b>ZCL 2 – Compacta de Média Elevação</b> Densa mistura de edifícios de altura média (<b>3 a 9 andares</b>). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo em sua maioria pavimentada. Materiais de construção: Concreto, azulejo, pedra, tijolo.</p>	 <p><b>ZCL B - Vegetação Arbórea Esparsa</b> Paisagem levemente arborizada de árvores caducifólias e/ou perenes. Cobertura do solo predominantemente permeável (plantas baixas). A função da zona é floresta natural, cultivo de árvores ou parque urbano.</p>
 <p><b>ZCL 3 – Compacta de Baixa Elevação</b> Densa mistura de edifícios baixos (<b>1 a 3 andares</b>). Pouca ou nenhuma árvore. Cobertura do solo em sua maioria pavimentada. Materiais de construção: Concreto, azulejo, pedra, tijolo.</p>	 <p><b>ZCL C - Vegetação Arbustiva</b> Arranjo aberto de arbustos e de árvores baixas e lenhosas. Cobertura do solo predominantemente permeável (solo descoberto e areia). A função é matagal natural ou agricultura.</p>
 <p><b>ZCL 4 – Aberta de Alta Elevação</b> Arranjo aberto de edifícios altos (<b>dezenas de andares</b>). Abundância de cobertura vegetal permeável (plantas baixas, árvores.) Materiais de construção: Concreto, aço, pedra e vidro.</p>	 <p><b>ZCL D – Vegetação Rasteira</b> Paisagem inexpressiva de gramas ou plantas/culturas herbáceas. Pouca ou nenhuma árvore. A função da zona é pastagem natural, agricultura ou parque urbano.</p>
 <p><b>ZCL 5 – Aberta de Média Elevação</b> Arranjo aberto de edifícios de altura média (<b>3 a 9 andares</b>). Abundância de cobertura vegetal permeável (plantas baixas, árvores.) Materiais de construção: Concreto, azulejo, pedra, tijolo.</p>	 <p><b>ZCL E – Rocha exposta ou Pavimentada</b> Paisagem inexpressiva de rocha ou cobertura pavimentada. Pouca ou nenhuma árvore ou planta. A função da área é deserto natural (rocha) ou transporte urbano.</p>
 <p><b>ZCL 6 – Aberta de Baixa Elevação</b> Arranjo aberto de edifícios baixos (<b>1-3 andares</b>). Abundância de cobertura vegetal permeável (plantas baixas, árvores esparsas). Materiais de construção de madeira, tijolo, pedra, azulejo e concreto.</p>	 <p><b>ZCL F – Solo Exposto e Areia</b> Paisagem inexpressiva de solo ou cobertura de areia. Pouca ou nenhuma árvore ou planta. A função da área é deserto natural ou agricultura.</p>
 <p><b>ZCL 7 – Compacta Pouco Consolidada e de Baixa Elevação</b> Densa mistura de edifícios de um <b>único andar</b>. Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo predominantemente compacta. Materiais de construção leves (madeira, palha, metal).</p>	 <p><b>ZCL G – Água</b> Grandes corpos de água abertos, como mares e lagos, ou pequenos corpos de água.</p>
 <p><b>ZCL 8 – Grandes construções de Baixa Elevação</b> Arranjo aberto de grandes edifícios baixos (<b>1 a 3 andares</b>). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo em sua maioria pavimentada. Materiais de construção de aço, concreto, metal e pedra.</p>	<p><b>Propriedades variáveis de Cobertura da Terra</b></p> <p><b>b</b> árvores sem folhas <b>s</b> terra coberta de neve <b>d</b> terra seca <b>w</b> terra úmida</p>
 <p><b>ZCL 9 – Escassamente Construído</b> Arranjo esparsos de edifícios pequenos ou médios em um ambiente natural. Abundância de cobertura vegetal permeável (plantas baixas, árvores esparsas).</p>	
 <p><b>ZCL 10 – Indústria Pesada</b> (Torres, Tanques, Chaminés). Poucas ou nenhuma árvore. Cobertura do solo principalmente pavimentada ou compactada. Materiais de construção de metal, aço e concreto.</p>	

Fonte: Adaptado de Stewart (2011).

A literatura internacional tem demonstrado ampla aplicação da classificação das Zonas Climáticas Locais em cidades com distintas realidades demográficas e climáticas. Exemplos incluem metrópoles como Colombo, no Sri Lanka, com mais de 22 milhões de habitantes (Perera & Emmanuel, 2016); Hong Kong, com cerca de 7 milhões (Zheng *et al.*, 2018); e Madri, com aproximadamente 3 milhões (Brousse *et al.*, 2016).

No entanto, um levantamento bibliográfico realizado por Feng e Liu (2022) indicou que mais da metade dos estudos publicados sobre ZCLs concentra-se em cidades chinesas. Essa predominância é atribuída à forte relação entre os efeitos das ilhas de calor e a rápida urbanização na China, sendo o mapeamento das ZCLs considerado uma ferramenta essencial para diagnosticar e mitigar os impactos das mudanças climáticas locais.

Com o intuito de padronizar e consolidar um banco de dados global sobre temperaturas intraurbanas, foi criado o projeto WUDAPT (*World Urban Database and Access Portal Tools*). Essa plataforma organiza informações sobre forma e função urbana, capturando de forma sistemática a variabilidade térmica em áreas urbanizadas (Ching *et al.*, 2014; Demuzere *et al.*, 2015).

Nesse sentido, Han *et al.* (2024) destacam que a padronização internacional da classificação das ZCLs permite comparações metodologicamente consistentes entre cidades, fomentando a cooperação internacional e a troca de estratégias bem-sucedidas para o enfrentamento de problemas climáticos urbanos.

No Brasil, a proposta já vem sendo replicada em cidades de grande e médio porte. Em cidades médias, como é o caso da pesquisa desenvolvida em Presidente Prudente – SP, por Cardoso e Amorim (2018), as ZCLs foram utilizadas para descrever as áreas investigadas e comparar a intensidade da ilha de calor no meio intraurbano. As diferenças térmicas entre as LCZ's foram evidentes durante o período representativo do inverno, mas também foi possível identificar contrastes no verão.

Ferreira e Ugeda Júnior (2020) desenvolveram uma pesquisa em Cuiabá com o objetivo de analisar variabilidade espacial e temporal da temperatura de superfície

considerando como unidade espacial de estudo a classificação das Zonas Climáticas Locais. Para as 17 classificações dos tipos de construção, 16 foram encontradas em Cuiabá. A única exceção foi ZCL1, que considera edificações com a presença de dezenas de andares. Ao final da pesquisa os autores verificaram que as temperaturas de superfície mais elevadas foram nas ZCL2 e ZCL3, em função do maior adensamento em oposto ao encontrado nas áreas rurais e periféricas.

Anjos *et al.* (2020) investigaram a variabilidade espaço-temporal da ilha de calor urbana em Londrina-PR, com base nas Zonas Climáticas Locais e medições térmicas intraurbanas. Devido à diversidade do tecido urbano, foram incluídas seis subclasses às ZCLs, aprimorando a descrição do uso da terra e da distribuição térmica. Os resultados mostraram maior intensidade da ilha de calor à noite e ao amanhecer, principalmente sob vento calmo e céu claro, com um padrão de temperatura em forma de cúpula, mais quente no centro e mais ameno nas periferias.

Megda e Masiero (2021) utilizaram a técnica de transectos móveis através de Vants (Veículos Aéreos não Tripulados) em diferentes Zonas Climáticas Locais na cidade de Franca – SP. A pesquisa teve como objetivo identificar as ocorrências das Ilhas de Calor Urbano (ICUs) em áreas com configurações morfológicas distintas e em diferentes alturas. Os resultados indicaram a formação significativa de ICUs, nas ZCLs 4 e 5, verticalizadas, classificadas como abertas de alta e média elevação, não só a nível do pedestre, mas também pouco acima de 60 metros de altura, sobretudo no inverno.

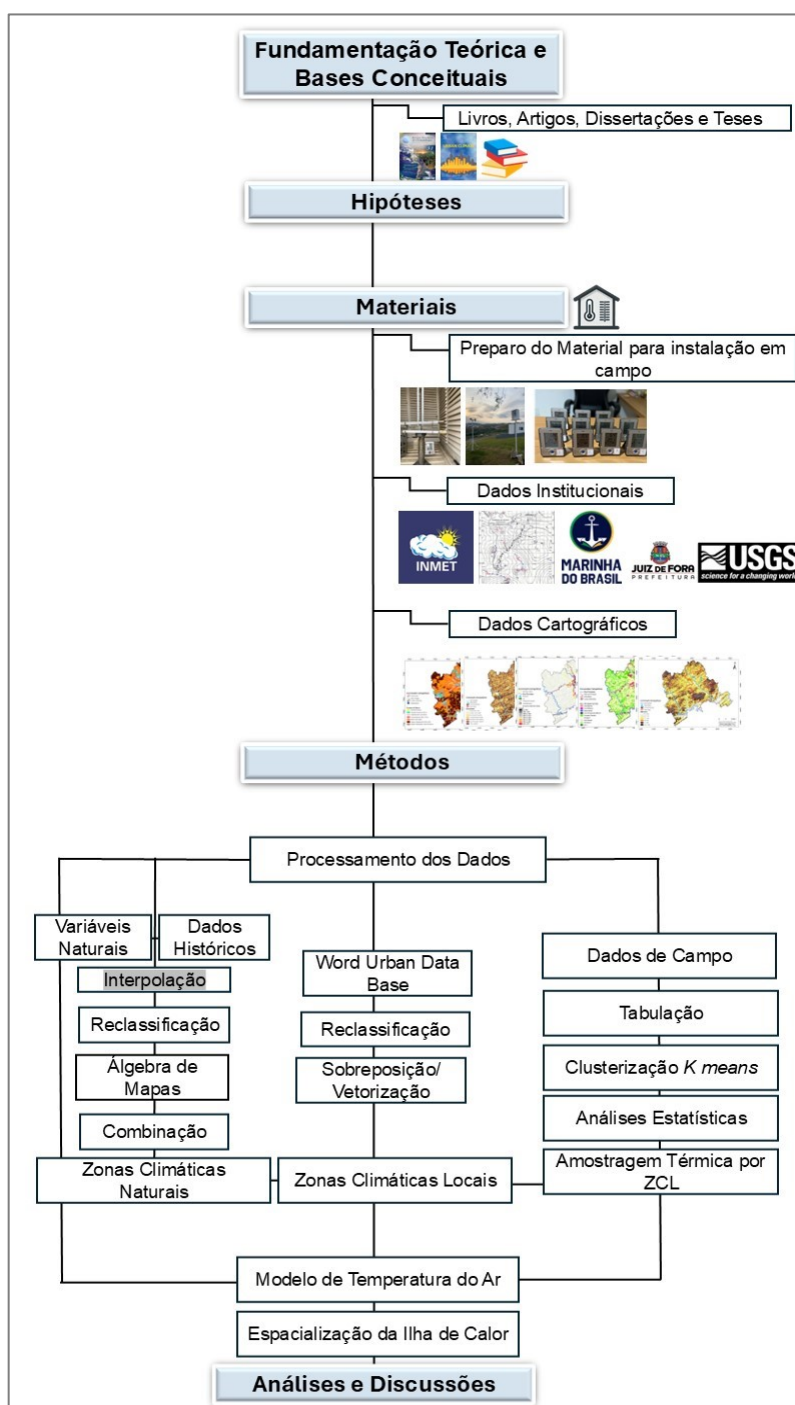
Diante dos diferentes estudos de caso em que foram apresentadas e analisadas as aplicações das classificações das tipologias em Zonas Climáticas Locais, ficou evidente que a classificação pode ser adaptada para as diferentes realidades urbanas e trabalhada em conjunto com diferentes tipos de técnicas de mensuração da temperatura do ar. Outro aspecto que merece destaque na aplicação das ZCLs é que a diferenciação das tipologias não se dá de maneira muito clara, pois estabelecer padrões homogêneos não é tarefa simples, sobretudo quando se trata de países de urbanização recente e acelerada, como é a realidade da maioria das cidades localizadas em países classificados como emergentes ou em vias de desenvolvimento.

Além disso, cabe destacar que as ZCLs não consideram explicitamente a altitude. Conforme apontado por Mushore *et al.* (2023) e Han *et al.* (2024), a metodologia WUDAPT, embora amplamente utilizada para o mapeamento de ZCLs, apresenta a limitação de não incorporar de forma direta fatores como relevo e altitude. Tal limitação é particularmente relevante em áreas com grandes variações topográficas, onde a acurácia das análises pode ser comprometida. No caso de cidades situadas em contextos morfoclimáticos de Mares de Morros, a altitude constitui um dos principais fatores de controle climático.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A base metodológica para o desenvolvimento dessa pesquisa foi estruturada com base em quatro etapas, que podem ser visualizados através da figura 7.

Figura 7 – Roteiro metodológico.



Fonte: Organizado pela autora.

### 3.1 Revisão Teórica e Bases Conceituais

Primeiramente, foi realizada uma revisão teórica através das principais bases conceituais que amparam a climatologia geográfica brasileira, como é o caso do S.C.U. Além disso, foi fundamental a busca por artigos, teses e dissertações nacionais e internacionais que tratassem a delimitação e a aplicação das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) em diferentes realidades, desde metrópoles até cidades de médio e pequeno porte. É importante ressaltar que o processo de revisão teórica foi contínuo e acompanhou todas as etapas de desenvolvimento dessa pesquisa.

### 3.2 Base de Dados Cartográficos

Uma das etapas fundamentais em pesquisas climáticas intraurbanas consiste no detalhamento das características estáticas e dinâmicas que compõem a urbe. Nesse sentido, a confecção dos mapas temáticos foi realizada no software *ArcGIS* 10.8, garantindo a padronização das bases cartográficas no sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*), com datum SIRGAS 2000, zona 23 Sul.

#### 3.2.1 Mapa de Altimetria, Declividade, Orientação das Vertentes e Classificação das formas do Relevo

Partindo do pressuposto climático, observa-se que as cidades localizadas em domínios de Mares de Morros apresentam forte vinculação entre a dinâmica atmosférica e os aspectos físicos do relevo. Com base nessa premissa, foram elaborados mapeamentos temáticos referentes à altimetria, declividade, orientação das vertentes e à classificação das formas do relevo no município de Juiz de Fora.

Para a construção do mapa de altimetria, utilizou-se a imagem de radar SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), no formato *GEOTIFF* e resolução espacial de 90 metros, disponibilizada gratuitamente pelo site da Embrapa Monitoramento por Satélite. Após a inserção do dado no ambiente *ArcMap*, foi gerado o relevo sombreado, aplicando-se um fator de exagero vertical (Z) de 10 metros por meio da ferramenta *Hillshade*, hospedada no módulo *Spatial Analyst Tools*, acessível pelo menu *ArcToolbox*.

A elaboração dos mapas de orientação das vertentes e de declividade também foi realizada a partir da imagem SRTM. Para tanto, empregaram-se, respectivamente, as ferramentas *Aspect* e *Slope*.

Por fim, o mapa de classificação das formas de relevo foi obtido a partir da base cartográfica disponibilizada pela Prefeitura de Juiz de Fora (PJF), confeccionada por Eduardo (2018).

### 3.2.2 Mapeamento da Temperatura de Superfície

Através do sensoriamento remoto é possível identificar a priori como se dá a relação atmosfera e superfície, o que facilitou a escolha de áreas representativas para o monitoramento da temperatura do ar. No entanto, é necessário que sejam escolhidas imagens de diferentes estações do ano, no período seco e chuvoso, para comparar as distintas características entre os materiais urbanos e a vegetação.

Para a elaboração do mapeamento de temperatura de superfície foi feito o tratamento das imagens do satélite Landsat 8, banda 10. O mapeamento da temperatura de superfície teve como finalidade conduzir a escolha dos pontos de coleta de dados em campos, além de subsidiar a estimativa de temperatura do ar. As imagens do satélite Landsat 8, banda 10, do canal infravermelho termal/TIRS 1, possuem resolução espacial de 100 metros, porém, após ser tratada e disponibilizada pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), podem ser obtidas gratuitamente, com pixel de 30 metros de resolução espacial.

No site (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) após o cadastro e login, é fornecido um catálogo de imagens com diferentes datas. Foram escolhidas datas durante o mês de coleta em campo e com menor nível possível de cobertura de nuvens.

Após a conclusão do *download* das imagens em formato GEOTIFF, elas foram adicionadas no ambiente *Arcmap* e reprojetaadas para o Hemisfério Sul, utilizando a *Projeção\Datum WGS1984\ UTM \ zona 23S*, através do projetor de raster inserido no *ArcToolbox*. Empregando as equações e parâmetros disponibilizados pelo site da USGS, o primeiro passo foi a realização do cálculo da radiância no topo da atmosfera através da seguinte equação:

$$L\lambda = ML * Q_{cal} + A_L \quad (\text{eq. 1})$$

Em que:

$L\lambda$  = Radiância espectral no topo da atmosfera (unidade: Watts/(m<sup>2</sup> sr μm));

$ML$  = Fator multiplicativo de redimensionamento da banda

$Q_{cal}$  = Número Digital (ND) do pixel;

$A_L$  = Fator aditivo reescalado de radiância para a banda 10

Na sequência foi realizado o cálculo de NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) com o objetivo de estimar as condições de proporção e de densidade da cobertura vegetal que irá influenciar na temperatura de superfície. O cálculo proposto por Rouse *et al* (1973) é realizado pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{P_{iv} - P_v}{P_{iv} + P_v} \quad (\text{eq. 2})$$

Em que:

$P_v$  = reflectância da banda do infravermelho próximo (Reflectância da banda 5);

$P_{iv}$  = reflectância da banda do vermelho (Reflectância da banda 4);

Para a correção da radiância do infravermelho termal, é necessário o cálculo do fator de cobertura ( $F_c$ ), emissividade ( $\epsilon_0$ ) e radiância espectral corrigida ( $LT$ ). Inicialmente, calculou-se o Fator de Cobertura, definido por:

$$F_c = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{dNDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (\text{eq.3})$$

Em que:

$NDVI_{max}$  = (NDVI máximo) possível igual a um (1);

$NDVI_{min}$  = (NDVI mínimo) possível igual a um negativo (-1);

$NDVI$  = NDVI calculado anteriormente;

$F_c$  = Fator de cobertura;

Após a correção atmosférica foi aplicada a equação 2, para se obter a conversão dos valores em temperatura Kelvin, e em seguida subtraindo de 273,15 para graus Celsius:

$$T = \frac{K_2}{Ln \left( \frac{K_1}{L\lambda} + 1 \right)} - 273,15 \quad (\text{eq .3})$$

Em que:

$T$  = Temperatura efetiva no satélite em graus Kelvin;

$K_1$  = Constante de calibração 1 = 774,89

$K_2$  = Constante de calibração 2 = 1321,08 (K)

$Ln$  = radiância espectral corrigida ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ );

$L\lambda$  = a radiância espectral no topo da atmosfera em que foi obtida através da equação 1.

Depois de gerado o mapa de temperatura de superfície, foi recortada a área de interesse, através da ferramenta *Extract by Mask*, em seguida o arquivo raster foi reclassificado em oito intervalos de temperatura de superfície.

### 3.3 Experimentos de campo e equipamentos

*“Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura” (Monteiro, 1990).*

Uma das formas mais elementares de se inferir a intensidade da influência do tecido urbano no clima local é a comparação entre diferentes pontos dentro da cidade e desses com a área rural.

Nesse sentido, Assis (2010) reitera que não existe um número exato de pontos amostrais para a identificação das características de um clima urbano, isso dependerá do objetivo da pesquisa, do porte da cidade e da disponibilidade de equipamentos.

Para esta pesquisa foram utilizados 14 pontos de monitoramento fixo, em que 10 pontos foram monitorados por sensores com *data logger*; 3 pontos foram realizados por estações meteorológicas, um ponto oficial, a Estação Meteorológica de Juiz de

Fora, nº 83692 pertencente ao 5º Distrito de Meteorologia do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)<sup>1</sup>, e ao Ministério da Agricultura. As outras duas estações são particulares, e os seus dados estão disponibilizados em tempo real através do site *Weather Underground*.

O objetivo central das medições é explicar como as diferentes condicionantes físicas e urbanas se comportam durante a atuação de diferentes sistemas atmosféricos, além de se ter amostras térmicas das diferentes zonas climáticas ao longo da cidade.

O primeiro monitoramento foi realizado entre o dia 13 de julho e 16 de setembro de 2023, com ênfase especial no mês de agosto, por se tratar de um período tipicamente seco, caracterizado por céu claro e estabilidade atmosférica. De acordo com grande parte da literatura que aborda as condições de formação de núcleos de aquecimento (Assis, 2010) e ilhas de calor (Amorim, 2020), há consenso de que, em ambientes tropicais, situações de estabilidade atmosférica associadas a céu limpo e ventos calmos são especialmente favoráveis à ocorrência de elevadas amplitudes térmicas no ambiente intraurbano.

O segundo monitoramento de campo foi realizado entre o dia 1 de outubro até o dia 5 de novembro de 2023. Já o terceiro monitoramento foi realizado entre o dia 1 e 29 de fevereiro de 2024, com o objetivo de obter amostras representativas da estação úmida.

A etapa de coleta de dados em campo se iniciou com a reforma dos 10 abrigos meteorológicos disponibilizados pelo Laboratório de Biogeografia e Climatologia da UFMG. Os abrigos foram confeccionados, adaptados para transporte e instalação em campo por Assis (2010), a partir do modelo proposto pelo Prof. Dr. José Roberto Tarifa do Laboratório de Climatologia da USP. Os abrigos foram lixados e pintados de branco.

Os sensores com datalogger, para medição de temperatura e umidade, da fabricante TFA Dostmann/Wertheim©, modelo 30.3015, também disponibilizados pelo

---

<sup>1</sup> <https://portal.inmet.gov.br/>

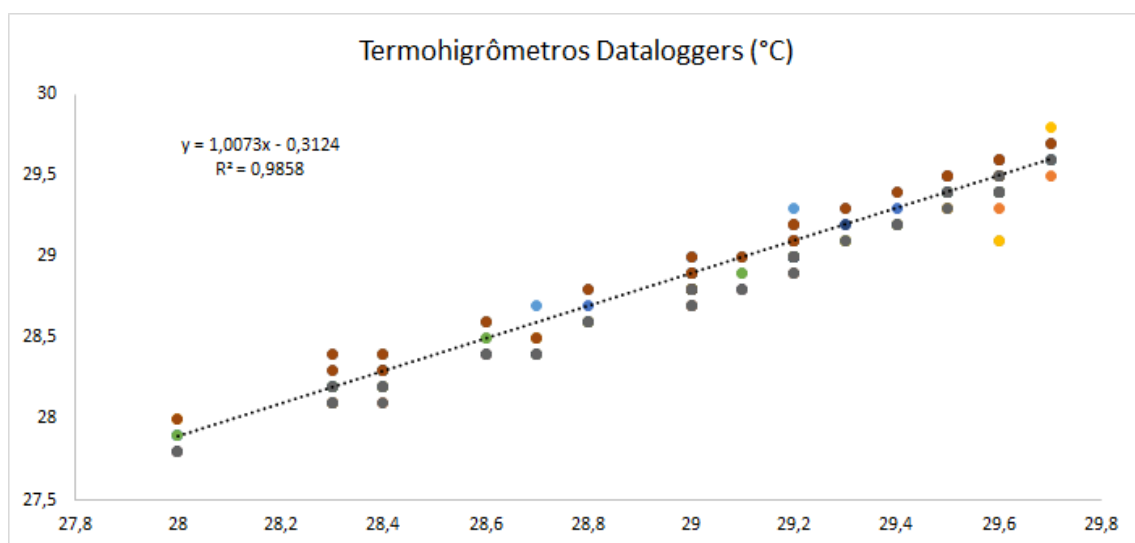
Laboratório de Climatologia da UFMG, foram numerados e aferidos antes da realização do trabalho de campo. (Fig. 8 e 9).

Figura 8 - Sensores com datalogger, para medição de temperatura e umidade TFA Dostmann/Wertheim©, modelo 30.3015.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 9 - Gráfico de correlação entre os dados de temperatura registrados nos 10 termo-higrômetros dataloggers.



Fonte: Elaborado pela autora.

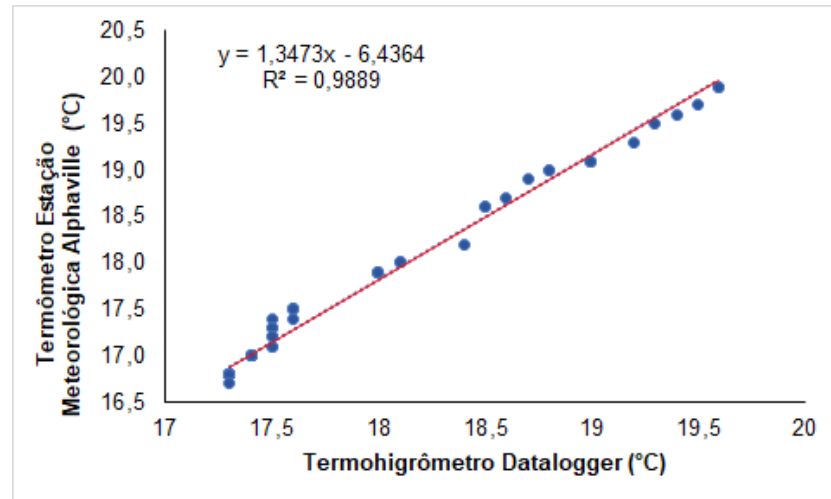
Para fins de aferição, um dos sensores juntamente com o abrigo foi colocado próximo à estação meteorológica localizada no Condomínio Alphaville, sendo configurado para que registrasse a temperatura e a umidade de 5 em 5 minutos, iniciando às 15:00 horas do dia 30 de setembro até as 23:00 horas do mesmo dia, totalizando 96 medições (Fig. 10). Apesar de os equipamentos serem de marcas diferentes e estarem em abrigos meteorológicos confeccionados com materiais com propriedades de isolamento distintas, o gráfico de dispersão demonstrou forte correlação, e a máxima diferença encontrada entre os equipamentos foi de 0,5°C (Fig. 11).

Figura 10 - Aferição do termo-higrômetros datalogger com a Estação Meteorológica localizada no Condomínio Alphaville (ZCL 9) no dia 30/09/2023.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 11 - Gráfico de correlação entre os dados de temperatura registrados no termo-higrômetro datalogger com os dados registrados pela Estação Meteorológica localizada no condomínio Alphaville.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 12 - Aferição do termo-higrômetros datalogger com a Estação Meteorológica de Juiz de Fora, nº 83692 pertencente ao 5º Distrito de Meteorologia e ao Ministério da Agricultura.



Fonte: Elaborado pela autora.

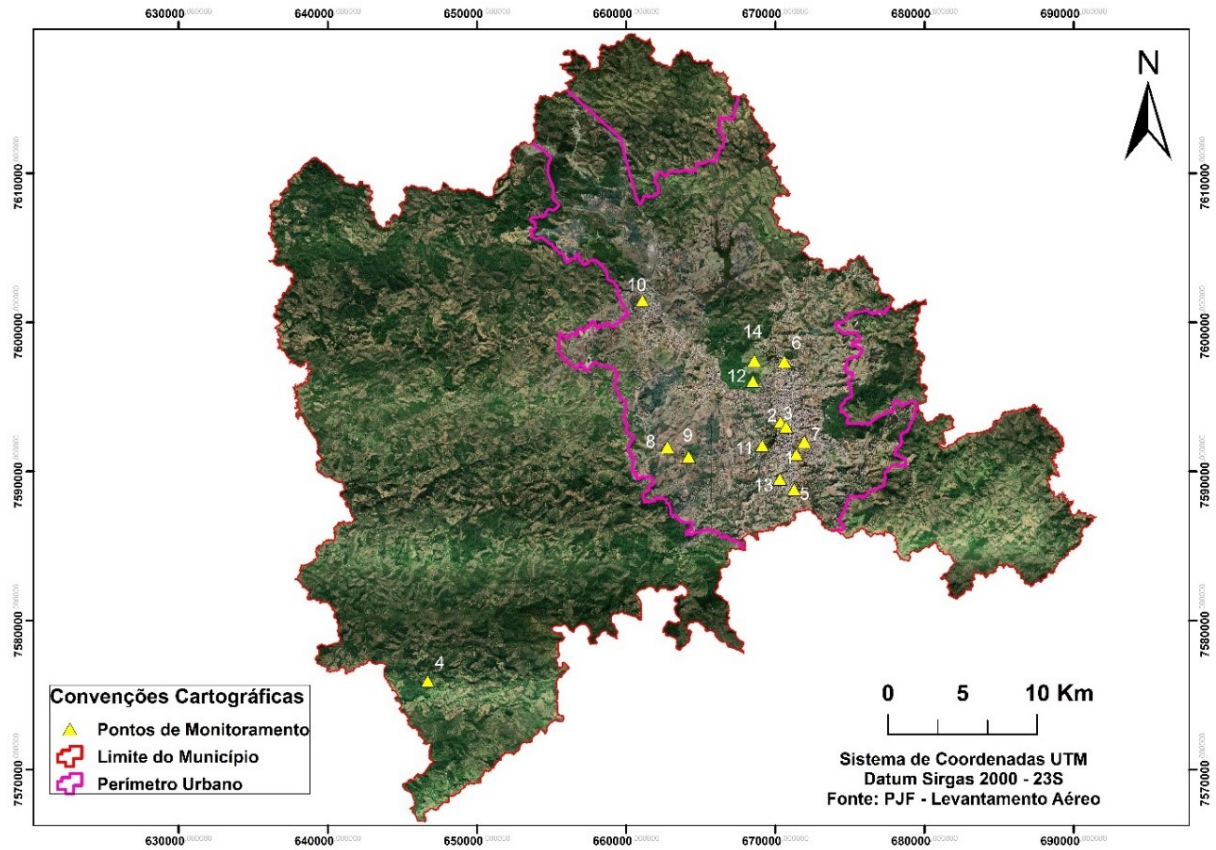
Com os abrigos já preparados, foi iniciada a distribuição em campo, levando-se em consideração alguns cuidados fundamentais, como o posicionamento dos sensores voltados para o norte, com o intuito de estarem sempre protegidos da incidência solar direta.

### 3.3.1 Pontos de Monitoramento

Os critérios para escolha dos locais para monitoramento, através da instalação dos abrigos com os sensores, foram estabelecidos em função da seleção de áreas com raios representativos dos seus entornos, para de cada tipo de classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCLs). (Fig.14, 15 e 16).

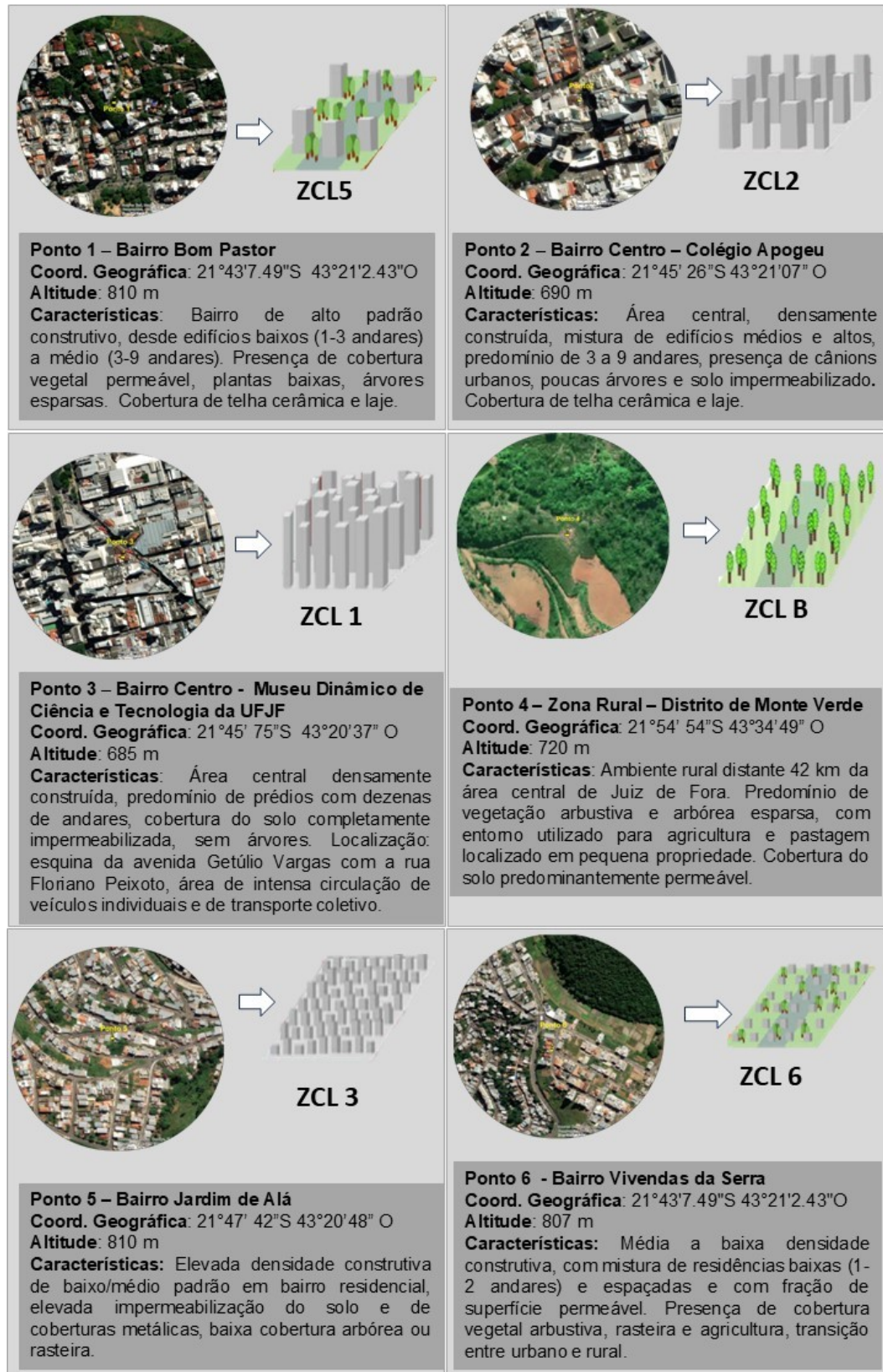
Os 10 sensores foram configurados para registrar a temperatura e a umidade a cada 1 hora. 9 sensores foram distribuídos na área urbana ao longo do perímetro urbano e 1 sensor foi instalado na área rural, a sudoeste da malha urbana, para fins de cálculo da  $\Delta T = T_u - r$  .

Figura 14 – Mapa com a localização dos pontos de monitoramento.



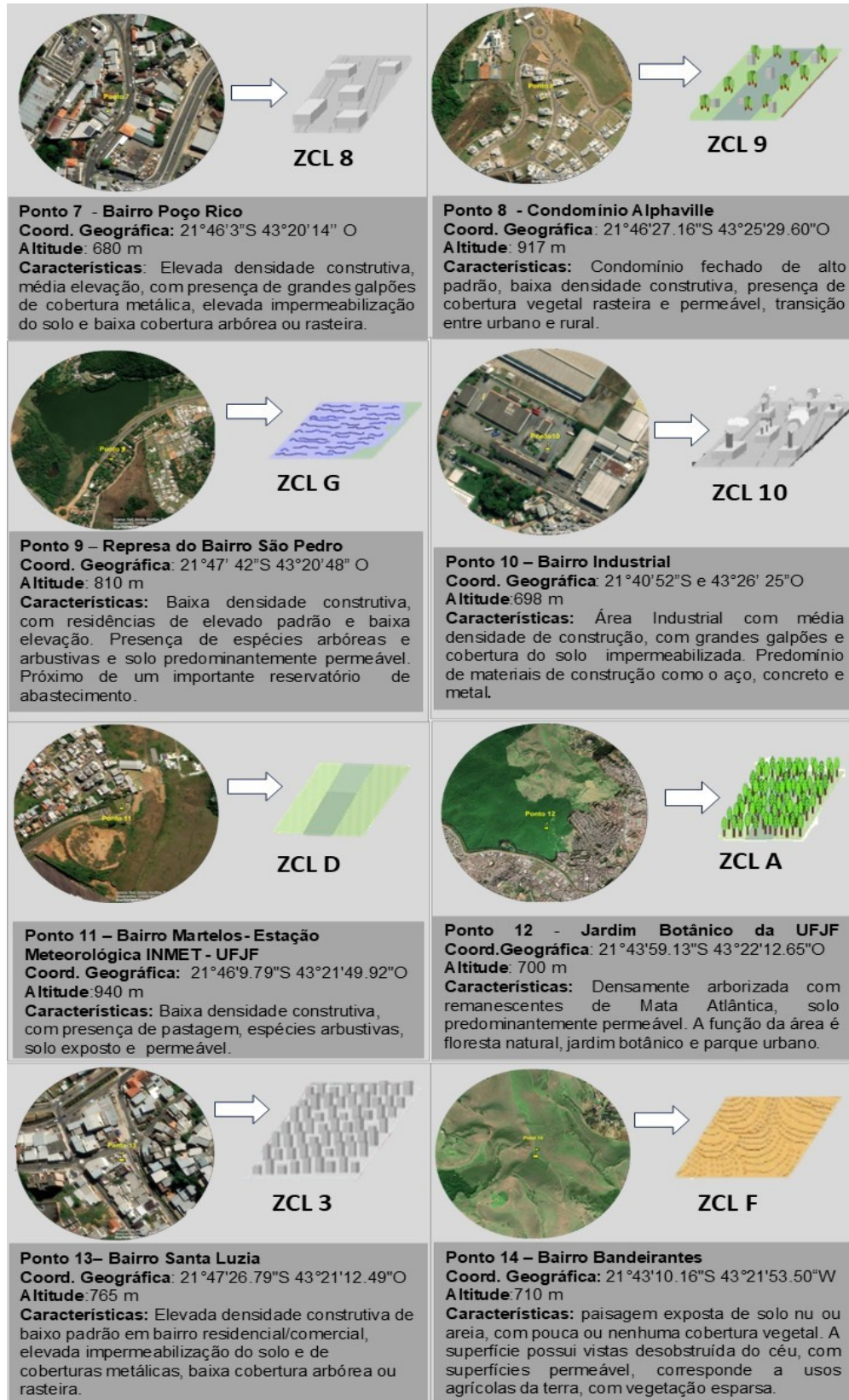
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 – Principais características dos pontos 1 ao 6, onde foram instalados os sensores.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 16 – Principais características dos pontos 7 ao 14, onde foram instalados os sensores.



Fonte: Elaborado pela autora

### 3.4 Organização e tratamento estatístico dos dados

#### 3.4.1 Análise dos dados coletados em campo

Após coletar e descarregar os dados de campo, foram aplicadas as estatísticas descritivas básicas: como média, máxima, mínima, tendências e correlação.

#### 3.4.2 Análise Rítmica e Sinótica

Para a análise dos tipos de tempo observadas durante todos os dias de coleta de dados em campo, foi realizada a confecção de gráficos de análise rítmica e sinótica. Zavattini e Bonin (2013) reforçam que a identificação das massas de ar e dos mecanismos frontais que definem os diferentes tipos de tempo que atuam em um determinado espaço geográfico, são capazes de delimitar e explicar os problemas investigados, sendo o tratamento dinâmico, indispensável para as análises em climatologia geográfica.

Os sistemas atmosféricos foram identificados a cada 12 horas, durante todos os dias de coleta em campo, através das cartas sinóticas disponibilizadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN)<sup>2</sup> da Marinha do Brasil. Além disso, foram consultados os boletins técnicos disponibilizados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)<sup>3</sup> pertencente ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

#### 3.4.3 Agrupamento de dados térmicos usando algoritmo K-Means

Para a identificação e categorização de padrões térmicos entre diferentes zonas climáticas locais (ZCL), adotou-se uma abordagem de aprendizado de máquina não supervisionado, utilizando o algoritmo *K-Means*. A implementação do algoritmo *K-Means* foi realizada em linguagem *Python*. Esta técnica tem sido amplamente empregada em estudos ambientais e urbanos por sua eficácia na segmentação de

---

<sup>2</sup> <https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas>

<sup>3</sup> <https://www.cptec.inpe.br/mg/belo-horizonte>

dados multivariados com base em similaridades internas (Świta e Suszyński, 2014; Yuan e Yang, 2019).

O *K-Means* é um algoritmo de agrupamento (*clustering*) que tem como objetivo particionar um conjunto de dados em  $k$  grupos mutuamente exclusivos, de modo que os elementos de cada grupo sejam mais similares entre si do que em relação aos elementos de outros grupos. No presente estudo, essa similaridade foi mensurada exclusivamente com base na variável temperatura do ar, considerando-se os registros obtidos para cada ZCL durante a atuação de diferentes sistemas atmosféricos. A operacionalização do K-Means segue os seguintes passos metodológicos:

1. Inicialização de  $k$  centróides de forma aleatória;
2. Atribuição de cada observação ao cluster cujo centróide apresenta a menor distância euclidiana da sua temperatura;
3. Recalculação dos centróides com base na média das temperaturas de cada grupo;
4. Iteração dos passos 2 e 3 até a convergência do modelo (isto é, quando os centróides se estabilizam).

No contexto desta pesquisa, definiu-se  $k = 4$  como número de clusters, a fim de permitir uma classificação térmica simplificada e compatível com a heterogeneidade observada nas temperaturas. Cada cluster resultante foi então reordenado segundo a média térmica dos seus membros, conferindo maior coerência à análise comparativa entre os diferentes sistemas atmosféricos. Essa reordenação é essencial para manter a consistência visual e interpretativa nos gráficos produzidos, onde o cluster de menor temperatura é sempre identificado como Grupo 1, e assim sucessivamente.

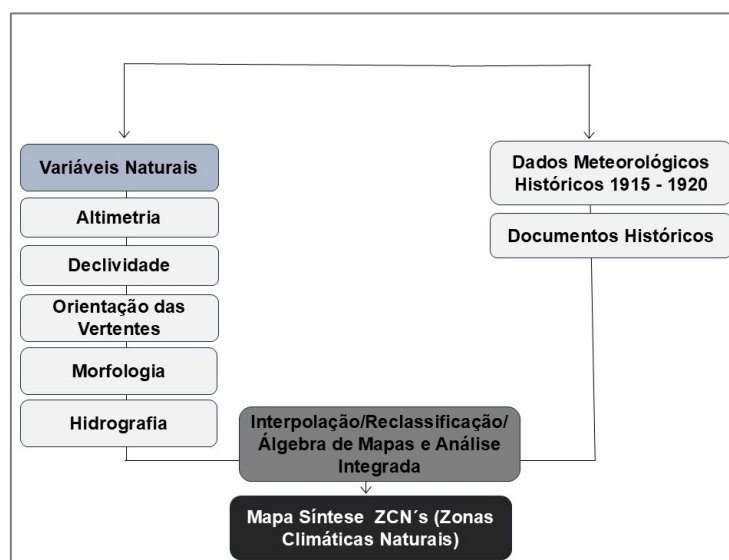
É importante destacar que, por se tratar de um método não supervisionado, o *K-Means* não exige a existência de categorias previamente definidas nos dados. Em vez disso, o modelo identifica agrupamentos naturais com base na distribuição da variável analisada, conferindo-lhe caráter exploratório e analítico. Contudo, o algoritmo apresenta algumas limitações, como a necessidade de definir previamente o número de clusters e a sensibilidade à presença de outliers.

No presente estudo, a variável altitude foi utilizada como parâmetro de contraste nos gráficos de dispersão, mas não foi incluída no processo de agrupamento, de modo a preservar a pureza estatística da análise térmica. O uso do *K-Means* mostrou-se adequado para evidenciar agrupamentos térmicos recorrentes sob distintas influências sinóticas, sendo uma ferramenta útil na avaliação de contrastes microclimáticos entre ZCLs.

#### 3.4.4 Elaboração dos mapas das Zonas Climáticas “Naturais” de Juiz de Fora

O mapeamento das Zonas Climáticas “Naturais” de Juiz de Fora teve como objetivo possibilitar a comparação com as Zonas Climáticas Locais (ZCL), ao mesmo tempo em que permitiu visualizar o comportamento médio da atmosfera em um contexto com menor influência da urbanização. Essa abordagem buscou estabelecer uma base de referência mais próxima das condições naturais do clima local, contribuindo para identificar e quantificar as alterações decorrentes do ambiente construído. A organização metodológica adotada para a elaboração das Zonas Climáticas Naturais do município é apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Organograma do mapeamento das Zonas Climáticas “Naturais”.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme explicado por Ferreira *et al.* (2023), a Estação Meteorológica de Juiz de Fora, nº 83692, pertencente ao 5º Distrito de Meteorologia e vinculada ao Ministério

da Agricultura, foi instalada e entrou em operação em 31 de dezembro de 1909. Inicialmente, estava localizada na área central do município, no Largo do Riachuelo, onde permaneceu até 1929. Após um período de dez anos sem funcionamento, suas atividades foram retomadas em maio de 1972, já em nova localização: o campus da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). A transferência ocorreu em razão da intensa urbanização do centro da cidade, que comprometia a representatividade das condições climáticas naturais do município (FERREIRA et al., 2023).

Apesar de a Estação ter iniciado as atividades em 1909, foi possível acessar os dados juntos ao LabCaa apenas a partir de 1915. Assim, optou-se por um recorte temporal entre 1915-1920, uma vez que, após esse ano, o processo de urbanização e a população da cidade já passavam por um crescimento significativo.

A priori, os dados utilizados no mapeamento das Zonas Climáticas “Naturais” serão os dados médios mensais históricos de temperatura máxima, mínima e média compensada, obtidos pela Estação Meteorológica de Juiz de Fora.

Para isso os dados meteorológicos históricos foram interpolados juntamente com a morfologia do terreno, sobretudo com a variável altimetria, com amparo na metodologia apresentada por Assis (2010) e que pode ser visualizada na tabela 1.

Tabela 1 - Estimativa de temperatura do ar, em relação à altitude, utilizando a Razão Adiabática Seca (RAS) de 0,65° C a cada 100 m.

Nível	Cota Altimétrica (m)	Temperatura do Ar (°C)		
		Temp. Média Comp.	Temp. Média Máx.	Temp. Média Mín.
1	500	18,9	26,1	13,1
2	600	18,3	25,5	13,7
3	6,8	18,1	25,3	14,4
4	700	17,9	25,9	15
5	800	17,2	26,5	15,7
6	900	16,6	27,1	16,3
7	1000	15,9	27,6	17
8	1056	15,6	28,2	17,6

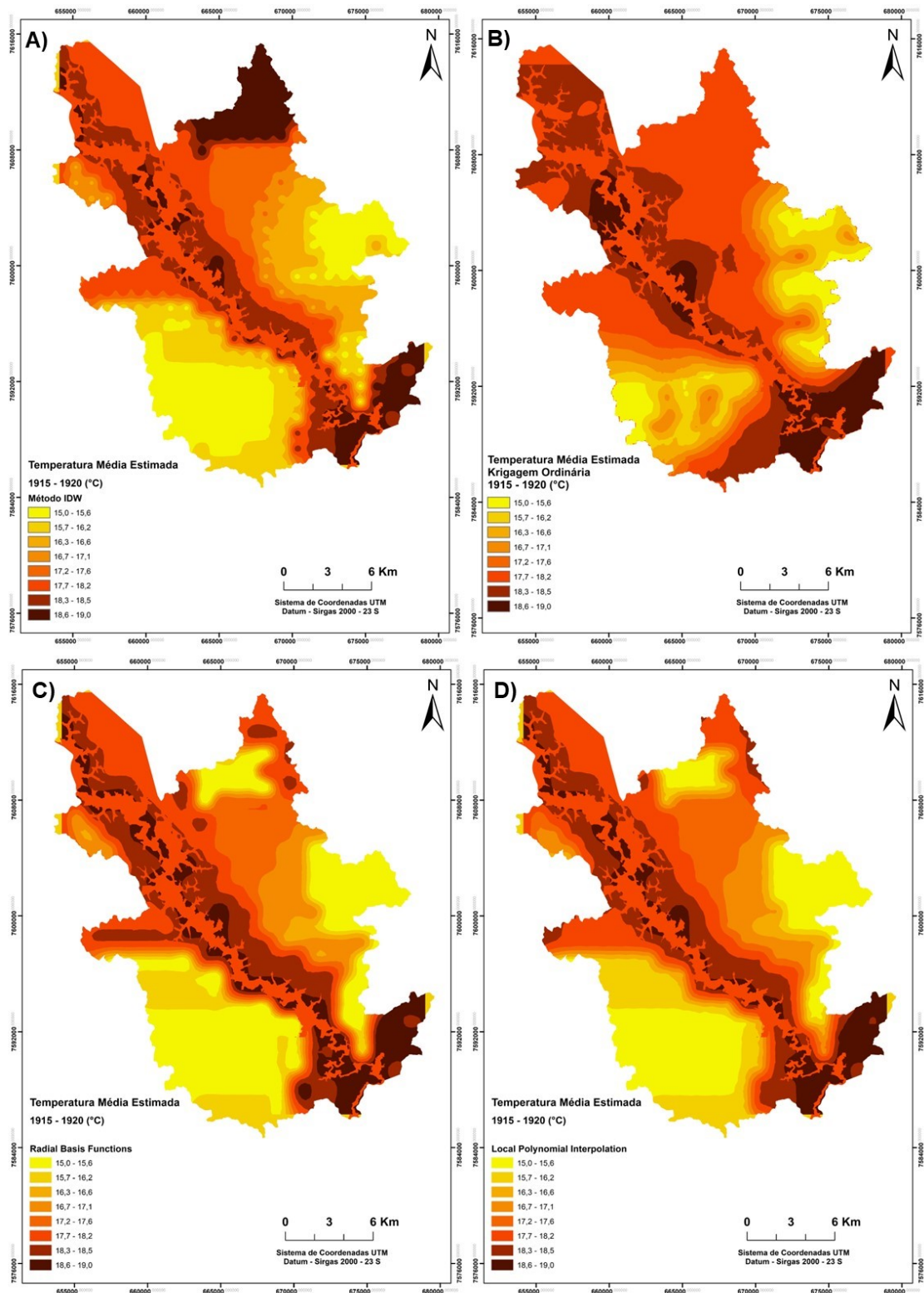
Fonte: Adaptado de Assis (2010).

A interpolação, por ser uma técnica capaz de estimar valores entre pontos conhecidos, possui as suas limitações. Existem diferentes métodos de interpolação, e a escolha do interpolador pode afetar os resultados, alguns métodos podem ser mais adequados, ou não, para certos tipos de variáveis ou comportamentos de função. Sendo assim, foram testados quatro tipos de interpoladores para a variável temperatura média compensada. Fig.18.

O IDW (*Inverse Distance Weigthing*), conforme é explicado pela ESRI (2023) inferi que os elementos que estão próximos entre si são mais parecidos do que com os que estão mais afastados.

Dessa forma, para estimar um valor para qualquer localização sem medição, o IDW usa os valores medidos que rodeiam a localização da previsão.

Figura 18 – Interpoladores testados para a estimativa de temperatura média do ar nas Zonas Climáticas Naturais em Juiz de Fora -MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

Sendo que os valores medidos mais próximos da localização da previsão têm mais influência no valor previsto do que aqueles que estão mais afastados.

Como pode ser visualizar na figura 18 A, o interpolador tem como característica a geração de círculos concêntricos ao redor dos pontos que contém as informações de temperatura, podendo superestimar regiões que apresentam maior quantidade de dados.

O RBF (*Radial Basis Functions*), de acordo com a definição da ESRI(2023), são interpoladores determinísticos baseados em uma função cujo valor depende da distância radial em relação a um ponto central, sendo mais flexíveis que o IDW. No entanto, não há avaliação de erros de previsão. O método fornece superfícies de predição comparáveis à forma exata da krigagem. As funções de base radial não permitem investigar a autocorrelação dos dados, tornando-a menos flexível e mais automático que a krigagem. Na figura 18 C, é possível visualizar que o interpolador não apresenta superfície de transição entre os topoclimas.

O GPI (*Global Polynomial*) é definido pela ESRI (2023) como um interpolador determinístico rápido e suave, em que são necessárias poucas decisões a serem tomadas em relação aos parâmetros do modelo. É mais adequado para superfícies que mudam lenta e gradualmente. No entanto, não há avaliação dos erros de previsão e pode ser muito suave. Na figura 18 D, é possível verificar que o método apresenta limitações nos locais de borda dos dados, podendo ter um grande efeito na superfície.

A Krigagem Ordinária, que segundo a definição da ESRI (2023), estima a distribuição dos valores de cada célula fornecida pelo modelo de variograma. O variograma é uma função que expressa a variabilidade espacial dos dados, fornecendo informações sobre como a semivariância entre pontos varia conforme a distância entre eles.

Nesse sentido, Yamamoto e Landim (2013) explicam que, com base no variograma, a krigagem modela a distribuição espacial dos dados, não apenas considerando a média, mas também levando em consideração a variabilidade espacial. O método estima os valores em locais não amostrados ponderando as

informações dos pontos amostrados de acordo com a estrutura de dependência espacial.

Dessa forma, o tipo de interpolação que se mostrou mais adequado para a aproximação com as Zonas Climáticas Naturais foi a Krigagem Ordinária, pois, além de representar os topoclimas em Juiz de Fora, apresentou as transições altimétricas de maneira gradual e suavizada.

Após a geração do Mapa de Estimativa de Temperatura do Ar através de Krigagem Ordinária, o mapa foi reclassificado na sequência, junto com os rasters de altimetria, declividade, morfologia, orientação das vertentes, com o auxílio da ferramenta *Reclassify*, disponível no menu *Spatial Analyst Tools*. Os intervalos de reclassificação foram definidos com base em gradientes naturais previamente identificados no município, visando preservar a variabilidade interna e garantir maior representatividade das classes resultantes.

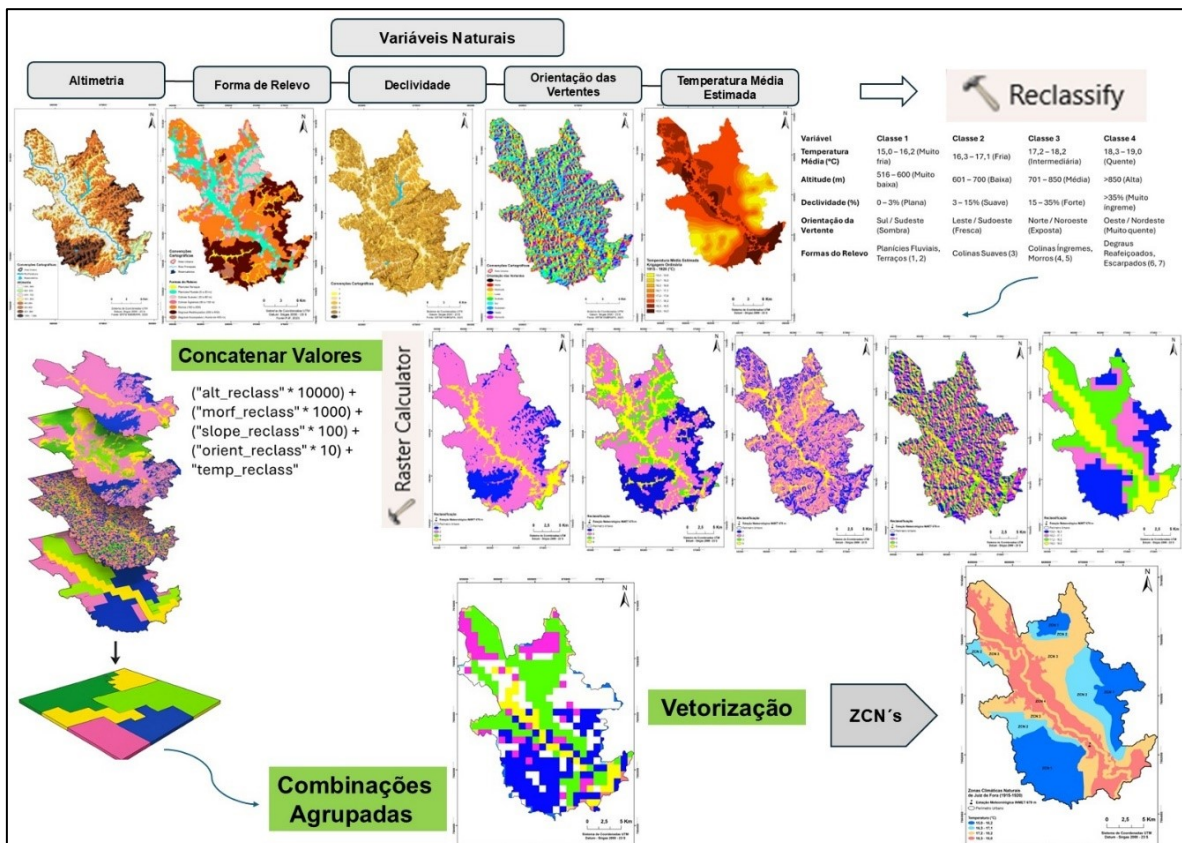
As classes foram padronizadas em uma escala ordinal de 1 a 4, representando, respectivamente, condições menos a mais favoráveis ao aquecimento atmosférico (Figura 19). Após a reclassificação, os cinco rasters foram integrados em uma única matriz de decisão espacial por meio da ferramenta *Raster Calculator*, utilizando uma expressão baseada em Álgebra de Mapas. A expressão foi construída de forma a garantir a individualidade posicional de cada variável, atribuindo-lhes pesos multiplicativos fixos que possibilitassem a geração de um valor final único para cada combinação. Assim, cada célula do raster resultante, denominado assinatura climática, representou uma combinação exclusiva entre as classes das cinco variáveis reclassificadas.

Posteriormente, aplicou-se a ferramenta *Combine*, também localizada em *Spatial Analyst Tools*, com o objetivo de identificar todas as combinações únicas e gerar uma tabela relacional contendo os respectivos códigos e frequências de ocorrência. Essa etapa permitiu a análise qualitativa e quantitativa dos padrões térmico-topográficos presentes no município.

As combinações resultantes foram, então, agrupadas em quatro Zonas Climáticas Naturais (ZCN), de acordo com semelhanças morfoclimáticas observadas, prevalência altimétrica e padrões térmicos médios estimados. A atribuição das zonas foi realizada de forma interpretativa, a partir da análise da tabela do Combine e da espacialização das classes no raster resultante.

Por fim, com o campo “ZCN” atribuído à tabela de atributos, utilizou-se a ferramenta *Lookup* para incorporar a classificação climática ao raster. O produto final foi vetorizado para fins de apresentação cartográfica e interpretação espacial, originando o Mapa das Zonas Climáticas Naturais de Juiz de Fora, no qual se destacam quatro zonas principais.

Figura 19 – Organograma dos procedimentos realizados para elaboração das Zonas Climáticas Naturais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além do fator altimetria, declividade, morfologia, orientação das vertentes a hidrografia foi levada em consideração para o mapeamento das zonas climáticas

naturais. A proximidade com os cursos d'água, sobretudo ao longo da presença do Rio Paraibuna deve ser considerada, pois a calha do rio tem a capacidade de canalizar e gerar um corredor de ventos, agindo como um atenuador da temperatura. Tal fato já foi identificado na área central de Juiz de Fora nas pesquisas de Assis e Ferreira (2018).

Wong et al (2012) identificou a influência de corpos d'água na capacidade de atenuação da temperatura do ar em ambientes quentes e úmidos. A pesquisa apontou a extensão da capacidade de resfriamento no microclima da área circundante ao longo de uma hidrovia em Cingapura, onde a cada 30 m de distância do rio, foi identificado 0,1 °C de diminuição na temperatura do ar.

Assis (2022), com o objetivo de estimar a temperatura do ar em áreas de planícies fluviais e terraços, calculou a amplitude térmica entre pontos de monitoramento instalados nas proximidades de uma mata ciliar e de uma área de pastagem. A partir da diferença de temperatura e da distância entre os pontos, a autora determinou fatores de arrefecimento aplicáveis às áreas próximas aos cursos d'água. Os valores obtidos foram calculados para diferentes meses representativos de distintos tipos de tempo, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de arrefecimento aplicado nas proximidades de corpos hídricos

<b>Mês/Ano</b>	<b>Fator de Ajuste (°C/m)</b>
Ago/19	0,6
Out/20	0,5
Jan/20	0,2
Mai/20	0,4

Fonte: Assis (2022)

Embora o mapeamento das Zonas Climáticas Naturais corresponda ao período histórico de 1915 a 1920, os fatores de arrefecimento propostos por Assis (2022) foram aplicados com o intuito de estimar, de forma aproximada, a influência que os corpos d'água exercem sobre a temperatura do ar nessas áreas. Apesar da defasagem temporal entre os dados, a média dos valores de arrefecimento identificados por Assis (2022), foi adotada como referência, considerando-se a

permanência de determinadas características ambientais ao longo do tempo. Essa abordagem buscou representar, mesmo que de forma estimada, o efeito atenuador da vegetação ripária e dos cursos d'água no contexto climático das ZCNs.

### 3.5 Elaboração dos mapas das Zonas Climáticas Locais de Juiz de Fora

O mapeamento das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) da área urbana de Juiz de Fora teve, em um primeiro momento, o objetivo de compartimentar a paisagem urbana com base nos diferentes tipos de cobertura da terra, nos materiais empregados nas construções, na altura das edificações e no fator de visão do céu (*sky view factor*). Essa abordagem se justifica devido à considerável heterogeneidade de tipologias urbanas presentes na cidade, as quais apresentam características térmicas distintas.

Dessa forma, foram testados dois métodos distintos para o mapeamento das ZCLs. O primeiro consistiu na aplicação do método *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT), enquanto o segundo envolveu a sobreposição e vetorização de camadas de dados referentes ao uso da terra, altura das edificações, massa construída e evolução da urbanização.

#### 3.5.1 Zonas Climáticas Locais a partir do Método de Classificação “*World Urban Database*” (WUDAPT)

O método WUDAPT foi desenvolvido em 2015 como parte de um projeto comunitário voltado à padronização da classificação de Zonas Climáticas Locais (ZCLs) em ambientes urbanos, com o objetivo de suprir a carência de dados urbanos consistentes e comparáveis, especialmente em regiões onde não há infraestrutura técnica ou dados urbanos detalhados disponíveis. O aplicativo da web<sup>4</sup> consiste em uma classificação supervisionada, realizada por meio do software *Google Earth*, no qual são traçados polígonos representando amostras homogêneas. Essas amostras servem como base para a padronização e identificação das diferentes ZCLs.

Uma das principais vantagens do método é a agilidade na obtenção de informações sobre as distintas tipologias urbanas. Após a geração das amostras em

---

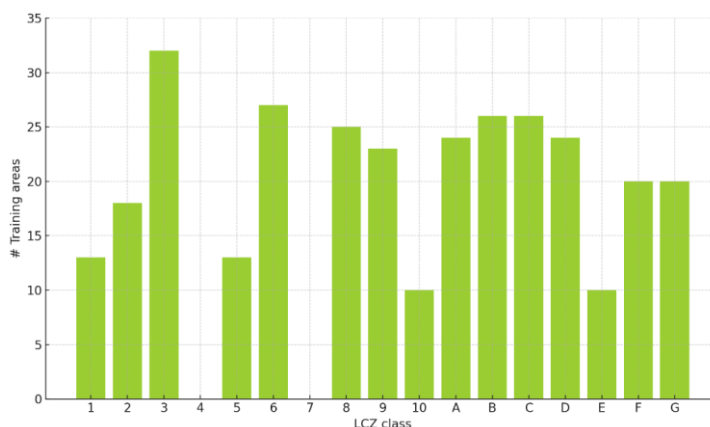
<sup>4</sup> Disponível em <https://lcz-generator.rub.de>

formato .kml, realiza-se o upload no site da plataforma WUDAPT, onde os dados passam por um classificador baseado no método de máxima verossimilhança, em conjunto com imagens dos satélites Landsat 8 e Sentinel-2.

Segundo Fitz (2008), o método de máxima verossimilhança utiliza a média e a matriz de covariância dos pixels amostrados para calcular a probabilidade de um pixel externo pertencer a determinada classe. Dessa forma, o processo depende fortemente da seleção de áreas representativas de feições conhecidas, o que destaca a importância da escolha criteriosa das amostras.

No gráfico abaixo, observa-se o número de amostras de treinamento para cada tipo de uso e cobertura da terra empregado na geração das ZCLs. Nota-se que o número 4 e o 7, correspondente à ZCL 4 e ZCL 7, respectivamente segundo a classificação de Stewart (2011), não apresentou amostras de treinamento, não sendo, portanto, identificada no município de Juiz de Fora (Fig. 19).

Figura 20 - Gráfico com o número de amostras de treinamentos para geração das ZCLs.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.5.2 Zonas Climáticas Locais a partir do Método de Sobreposição de Camadas e Vetorização

Para a geração das ZCLs, seguindo a classificação da paisagem urbana proposta por Stewart (2011), foi utilizada uma base integrada de dados vetoriais de alta resolução (1:2000) referentes ao uso e ocupação da terra, à evolução da mancha urbana e a dados geocodificados.

Essa base contempla informações detalhadas sobre os loteamentos aprovados pela Prefeitura de Juiz de Fora, incluindo número de pavimentos das edificações, materiais utilizados nas coberturas, dimensão dos lotes e classificação do uso da terra em três categorias principais: residencial, comercial e industrial. Parte dessa base já foi utilizada na dissertação de Pimentel (2017), em que foi possível o cálculo da altura e albedo das edificações, além da massa construída relativa e absoluta (Fig.20).

A categorização dos usos da terra seguiu os critérios estabelecidos por Stewart (2011) e adotados amplamente em estudos recentes de mapeamento ZCL com alta acurácia (Wang *et al.*, 2023). O uso residencial abrange áreas com habitações unifamiliares e multifamiliares, desde edificações térreas até conjuntos verticais, com diferentes densidades e níveis de impermeabilização. No mapeamento, esse uso corresponde às zonas ZCL 2 (Compacta de Média Elevação), ZCL 3 (Compacta de Baixa Elevação), ZCL 5 (Aberta de Média Elevação), ZCL 6 (Aberta de Baixa Elevação) e ZCL 9 (Escassamente Construído), cobrindo aproximadamente 34% do perímetro urbano.

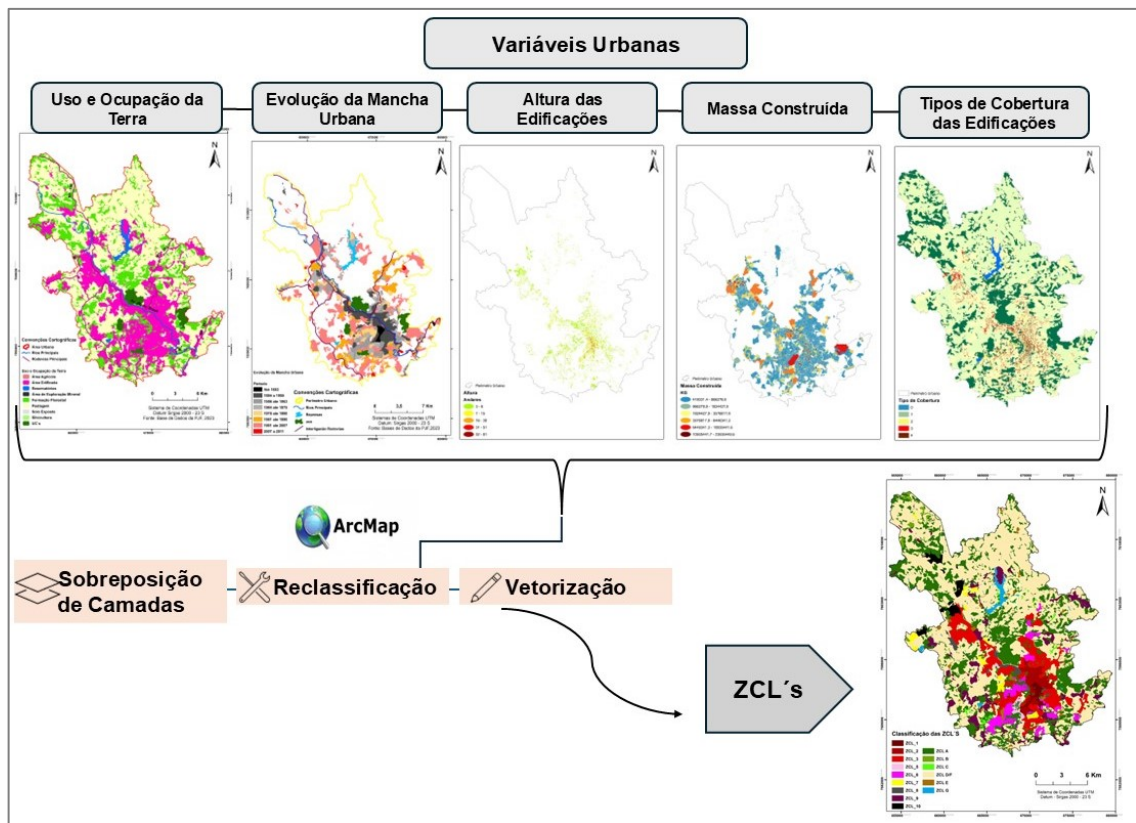
O uso comercial, por sua vez, corresponde às zonas voltadas ao comércio e serviços, com predominância nas áreas centrais e nos principais eixos estruturadores da cidade. Essas áreas foram atribuídas às ZCL 1 (Compacta de Alta Elevação), com 0,8% da área total, além das zonas ZCL 5, e 8 (Grandes Construções de Baixa Elevação), esta última associada a centros logísticos e equipamentos urbanos de maior porte.

As atividades industriais foram representadas nas zonas ZCL 8 e ZCL 10 (Indústria), cobrindo cerca de 2,8% do território urbano. Essa segmentação detalhada do uso da terra permite maior refinamento na caracterização morfológica das ZCLs, conforme sugerido por estudos que destacam a importância da acurácia temática e estrutural no mapeamento urbano (Zhai *et al.*, 2021).

Além das zonas construídas, o mapeamento contemplou as ZCLs (A a G), representando diferentes tipos de cobertura da terra, como vegetação densa, superfícies descobertas e corpos d'água. Dentre essas, destaca-se a ZCL A e B, que cobre aproximadamente 22% do perímetro urbano e inclui remanescentes da Mata

Atlântica. A inclusão dessas zonas é relevante para avaliar os contrastes térmicos entre áreas naturais e urbanizadas (Zhang *et al.*, 2022).

Figura 21 – Organograma do mapeamento das Zonas Climáticas Locais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Primeiramente foi utilizado o mapeamento do Uso e Ocupação da Terra para o município de Juiz de Fora, também disponibilizado pela PJJ. Através da ferramenta *clip*, foram recortadas as informações de uso e cobertura da terra inseridas no perímetro urbano. Na sequência, foram exportados os *shapefiles* das unidades de conservação (Uc's) e formação florestal, em um segundo passo, os *shapefiles* foram unidos, gerando a ZCL A.

Para a ZCL B foram consideradas as áreas de silvicultura (pinus e eucalipto) e os fragmentos de vegetação arbórea esparsas inseridos na área urbana, como pequenos parques e arborizações encontradas em museus, jardins e propriedades particulares.

Para a geração da ZCL C, foram consideradas todas as áreas de agricultura urbana, encontradas principalmente nos bairros periurbanos, com baixo adensamento como Grama, Graminha, Vivendas da Serra, Filgueiras, Linhares e Barreira do Triunfo, onde as horticulturas e fruticulturas fazem parte da paisagem, foram identificadas com o auxílio das imagens do *Google Earth* e do *Word Imagery Basemap* presente no *Arc Gis*, com a data de 14/04/2024.

A ZCL D, segundo a classificação de Stewart (2011) corresponde à paisagem inexpressiva, sem vegetação arbórea, com presença de gramas, pastagem ou agricultura. Essa ZCL foi agrupada com a ZCL F, que segundo a descrição Stewart (2011), também pode ser classificada como paisagem inexpressiva, com presença ou não de vegetação e solo exposto. Para facilitar a o mapeamento a ZCLD/F, foi gerada a partir do *shapefile* de pastagem presente no Mapa de Uso e Cobertura da Terra. Uma vez que essa categoria abrange toda a descrição atribuída às duas ZCLs.

A ZCL F foi gerada a partir das áreas que foram classificadas no Mapa de Uso e Ocupação como solo exposto e que foram impermeabilizadas, como grandes estacionamentos e pátios descobertos, pista de pouso, áreas de mineração, e foram identificadas com a ajuda das imagens do *Google Earth* e do *Word Imagery Basemap* presente no *Arc Gis*.

Para a geração das ZCLs G, foram exportados e unidos os *shapefiles* dos reservatórios, lagos, lagoas e represas que estavam inseridos dentro do perímetro urbano.

Por último, foi exportado o *shapefile* de área urbana, que levou em consideração todas as áreas construídas, independente das características. Na sequência o *shapefile* de área urbana foi sendo compartimentado de acordo com as características da proposta de Stewart (2011) e adaptado para a realidade de Juiz de Fora. Nessa etapa, foi fundamental a utilização da camada de altura das edificações, em que foram selecionadas as edificações que possuíam 10 andares ou mais, para serem classificadas como ZCL1, e edificações de 3 a 9 andares, para serem classificadas como ZCL 2.

Para a geração da ZCL 3, além das informações de altura das edificações, foram utilizadas as informações de cobertura das edificações, e nas quadras em que havia predomínio de telhas metálicas e maior adensamento, foram sendo classificadas como construções compactas de baixa elevação.

A ZCL 4, aberta de alta elevação, nos moldes da proposta de Stewart (2011), não foi encontrada para a realidade urbana de Juiz de Fora, já que a cidade possui edificações com dezenas de andares, porém não são encontradas em ambientes com solos permeáveis e tampouco em meio à abundância de cobertura vegetal.

A ZCL 5, aberta de média elevação, foi encontrada com a seleção da camada de altura das edificações entre 3 e 9 andares, próximas a áreas de cobertura vegetal significativa, como é o caso do campus da Universidade Federal de Juiz de Fora e de alguns bairros de classe média alta, como o Bom Pastor.

Para a geração da ZCL 6, foram selecionados os loteamentos classificados como condomínios de casas baixas de classe média a alta, que são bastante comuns nos bairros São Pedro, Aeroporto, Morro do Imperador, Quinta das Avenidas e arredores.

A ZCL 7 foi gerada através da camada de loteamento dos condomínios populares pertencentes a base de dados da PJF, desde os mais recentes, como Minha Casa Minha Vida, até os conjuntos habitacionais mais antigos.

A ZCL 8 foi gerada a partir da seleção da camada de lotes de grande extensão e com cobertura metálica, representados por tipos de uso como galpões de armazenamento, estacionamentos, shopping centers, hipermercados, concessionárias, bastante presentes nos Bairros Salvaterra, Fábrica, Poço Rico, e Benfica.

A ZCL 9, conforme descrição de Stewart (2011), é representada por áreas de uso residencial, geralmente de transição entre a cidade e o campo, com edificações esparsadas, e com presença de vegetação. Diante dessas características, foi utilizado o mapeamento de evolução da mancha urbana de Juiz de Fora, principalmente os novos empreendimentos registrados na PJF, a partir de 2007, onde são retratados os

novos “granjeamentos”, condomínios e loteamentos ainda em processo de consolidação, sobretudo nas áreas periurbanas.

A ZCL 10, descrita por Stewart (2011) como “indústria pesada”, comportando grandes instalações industriais emissoras de quantidades significativas de poluentes atmosféricos não é tão comum em Juiz de Fora. No entanto, o Bairro Industrial localizado na Zona Norte da cidade, possui diversas instalações de grande porte, de emitância térmica como aço e metal, além das siderúrgicas Arcelor Mittal e Votorantim Metais. Dessa forma, foram identificadas através do cruzamento entre as das camadas de lotes de uso industrial e de coberturas metálicas.

### 3.6 Mapeamento e Modelagem da Temperatura do Ar por Tipos de Tempos

A espacialização da temperatura do ar foi realizada por meio do modelo proposto na Tese de Assis (2022), executado no software Dinamica EGO v8. Trata-se de um modelo de alta replicabilidade, que estima a temperatura do ar com base em dados observacionais coletados em campo, integrando variáveis de uso e cobertura da terra, altitude e presença de corpos hídricos.

A substituição do mapa original de uso da terra pelo mapeamento das ZCLs representa um avanço metodológico relevante, ao permitir a incorporação direta de elementos morfológicos urbanos na modelagem térmica. Essa abordagem coaduna com a tendência recente de aprimorar a representação física das ZCLs na modelagem urbana (Du *et al.*, 2024; Fernandes *et al.*, 2023).

Os dados de temperatura obtidos nos pontos de monitoramento foram projetados para as demais áreas com o mesmo tipo de classificação. Posteriormente, os valores estimados foram ajustados com base na influência de corpos hídricos e da altitude, incorporando suas funções térmicas como fatores de arrefecimento.

O efeito dos corpos hídricos sobre a regulação térmica urbana fundamenta-se na definição de Oke (1978), segundo a qual a presença de água favorece a liberação de calor latente em detrimento do fluxo de calor sensível. Esse processo resulta em resfriamento imediato nas áreas adjacentes, explicado pelo elevado calor específico

da água, que atua como moderador das temperaturas extremas ao armazenar e liberar energia de forma mais lenta (Romero, 1998).

Evidências empíricas corroboraram esse papel atenuador. Wong et al. (2012), por exemplo, identificaram uma redução média de 0,1 °C na temperatura do ar a cada 30 metros de proximidade em relação a uma hidrovia no distrito de Kallang, em Cingapura.

De forma semelhante, Murakawa (1991) verificou diferenças térmicas de 3 a 5 °C entre áreas próximas a um rio e zonas densamente urbanizadas em Hiroshima, Japão. Tais resultados reforçam o papel dos corpos d'água como elementos estruturantes da regulação térmica urbana, contribuindo diretamente para o conforto térmico e a melhoria da qualidade ambiental.

Para a aplicação do fator de resfriamento hídrico neste estudo, utilizou-se a base de hidrografia adaptada por Assis (2022), que integrou dados da FBDS (2013), abrangendo rios simples, duplos e massas d'água, à classe "corpo d'água" do mapa de uso e cobertura do MapBiomias (coleção 5, 2019), com posterior retificação dos trechos canalizados.

Essa integração mostrou-se necessária em razão da complementaridade entre as fontes: enquanto a FBDS oferece maior detalhamento espacial, o MapBiomias disponibiliza uma classificação temática consolidada e padronizada.

Para excluir os cursos d'água canalizados, que não exercem influência térmica significativa, realizou-se uma varredura normativa por meio da plataforma JFLegis. A busca utilizou palavras-chave como "canalização", "drenagem urbana" e "obras hídricas", resultando em 15 normas municipais.

Dessas, sete trechos puderam ser validados espacialmente com base em imagens de satélite do *Google Earth* e na base toponímica oficial de rios e córregos. Foram retificados: Córrego Independência, Ribeirão Yung, Córrego Young, Córrego Tapera, Córrego Santa Luzia, Córrego Matirumbide e Córrego São Pedro.

O cálculo do fator de resfriamento hídrico utilizou a função *Calc Distance to Feature Map* no Dinamica EGO. A aplicação do fator foi proporcional à distância entre cada célula e os cursos d'água, restrita às áreas de planícies fluviais e terraços, conforme a abordagem de Assis (2022).

Para áreas externas, foram delimitados buffers de 35 metros para rios simples e 70 metros para rios duplos, evitando a superestimação dos efeitos de resfriamento. A escolha dessas distâncias baseou-se na literatura (Wong *et al*, 2012), e guarda paralelismo com as faixas de Áreas de Preservação Permanente (APPs) do Código Florestal Brasileiro, que estipulam zonas de proteção ripária com base em critérios ecológicos e hidrológicos.

Ao contrário do fator altimétrico, cuja influência térmica é bem documentada por gradientes adiabáticos, os efeitos térmicos da hidrografia ainda carecem de quantificação precisa.

Estudos como Wong *et al* (2012) e Assis (2022) apontam que o efeito de resfriamento hídrico pode variar de 0,2 °C a 0,6 °C a cada 100 metros, dependendo de fatores como tipo de tempo predominante, morfologia fluvial e presença de vegetação ripária.

Essa variabilidade evidencia a necessidade de mais pesquisas empíricas, especialmente em contextos tropicais de relevo acidentado. Já a altitude foi incorporada ao modelo com base na relação adiabática entre elevação e temperatura do ar.

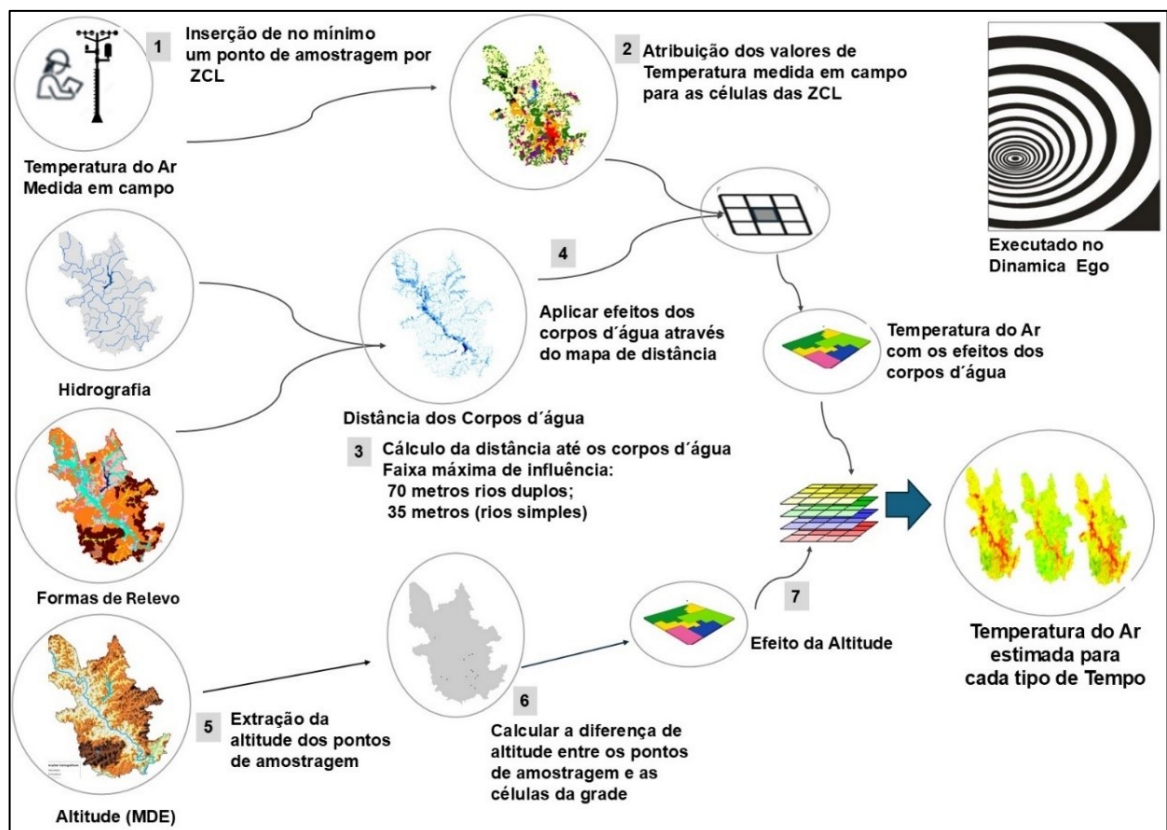
Considerar esta variação térmica é essencial para a modelagem climática, especialmente em regiões com relevo acidentado, onde a altitude pode influenciar significativamente os padrões de temperatura. Adotou-se uma razão média de 0,65 °C a cada 100 metros de variação altimétrica, com base em Ometto (1981).

Sendo assim, o modelo calcula a amplitude altimétrica entre a célula do ponto monitorado em campo e a célula onde a temperatura está sendo estimada. A etapa final do modelo consistiu na validação estatística por meio do método *Leave-One-Out*

*Cross-Validation* (LOOCV), que consiste na remoção iterativa de cada ponto amostral e comparação entre valores observados e estimados.

Os resultados indicaram forte correlação ( $r > 0,9$ ), comprovando a robustez do modelo e sua capacidade de generalização em contextos com ausência de dados amostrais.

Figura 22– Organograma do Modelo de Espacialização da Temperatura do Ar.



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4 A GEOGRAFIA DE JUIZ DE FORA

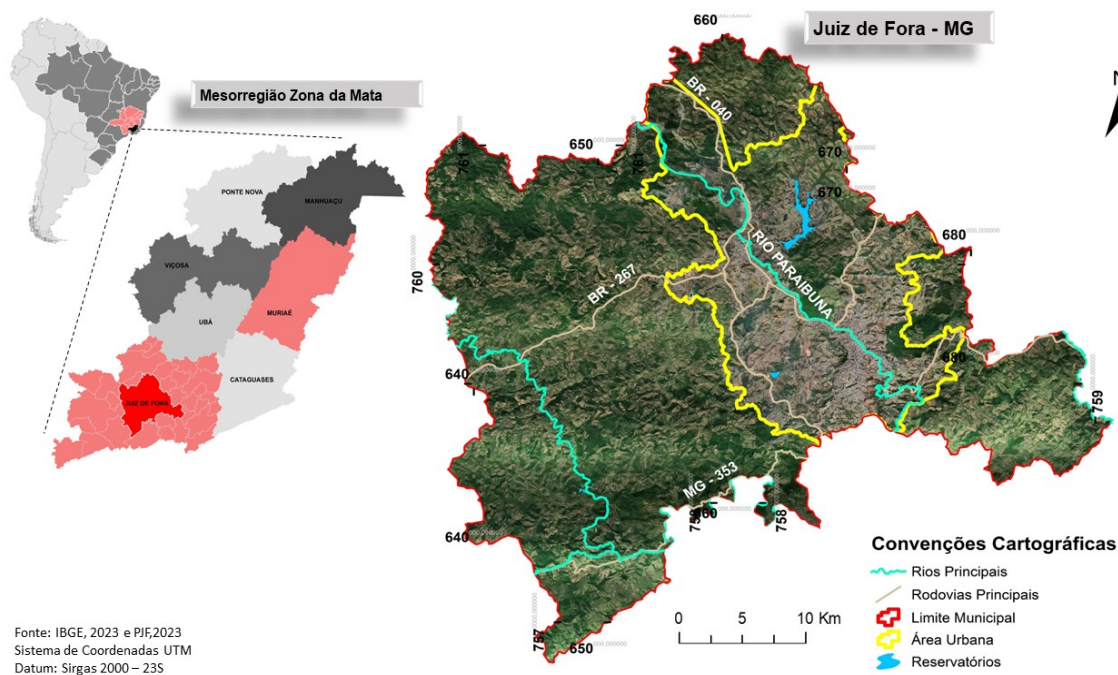
O município de Juiz de Fora está localizado na microrregião de mesmo nome e na mesorregião da Zona da Mata Mineira, com uma área total de 1.435,7 km<sup>2</sup>, sendo o maior município em extensão e população de toda a Zona da Mata. Fig. 23. Juiz de Fora está localizada relativamente próxima de importantes regiões metropolitanas como São Paulo (506 km), Rio de Janeiro (184 km) e Belo Horizonte (272 Km).

O município é transpassado por duas importantes rodovias federais, a BR 040 (que liga o Rio de Janeiro a Brasília) e a BR 267 (que liga Juiz de Fora ao Sul de Minas e demais municípios da microrregião), o que torna sua expressão além da dimensão territorial, exercendo uma destacada centralidade na mesorregião.

A área territorial municipal está dividida em quatro distritos que abrangem uma extensão de 725,975 Km<sup>2</sup>: Juiz de Fora (sede), Torreões, Rosário de Minas e Sarandira. O município possui a 4<sup>o</sup> maior população de Minas Gerais, com 540.756 habitantes, ficando atrás somente de Belo Horizonte, Uberlândia e Contagem (IBGE, 2022).

Assim como a maior parte da realidade do sudeste brasileiro, Juiz de Fora vai se apresentar eminentemente urbanizada, pois 98,9% do total da população é residente na área urbana, e apenas 1,1 %, na área rural.

Figura 23 – Mapa da localização do Município de Juiz de Fora – MG



Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.1 Breve histórico de ocupação

O histórico de ocupação do município de Juiz de Fora se entrelaça com o próprio histórico de ocupação da Zona da Mata Mineira. Inicialmente denominado de Santo Antônio do Paraibuna, o povoado foi elevado à categoria de vila em 1850, se emancipando de Barbacena e passando a se chamar Vila de Santo Antônio do Juiz de Fora. Em 2 de maio de 1856, através da Lei de nº 759, a vila é elevada à categoria de cidade, sendo aprovado o projeto na Câmara Provincial (BARBOSA, 2013). Em 1865, o artigo 13 da Lei nº 1.262, de 19 de dezembro, faz com que o município tenha o seu nome modificado para Juiz de Fora.

Do ponto de vista econômico, a formação da mesorregião da Zona da Mata esteve ancorada em dois aspectos fundamentais: os ciclos de crescimento e a decadência econômica que pautaram a história e a própria infraestrutura logística herdada desses ciclos. (MARQUES NETO *et al.*, 2022; CASTRO *et al.* 2012, DE PAULA, 2006).

Já do ponto de vista geográfico, conforme é explicado por Carneiro e Matos (2010), a Zona da Mata enquanto borda de uma região de mineração teve como principal atribuição se tornar rota obrigatória de passagem de expedições de frentes pioneiras.

Nesse contexto histórico, a preocupação era a redução do tempo de viagem entre o litoral do Rio de Janeiro, então capital imperial, e a capital das Minas Gerais, Vila Rica (atual Ouro Preto). Assim, em 1701, um decreto da Coroa Portuguesa, encarregou a abertura de um novo caminho ao bandeirante Garcia Rodrigues Paes, que vivia como sesmeiro às margens do Paraibuna (ANDRADE, 2008).

Dessa forma, o chamado Caminho Novo, construído entre 1701 e 1703, se transforma na principal via de acesso do litoral colonial até região mineradora. O Caminho Novo, aberto à margem esquerda do Rio Paraibuna, inaugura as primeiras ocupações destinadas a atender as demandas dos viajantes como casebres e pousadas, além disso, sesmarias vão sendo concedidas aos bandeirantes que se empenharam na abertura da nova rota.

A partir da decadência da atividade mineradora, de acordo com os escritos de Castro *et al.* (2012), a economia cafeeira chega à região do Paraibuna em 1809.

Marques Neto *et al* (2022) discorre que a maioria das propriedades cafeeicultoras que aí se instalaram, tinham como pressuposto, um modelo de exploração extensiva pouco compatível com o relevo e os solos da região. Ou seja, o plantio era feito a partir da derrubada e da queimada da Mata Atlântica. Os solos pobres quimicamente mantiveram a produção durante os anos iniciais, apresentando queda na produtividade no que se refere ao médio prazo. Tal fato fez com que a cafeeicultura fosse substituída gradativamente pela criação extensiva de gado.

Como todo ciclo econômico possui um início e um fim, com a produção de café nas serranias da Zona da Mata não foi diferente. Após quase 100 anos de produção cafeeira e acumulação de capitais, Juiz de Fora se torna a primeira cidade mineira a passar pelo processo de industrialização.

A partir dos lucros obtidos com a cafeicultura e da necessidade de infraestrutura para escoar a produção até o porto do Rio de Janeiro, foi inaugurada, em 1861, a rodovia União e Indústria e contou com a presença de Dom Pedro II. A inauguração da nova rodovia fez com que a cidade passasse a exercer centralidade regional e ter maior relevância perante a corte, uma vez que a viagem que durava 15 dias passou para 12 horas (GENOVEZ, 1998).

Barbosa (2016), em seus estudos sobre a abordagem geográfica do processo urbano de Juiz de Fora, discorre que a inversão de capitais do setor primário para o secundário, fez com que o município se tornasse uma referência no que diz respeito à produção industrial em todo o estado de Minas Gerais, sobretudo no setor têxtil, a ponto de fazer Juiz de Fora merecer a alcunha de Manchester Mineira.

Em 1889, é inaugurada, no Rio Paraibuna e às margens da Estrada União e Indústria, a primeira usina hidrelétrica da América Latina, a Usina de Marmelos. O empreendimento tinha o objetivo de fornecer energia para a produção têxtil, além de servir à iluminação pública e privada (FREITAS FILHO *et al.*, 2019).

Machado *et al.* (2016) enfatizam que entre os anos de 1889 e as primeiras décadas do séc. XX, Juiz de Fora se destacava como uma cidade com elevado grau de prosperidade, o que contribuiu para que se transformasse em um centro atrativo aos movimentos migratórios, fazendo com que sua população aumentasse significativamente.

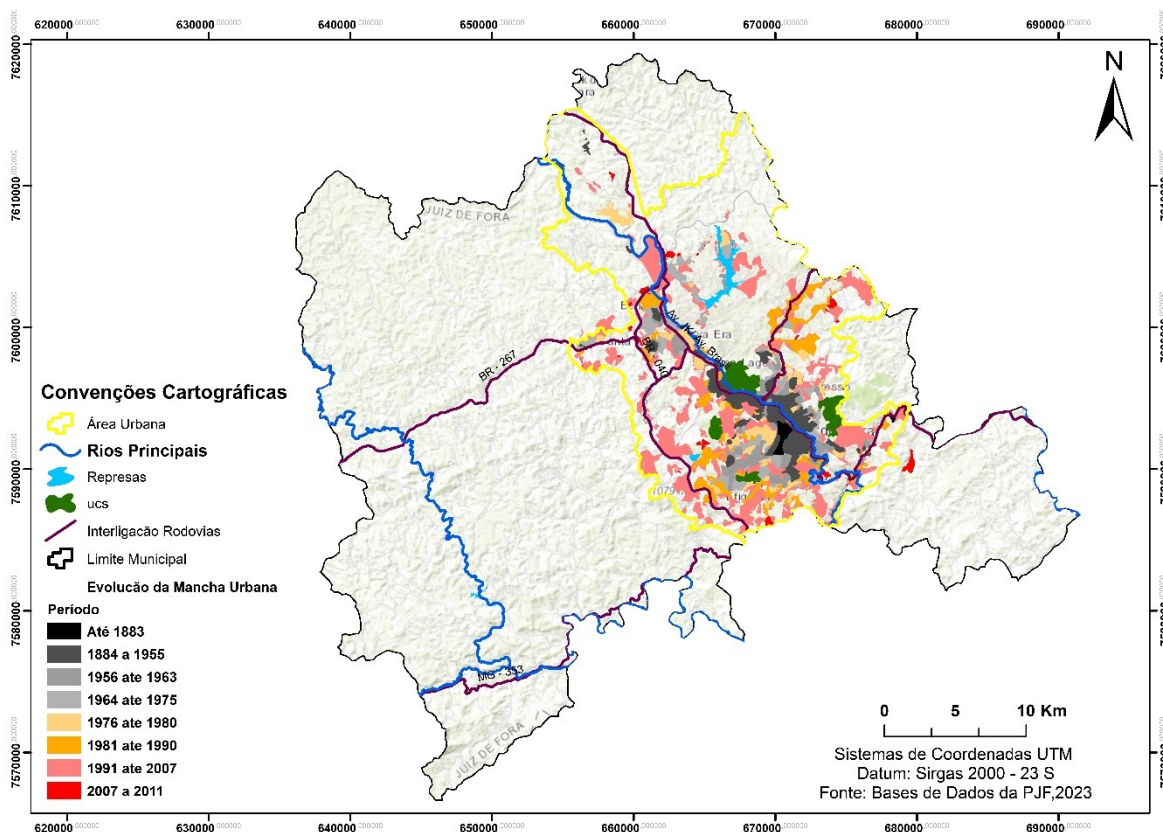
Menezes e Santos (2022) explicam que o processo, facilitado sobretudo pela proximidade ao Rio de Janeiro, significou poder político e investimentos facilitando a intensa urbanização e modernização urbanística da cidade.

A grande centralidade regional exercida por Juiz de Fora não se restringirá apenas na mesorregião da Zona da Mata. Ela se estenderá pelo Sul de Minas, Campos das Vertentes e ainda para além do estado de Minas Gerais, sobretudo a região centro Sul Fluminense e Serrana do Rio de Janeiro. A centralidade está associada a uma infraestrutura especializada na prestação de serviços educacionais e saúde.

#### 4.1.1 A evolução da mancha urbana de Juiz de Fora

A figura 24, ilustra a evolução da mancha urbana em Juiz de Fora de 1883 até 2011 e possibilita a visualização da intensidade da urbanização em diferentes momentos econômicos e históricos da cidade.

Figura 24– Mapa da Evolução da Mancha Urbana em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

Até 1883 a área urbana se resumia à área central de Juiz de Fora, assentada sobre a planície direita do Rio Paraibuna, delimitada pela Avenida Rio Branco, a atual Avenida Itamar Franco, e a avenida Getúlio Vargas, formando o chamado “triângulo central” e adjacências.

Entre 1884 e 1955, em um recorte temporal de 72 anos, a mancha urbana teve um aumento médio de 27 hectares/ano, refletindo a intensificação do processo de industrialização e urbanização, aliado ao intenso processo migratório que a cidade vivenciou.

Entre 1976 e 1990, conforme é explicado por Tasca (2010), ocorreu a ampliação do processo de verticalização da região urbana central e de seus entornos, em contraposição a um crescimento horizontalizado na periferia mais distante. Martins (1996), em seus estudos sobre ilhas de calor na área central, durante a década de 90, identificou áreas densamente ocupadas por edifícios de altura média de 30 metros, sem afastamento entre as construções. Atualmente encontram-se edificações variando de 34 a 60 metros de altura, demonstrando que a verticalização na área central continuou em expansão nos últimos anos.

Entre 1991 e 2010, é percebido um crescimento vertiginoso da mancha urbana, que pode ser atrelado aos grandes empreendimentos imobiliários e aos programas nacionais de habitação, já que, nesse período, diversos novos loteamentos populares foram sendo construídos nas áreas mais afastadas do centro. Por outro lado, na região do Acesso Sul, próximo ao Independência Shopping, Silva *et al.* (2011) apontam as alterações na tipologia da paisagem urbana a partir da implantação de diversos condomínios voltados para classe média alta, inclusive a criação de um novo bairro, o Estrela Sul.

Nos últimos anos, o eixo de crescimento urbano do município tem-se concentrado sobretudo ao longo da BR 040, onde tem sido frequente a incorporação de terras rurais ao perímetro urbano. Os estudos de Barros (2021) mostram que, principalmente entre 2007 e 2011, cerca de 925 mil metros quadrados foram convertidos em terra urbana em toda a cidade.

A intensidade do crescimento urbano no decorrer da BR 040, explica Barros (2021), se deve ao fato de que diversos empreendimentos vêm recebendo incentivos fiscais por parte da PJF. Isso parte desde instalação de condomínios de alto padrão, passando por centros de eventos e exposição e, atingindo até a consolidação de centros de distribuição e condomínios logísticos.

Nesse sentido, de acordo com os levantamentos de Rodrigues (2013), nos anos 2000, a população juizforana representava 68,76% do total da população da microrregião. Em termos absolutos, em 1991 o município possuía uma população de

387.523 mil habitantes, em 2010 esse número evoluiu para 517.872, e de acordo com o último censo em 2023, a população chegou em 540.756 habitantes (IBGE,2023).

#### 4.2 Os fatores estáticos em Juiz de Fora – MG

O município de Juiz de Fora se encontra inserido no domínio morfoclimático dos Mares de Morros (AB´SABER, 2003), destacando-se pela presença marcada da amplitude altimétrica na paisagem, que vai apresentar uma variação entre 470 e 1.085 metros (Fig.23 a).

Ab´Saber (2007, pg. 94), em suas andanças pela região, ressaltou as características marcantes e os obstáculos à ocupação do sítio urbano juizforano:

“O sítio urbano do município de Juiz de Fora ilustra bem o tipo geográfico de espaço urbano passível de ser encontrado em raros pontos do Planalto Atlântico. Quem demanda aquela cidade de Minas Gerais, vindo de sul ou de sudeste, percebe logo a grande dificuldade existente para a localização de núcleos no meio da morraria arredondada que caracteriza a Zona da Mata mineira. Bruscamente, entretanto, entra-se em contato com uma larga planície situada a montante de uma resistente soleira rochosa, que faz parte de um pequeno maciço residual a sudeste da cidade. Trata-se do único compartimento de relevo relativamente plano, que se pode encontrar, desde as raias de Minas Gerais com o estado do Rio de Janeiro, passível de asilar uma aglomeração urbana da importância de Juiz de Fora. Inegavelmente, trata-se de um pequeno quadro geográfico de exceção, no conjunto do relevo serrano regional.”

Entender como se distribui a morfologia urbana é necessário pois, conforme é explicado por Marques *et al.* (2017), planícies, encostas, colinas e morros denotam diferentes contextos de ocupação e urbanização. Além disso, variação altimétrica exerce forte influência sobre o clima urbano, resultando em condições microclimáticas distintas ao longo do dia.

Com base no mapeamento das formas de relevo, disponibilizado pela PJJF (2023), e elaborado por Eduardo (2018), pode-se verificar o predomínio na área urbana de formas de relevo classificadas como morros, os quais são representativos de um quadro de ocupação intensiva (Fig 25 b).

Conforme a tabela 3, os morros ocupam 37% das formas de relevos, possuindo desnivelamentos de 100 a 200 metros, topos convexos e retilíneos em vale encaixados.

As planícies fluviais ocupam aproximadamente 14,8%, e se alinham ao eixo de escoamento do rio Paraibuna, concentrando-se nas áreas de menor altimetria. Essas áreas, por apresentarem condições topográficas mais favoráveis, foram historicamente as primeiras a serem ocupadas, com poucas restrições naturais. Consequentemente, constituem o setor onde o processo de verticalização urbana é mais intenso. As planícies fluviais, associadas às colinas suaves, compõem o compartimento geomorfológico do Gráben do Rio Paraibuna, sobre o qual se assentou grande parte do núcleo urbano de Juiz de Fora (MARQUES NETO et al., 2017) (Fig. 26).

Os degraus reafeiçoados abrangem 21,5% das feições urbanas e configuram-se formações com topos aguçados e vertentes retilíneas (EDUARDO,2018). Os Degraus reafeiçoados englobam o horst da margem direita, representado pelo Morro Imperador e o horst da margem esquerda, onde se localizam os bairros Linhares e Vitorino Braga (Fig.26).

A região sudoeste da cidade é denominada Cidade Alta, abrangendo algumas regiões urbanas, como o bairro São Pedro, local em que se encontra a Universidade Federal de Juiz de Fora. O processo de ocupação rumo a essas áreas com maior altimetria, acima dos 800 m, foi ocorrendo, ainda que o modelado imponha maior restrição à ocupação.

Duarte (1998) e Rocha *et al.* (2022) explicam que a geologia de Juiz de Fora é marcada por falhas de empurrão associadas a fraturas que se estendem na direção Nordeste/Sudoeste. Tais condições associadas aos mecanismos atmosféricos produtores de índices pluviométricos elevados potencializam as ocorrências dos movimentos de massa, sobretudo durante a estação chuvosa.

Figura 25 a) Mapa de Altimetria de Juiz de Fora - MG

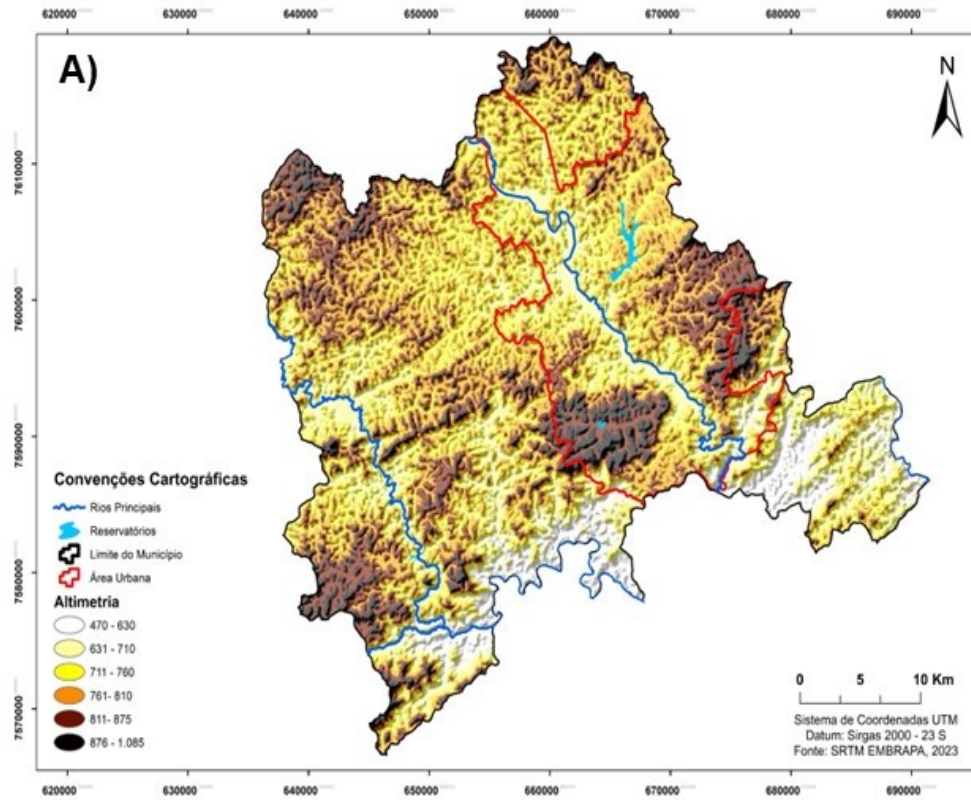
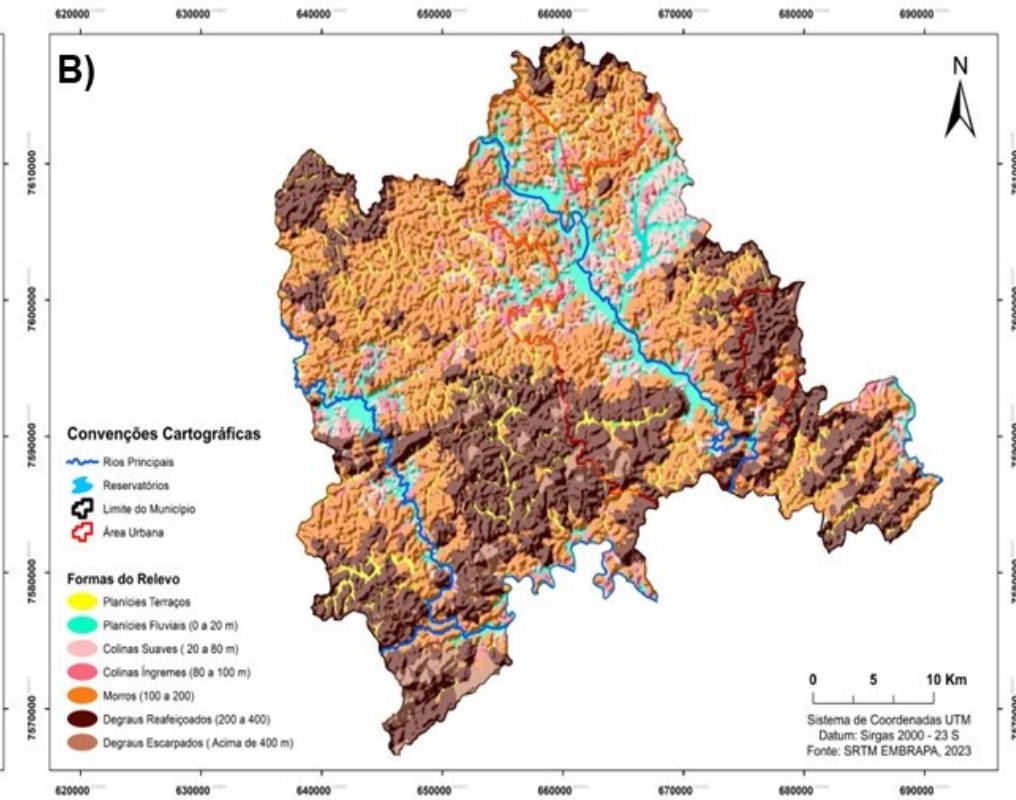


Figura 25 b) Mapa de Morfologia em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora.



Figura 26 - Vista parcial da área urbana central de Juiz de Fora – MG edificada sobre o Gráben do Rio Paraibuna. Fotografia tirada a partir do “Morro do Imperador”, sendo o Horst da margem direita.



Fonte: Adaptado de Marques Neto et al (2017).

Tabela 3 – Distribuição das formas de Relevo na Área Urbana de Juiz de Fora – MG.

Classificação das Formas do Relevo		
Tipo	Área (ha)	(%)
Colinas Íngremes	3458,1	8,1
Colinas Suaves	5791,3	13,5
Degraus Escarpados	509,9	1,2
Degraus Reafeiçoados	9243,9	21,5
Morros	15865,6	37,0
Planícies Fluviais	6335,9	14,8
Planícies Terraços	1692,2	3,9

Fonte: Organizado pela autora.

As planícies terraços (3,9%) apresentam largura variável e se distribuem ao longo de todo o eixo de escoamento do Rio Paraibuna e seus afluentes, desde variadas extensões a diferentes níveis altimétricos.

As Colinas Suaves, com topos suavemente aplainados, encontram-se nas proximidades das planícies, sobretudo das planícies fluviais, e representam 13,5% das feições urbanas. Já as Colinas íngremes, representando 8,1% das formas, possuem áreas de encosta, geralmente encontradas nas cabeceiras das drenagens da área urbana.

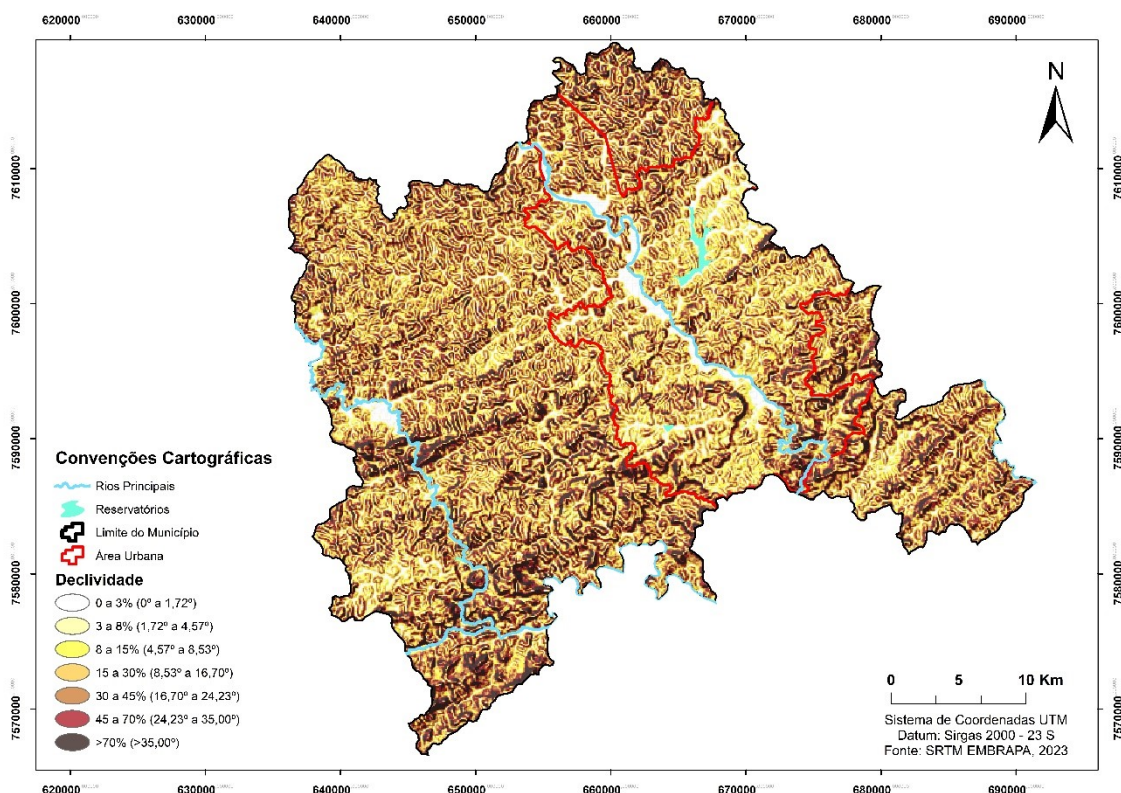
Com menor representatividade na área urbana, apenas 1,2%, aparecem os Degraus Escarpados, caracterizando áreas muito elevadas, encostas bastante íngremes, com desnivelamento altimétrico acima dos 400 metros de altitude.

Em relação á declividade do município, podemos observar que a região sudeste e sudoeste da cidade concentram as áreas de maior declividade, com encostas sujeitas a movimentos de massa (Fig 27).

Principalmente nos arredores do Morro do Cristo, que, mesmo com a declividade acima dos 45°, vêm sendo ocupada. Eduardo (2018) explica que a urbanização nessas áreas avançou através de intervenções como a impermeabilização das vertentes, cortes e aterramentos nos topos, para a instalação de equipamentos urbanos.

O que contribui para a ampliação da variabilidade microclimática no ambiente intraurbano, dada a combinação entre altimetria diferenciada, modificações no uso e ocupação da terra e contrastes na densidade construtiva.

Figura 27 – Mapa da Declividade em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 28 apresenta a orientação das vertentes para todo o município, e a tabela 4 mostra a distribuição em hectares, além da porcentagem de cada sentido da vertente para a área urbana.

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) destacam que no hemisfério Sul, as faces voltadas para o norte recebem mais insolação e tendem a apresentar maior aquecimento, pois o Sol estando sempre no horizonte Norte, deixa à sombra as vertentes voltadas para o Sul.

Em relação à orientação das vertentes na área urbana, nota-se um predomínio em direção ao sentido Nordeste, cerca de 14,6 %. Já as vertentes voltadas para Oeste englobam 12,2% das áreas, enquanto as voltadas para o Leste representam 10,8 %.

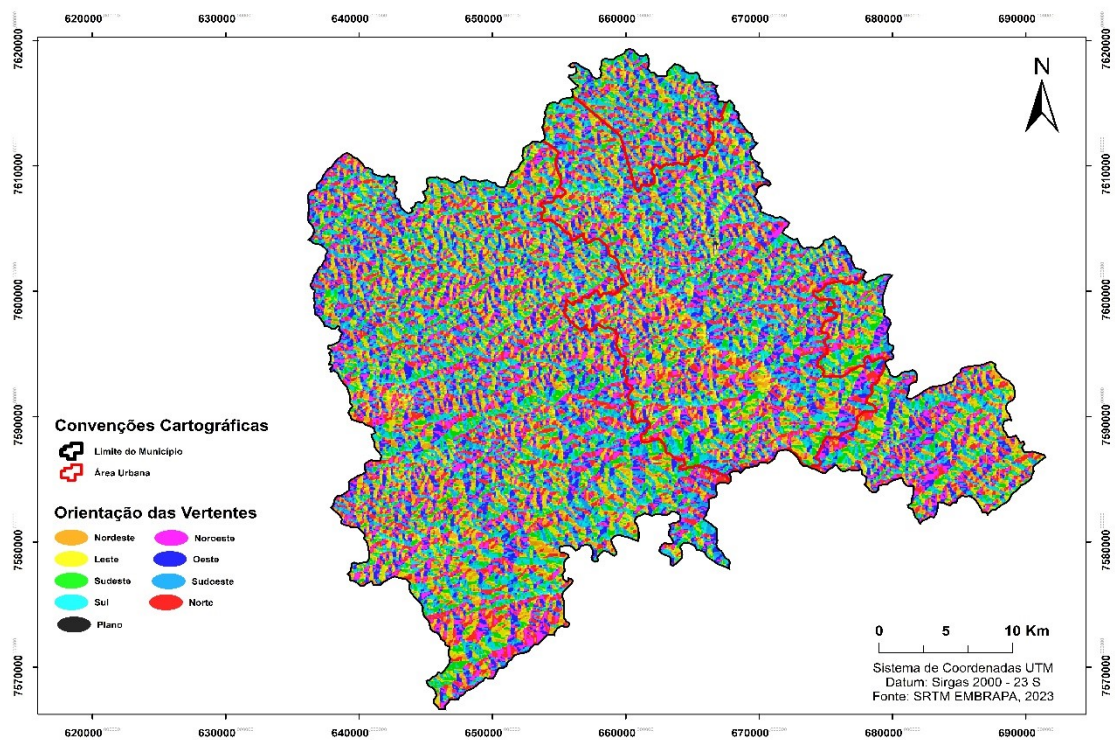
Neves (1989) explica que as vertentes voltadas para o Leste apresentam vantagem em relação ao conforto térmico, sobretudo em relação a ocupação do

terreno para construção civil, já que a insolação direta ocorre pela manhã, período do dia que a insolação é menos intensa.

Foram destacadas por Assis (2022) as parcelas do município que possuem orientações predominantes, dentre elas, o eixo noroeste-sudeste da calha do Rio Paraibuna, em que se verifica a orientação no sentido Leste/Nordeste.

As vertentes voltadas para o sul e norte, se apresentam quase homogêneas, 10,6 % e 10,8 % respectivamente. A menor representatividade em área se dará pelas vertentes sem orientação, ou seja, aquelas que são planas e suas áreas abrangem apenas 7,9 % da área urbana.

Figura 28– Mapa da Orientação das Vertentes em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 – Distribuição da Orientação das Vertentes na Área Urbana de Juiz de Fora – MG.

<b>Orientação das Vertentes na Área Urbana</b>		
<b>Sentido</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>(%)</b>
Plano	3353,75	7,9
Norte	4616,2	10,8
Nordeste	6214,8	14,6
Leste	4608,9	10,8
Sudeste	4311,6	10,1
Sul	4497,9	10,6
Sudoeste	4980,69	11,7
Oeste	5184,8	12,2
Noroeste	4792,77	11,3

Fonte: Organizado pela autora

Em relação ao uso e ocupação das terras no município de Juiz de Fora, podemos visualizar na figura 29 a e na tabela 5, que 58,5 % das áreas estão cobertas por pastagens, o que contribui para que as temperaturas médias de superfície se situem entre 23,6°C a 25,3 °C. Fig. 29 b.

A silvicultura representa 3,67% da área municipal, e sua presença é destacada na região noroeste do município, sobretudo com o predomínio do eucalipto, muito utilizado nas siderúrgicas locais como a Votorantin, situada às margens da BR 267, no sentido ao município de Lima Duarte, e a Arcelor Mittal, situada ao longo da BR 040, no sentido ao município de Santos Dumont. Pelo fato de o porte arbóreo dos eucaliptos e pinus promoverem sombreamentos a temperatura de superfície nessas áreas se comporta de maneira similar às cobertas por mata nativa, promovendo as menores médias termiais do município (19°C – 22,5°C).

As áreas cobertas por matas nativas representam 27,5% da área do município e, de acordo com Veloso e Goés (1982), a vegetação natural da região é classificada como Floresta Estacional Semidecidual, característica de regiões com a estacionalidade climática bem demarcada.

Já as Unidades de Conservação (UC's), representando 0,6 %, estão estabelecidas na área urbana, entre elas se destaca a Mata do Krambeck, um

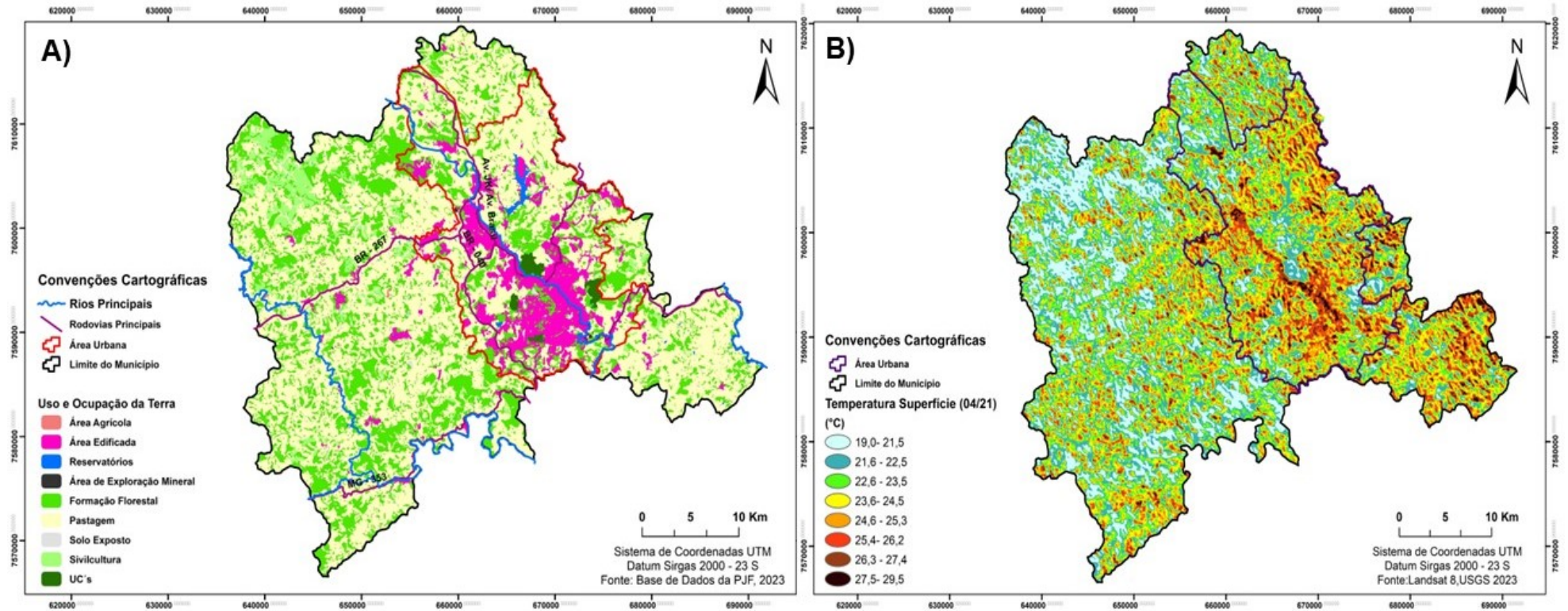
importante remanescente de Mata Atlântica em regeneração, ao lado direito da avenida Brasil, uma das mais movimentadas da cidade. O parque da Lajinha, uma unidade de conservação municipal, possui aproximadamente 88 hectares de extensão e, desde que foi desapropriada e declarada área de interesse social pelo Decreto de Lei 2.115/78, encontra-se em estágio de regeneração, contribuindo para temperaturas de superfície mais amenas (21,0°C – 23,5°C).

As áreas ocupadas por corpos d'água representam 0,48% e estão representadas por importantes mananciais de abastecimento humano municipal, como a Represa São Pedro e a Represa João Penido, e assim como as áreas com cobertura vegetal, vão apresentar médias termiais amenas (21,6°C - 22,5°C).

A mancha urbana, através das áreas edificadas, representa 8,5% da área do município e conforme a figura 14b, é onde predominam as temperaturas superficiais mais elevadas, variando entre 25,4°C e 29,5°C.

Já às áreas identificadas como solo exposto, apesar de pouco representativa, 0,48 %, serão responsáveis por elevar a temperatura de superfície, sobretudo na região sudeste do município, muitas vezes se comportando com médias termiais similares às de áreas de intensa massa construída.

Figura 29 a) Mapa do Uso e Ocupação da Terra em Juiz de Fora b) Mapa da Temperatura de Superfície em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 5 – Distribuição do Uso e Cobertura das Terras no Município de Juiz de Fora – MG.

Classificação do Uso e Cobertura das Terras		
Tipo	Área (ha)	(%)
Mata Nativa	39531,9	27,50
Extração Mineral	63,9	0,04
Silvicultura	5274,1	3,67
Unidades de Conservação	867,2	0,60
Pastagem	84097,7	58,50
Corpos d'água	683,7	0,48
Agricultura	208,5	0,15
Area Edificada	12329,0	8,58
Solo Exposto	695,6	0,48

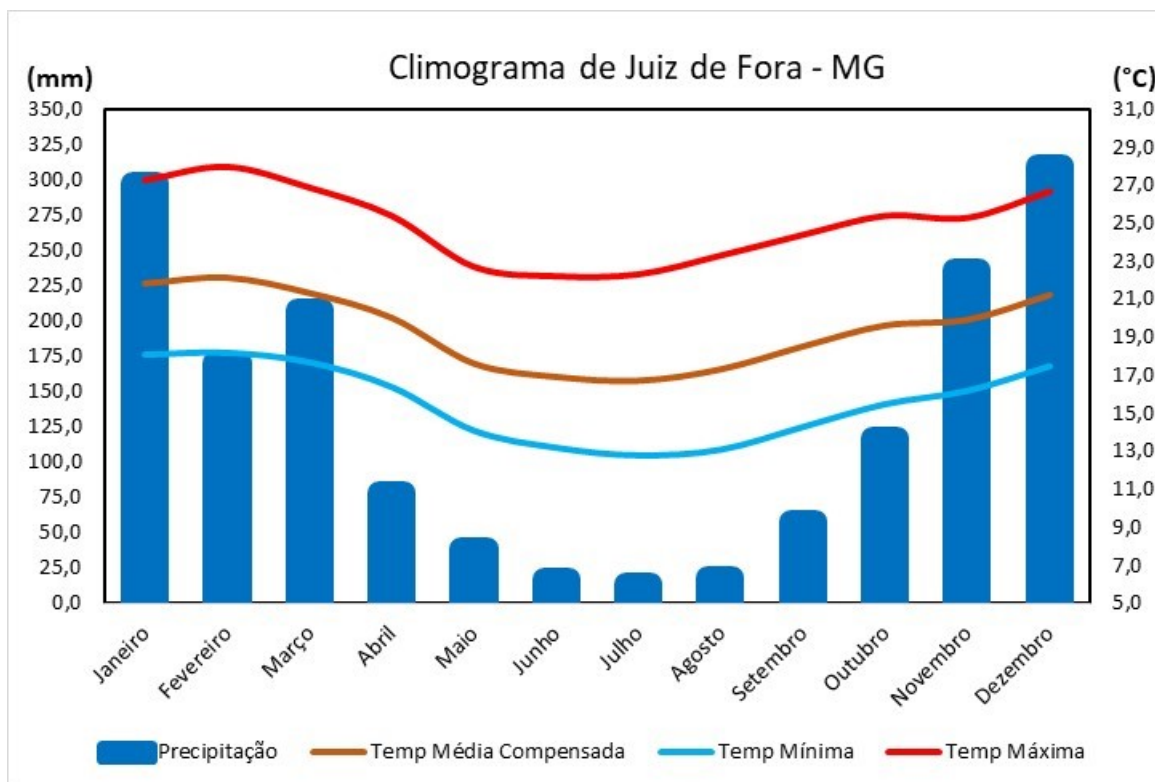
Fonte: Organizado pela autora.

#### 4.3 Os fatores dinâmicos e o clima em Juiz de Fora - MG

O clima local de Juiz de Fora mantém estreita relação com a dinâmica climática da região em que se encontra inserido. Partindo do ponto de vista da Climatologia Dinâmica, os principais sistemas atmosféricos que irão influenciar o clima do município podem ser citados: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), a Massa Tropical Atlântica (mTa), a Massa Polar Atlântica (mPa), as Linhas de Instabilidades (Lis) e Sistemas Frontais. A região está exposta a duas estações bastante distintas (FIG. 30), o que se convencionou denominar de clima tropical de altitude.

Contribuindo para esse raciocínio, Sant'Anna Neto (2005) ressalta que a altitude com sua capacidade de abrandar o caráter tropical do clima na região influencia tanto na temperatura do ar quanto na pluviosidade. Além disso, a disposição das Serras da Mantiqueira e do Mar são capazes de interferir nas sazonalidades das precipitações e nos volumes anuais, uma vez que, “exercem um papel fundamental na distribuição das chuvas, gerando as “ilhas úmidas” na vertente leste e “ilhas secas” na vertente oeste”. (Sant'anna Neto, 2005).

Figura 30 – Climograma das Normais Climatológicas.



Fonte: Inmet - Normais Climatológicas (1990-2020) – Organizado pela autora

Ferreira (2012), a partir de um estudo de classificações de unidades climáticas na Bacia do Rio Paraibuna, identificou que o inverno na região do município de Juiz de Fora, possui um período seco bem delimitado, substancialmente pela participação da Massa Tropical Atlântica (mTa). Diante da atuação da Massa Polar Atlântica (mPa), a região sofre quedas na temperatura, entretanto, por não estar submetida a grandes elevações altimétricas, como outras áreas da Bacia do Paraibuna, não consegue provocar chuvas com volumes de precipitações significativos, raramente ultrapassando os 50 mm, durante todo o período de inverno. (Fig.30)

Cavalcanti *et al* (2009) explicam que a mTa, muito atuante na região no inverno, induz o fenômeno de subsidência, responsável pelo céu azul, condicionando estabilidade atmosférica. Uma vez que, durante o predomínio de uma mTa, a alta pressão se instala, ocasionando baixa velocidade do vento e baixa umidade relativa do ar, possibilitam-se os mecanismos de investigação dos diferentes campos térmicos presentes na área urbana e rural do município.

Em contrapartida, a mPa, geradora das frentes frias (FF) quando em contato com a mTa, geralmente ocasiona quedas bruscas nas temperaturas e diminuição nas amplitudes térmicas em localidades com condições geográficas distintas. Isso se dá em razão da homogeneidade que esse sistema de alta pressão condiciona no ambiente urbano.

No mês de outubro, inicia-se a estação quente e chuvosa o que possibilita a reposição hídrica, assim os meses de excedente hídrico na região se estende até o mês de março. Destacadamente os meses de dezembro e janeiro se configuram os mais chuvosos, sobretudo em função da presença da Zona do Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que se destaca como um mecanismo significativo no fornecimento precipitações intensas e duradouras na região. A ZCAS, impulsionada pela umidade da Amazônia, aumenta os níveis de nebulosidade e umidade, o que pode contribuir diretamente para a atenuação das amplitudes térmicas na área urbana.

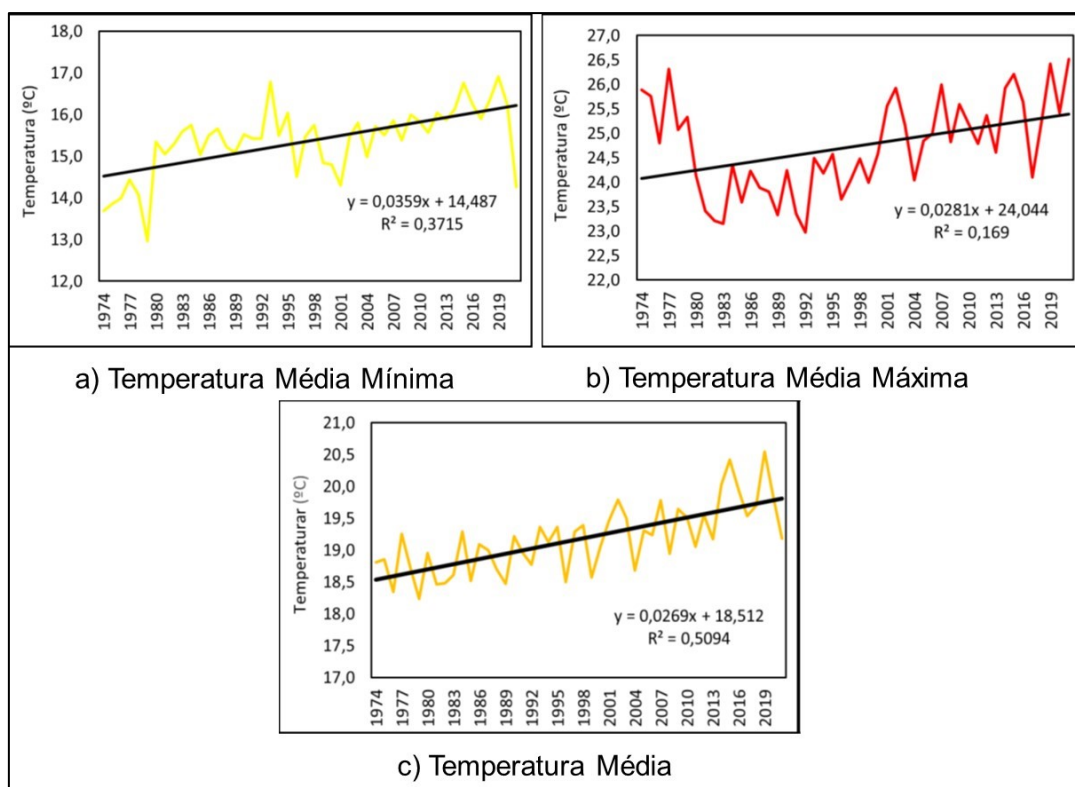
Os estudos desenvolvidos por Oliveira *et al* (2020) mostraram que 44,4% das precipitações que ocorreram na cidade, entre 1910 e 2018, se concentraram nos meses de verão e 40,6 % nos meses da primavera. Já para os meses de outono, 8,8 %, e apenas 6,1 % para os meses de inverno, confirmando a existência de duas estações bem definidas, sobretudo pela distribuição das precipitações.

Conforme é explicado por Sant'anna Neto (2003), no geral, as precipitações se apresentam mais irregulares do que as temperaturas, uma vez que, em relação aos parâmetros térmicos, existe um forte componente sazonal relacionado a radiação solar, que dita uma marcha anual mais ou menos bem definida. No caso de Juiz de Fora, os meses mais quentes são exatamente os do verão do hemisfério sul (dezembro, janeiro e fevereiro), enquanto os meses mais frios são os registrados durante o inverno (junho e julho).

Ferreira *et al* (2023), observando os dados de temperatura média, média máxima e média mínima na cidade, entre 1974-2021, identificaram tendência de aumento ao longo da série. Conforme pode ser visualizado nos gráficos presentes na figura 31, os pesquisadores identificaram um aumento de 1,3°C nas temperaturas

médias máximas, 1,3°C nas temperaturas médias ao longo da série, e para a as temperaturas médias mínimas o aumento foi de 1,7°C, no período analisado.

Figura 31 - Tendência anual das temperaturas médias mínimas (a), médias máximas (b) e médias (c) em Juiz de Fora – MG .



Fonte: Ferreira *et al* (2023).

Com base na tabela 6, Ferreira *et al* (2023), identificaram que os maiores valores de temperatura máxima do ar foram registrados a partir do ano de 2007, em meses de transição (setembro/ outubro) entre o período mais frio para o mais quente, sendo o maior deles em 19/10/2014, atingindo a marca de 36,6°C.

Em relação às menores mínimas, no dia 09/07/1985 foi registrada a menor temperatura da série estudada, 3,1°C. Os pesquisadores ressaltaram que o número de dias quentes em Juiz de Fora teve um aumento significativo nos últimos anos, por outro lado, o número de dias frios tem se reduzido ao longo da série.

Tabela 6 - Temperaturas extremas do ar máximas e mínimas registradas entre 1974 - 2021.

<b>Maiores Máximas</b>	<b>Menores Mínimas</b>
35,0°C - 24/09/2007	3,3°C - 01/06/1979
36,6°C - 19/10/2014	4,3°C - 04/08/1983
35,6°C - 16/10/2015	3,1°C - 09/07/1985
34,8°C - 05/11/2019	5,5°C - 19/05/1990
35,4°C - 28/09/2020	3,3°C - 10/07/1994
35,4°C - 02/10/2020	4,2°C - 18/07/2000
35,4°C - 07/10/2020	5,5°C - 30/07/2021

Fonte: Ferreira *et al* (2023)

#### 4.3.1 Classificação Climática para Juiz de Fora - MG

De acordo com a figura 32, e a tabela 7, é possível visualizar o balanço hídrico mensal de Juiz Fora<sup>5</sup>, com base na Normais Climatológicas (1990-2020). Em função da tropicalidade encontrada na região, os meses de maio, junho, julho e agosto estão submetidos a retirada de água do solo, sobretudo no mês de agosto e setembro que ficam submetidos a um pequeno déficit hídrico. Por outro lado, os meses de outubro e novembro são responsáveis pelo processo de reposição da água no solo. De novembro a março, o cenário habitual é o de excedência hídrica.

Assim, utilizando a classificação climática de Thornthwaite e Mather (1955), que leva em consideração o cálculo de balanço hídrico, o clima de Juiz de Fora pode ser classificado como **B<sub>3r</sub>B<sub>3á</sub>**. Ou seja, em relação ao índice de umidade como úmido, do tipo Mesotérmico, em que a adequação sazonal da umidade se encontra com pouca ou nenhuma deficiência de água no inverno.

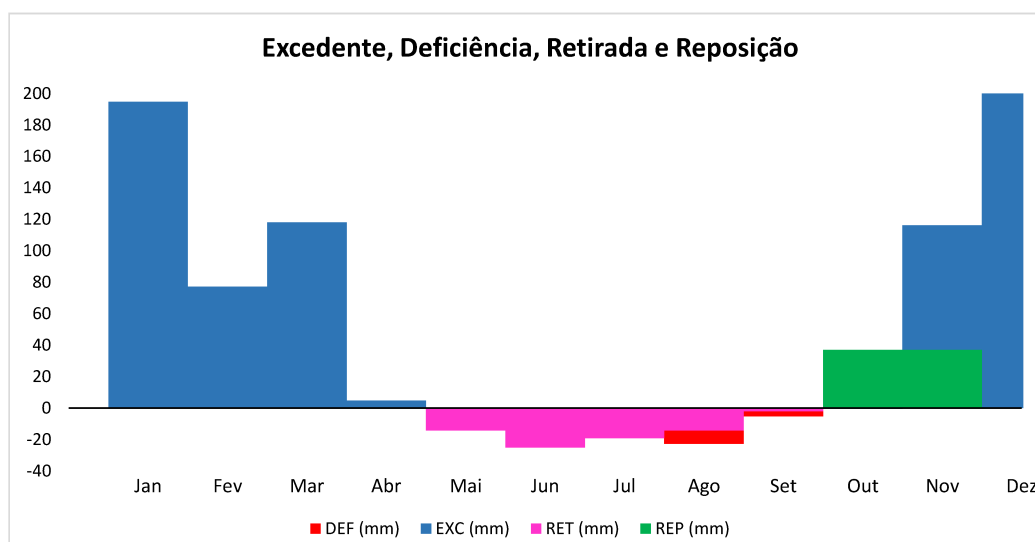
<sup>5</sup> O cálculo foi feito considerando uma capacidade de armazenamento para o solo de 100mm.

Tabela 7 - Balanço Hídrico para cidade de Juiz de Fora - MG entre 1991-2020

Juiz de Fora- MG (1991-2020) 21°45'18" 43°21'05"W Alt. 940m										
Mês	P (mm)	ETP (mm)	P - ETP (mm)	NEG. Acum. (mm)	ARM (mm)		ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)	ESC (mm)
					VAL	ALT				
Jan	297,4	102,6	194,8	0	100	0	103	0	195	165
Fev	170,3	93	77,3	0	100	0	93	0	77	121
Mar	207,5	89,25	118,25	0	100	0	89	0	118	120
Abr	78,5	73,72	4,78	0	100	0	74	0	5	62
Mai	38,6	53,76	-15,16	-15,2	86	-14	53	1	0	31
Jun	17,3	50,05	-32,75	-47,95	61	-25	42	8	0	16
Jul	14,4	52,25	-37,85	-85,8	42	-19	33	19	0	8
Ago	18,8	55,44	-36,64	-122,44	28	-14	33	23	0	4
Set	57,8	65	-7,2	-129,64	26	-2	60	5	0	2
Out	117,6	81	36,6	-45	62,6	37	81	0	0	0
Nov	236,2	82,84	153,36	0	100	37	83	0	116	58
Dez	310,4	97,75	212,65	0	100	0	98	0	213	135
Ano	1565	896,66	668,14			0	841	56	724	723

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 32 - Balanço hídrico mensal de Juiz de Fora - MG.



INMET - Normais Climatológicas (1990-2020) – Organizado pela autora.

Em relação a classificação de Köppen, o clima de Juiz de Fora, se encaixa na categoria “Cwa”, em que, a letra “C” refere-se a climas temperados, ou mesotérmicos, enquanto “w” indica que existe uma estação seca representativa durante o inverno. A letra “a” indica que a temperatura média do mês mais quente é superior a 22°C, ou seja, verão quente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Zonas Climáticas “Naturais” em Juiz de Fora entre 1915-1920.

Com base na interpolação dos dados históricos de temperatura média (1915–1920), associada às informações topográficas (formas de relevo, altimetria) e hidrografia local, foi elaborado o mapeamento das Zonas Climáticas “Naturais” (ZCN) para o município de Juiz de Fora (Fig. 34).

Este mapeamento teve como objetivo representar uma configuração climática menos influenciada pelos efeitos da urbanização, aproximando-se, portanto, das condições topoclimáticas naturais do início do século XX. No quadro 3, é possível visualizar as principais características das Zonas Climáticas “Naturais” estabelecidas para o município.

A ZCN 1, que convencionou a ser chamada de *Terras Altas Frias*, corresponde as zonas mais frias, com temperaturas médias variando entre 15,0°C e 16,6°C. Concentram-se nas áreas de maior altitude e declividade acentuada, distribuídas nos horsts à direita e à esquerda do Rio Paraibuna. Tais regiões correspondem morfologicamente a setores de degraus escarpados e reafeiçoados, com altitudes superiores a 850 metros. O comportamento térmico mais ameno nesta zona está diretamente associado à elevada altitude, à maior ventilação natural e à presença de cobertura vegetal preservada, aspectos que resultam da dificuldade histórica de ocupação humana nessas áreas, devido à inclinação do terreno e ao acesso restrito. Mesmo atualmente, essas características ainda são limitantes a expansão urbana, contribuindo para a manutenção de feições mais preservadas.

A ZCN 2, denominada de *Zonas Climáticas dos Mares de Morros*, aparece como uma faixa de transição térmica (16,2°C a 17,1°C), caracterizada por colinas íngremes e morros com altitudes intermediárias (750–850 m). Estas áreas apresentam forte heterogeneidade topográfica, promovendo boa drenagem e ventilação.

A ZCN 3, *Zonas Climáticas Naturais das Colinas Onduladas*, apresenta temperaturas entre 17,2°C e 18,2°C, associadas à maior exposição solar e topografia levemente ondulada, favorecendo o aquecimento térmico moderado.

A ZCN 4, *Zonas Climáticas Naturais dos Fundos de Vale*, concentra as zonas com temperaturas médias mais elevadas (18,3°C a 19,0°C) e se encontram nas planícies fluviais e nas áreas de colinas suaves, com altitudes inferiores e topografia suavizada. Essas porções são fortemente influenciadas pela presença do Rio Paraibuna e apresentam maior propensão à ocorrência de inversões térmicas noturnas, especialmente durante o inverno. Apesar da urbanização ainda incipiente e com baixa densidade construtiva no início do século XX, essas áreas já correspondiam ao núcleo urbano inicial (Fig. 33), o que pode ter promovido variações microclimáticas locais, mesmo que discretas.

A imagem histórica da região da atual Avenida Getúlio Vargas (Fig. 33) reforça essas interpretações ao evidenciar os aspectos de uso e ocupação da época. Observa-se um traçado urbano pouco denso, com construções térreas em alvenaria e coberturas cerâmicas, entremeadas por áreas vegetadas e espaços vazios nas adjacências da planície do Rio Paraibuna, locais de maior facilidade no processo de ocupação. A baixa densidade construtiva e a presença significativa de cobertura arbórea e arbustiva contribuíam para a manutenção de temperaturas mais amenas, mesmo para uma área central.

O cruzamento das variáveis físicas com a interpolação das temperaturas históricas através de álgebra de mapas, possibilitou uma compreensão mais refinada das Zonas Climáticas “Naturais”, que hoje correspondem, em grande parte, ao perímetro urbano do município. Revelando o papel determinante do relevo, da altitude e da hidrografia na distribuição espacial das condições térmicas em um período anterior às alterações impostas pela urbanização. Além de oferecer um panorama climático histórico, esse mapeamento contribuiu para a identificação de topoclimas preservados, possibilitando um padrão de referência para com os cenários atuais e futuros.

Quadro 3 - Características das Zonas Climáticas Naturais (ZCN) de Juiz de Fora- MG (1915-1920).

ZCN	Faixa Térmica (°C)	Morfologia Predominante	Altitude (m)	Topoclima	Características Climáticas
ZCN 1 - Zonas Climáticas Naturais das Terras Altas Frias	15,0 – 16,2	Degraus Escarpados e Reafeiçoados	> 850	Topoclima de Vertentes Elevadas	Áreas de alta altitude, maior nebulosidade e exposição; baixas temperaturas médias.
ZCN 2 - Zonas Climáticas Naturais dos Mares de Morros	16,2 – 17,1	Colinas Íngremes e Morros	750 – 850	Topoclima de Encostas	Faixa de transição térmica; maior variação altitudinal; boa drenagem e circulação de ar.
ZCN 3 - Zonas Climáticas Naturais das Colinas Onduladas	17,2 – 18,2	Colinas Suaves	700 – 775	Topoclima de Interflúvios Moderados	Áreas com maior exposição solar; declividades suaves; tendência a aquecimento moderado.
ZCN 4 - Zonas Climáticas Naturais dos Fundos de Vale	18,2 – 19,0	Planícies Fluviais	650 – 750	Topoclima de Fundo de Vale	Influência direta do Rio Paraibuna; sujeitas a inversões térmicas noturnas e menor ventilação.

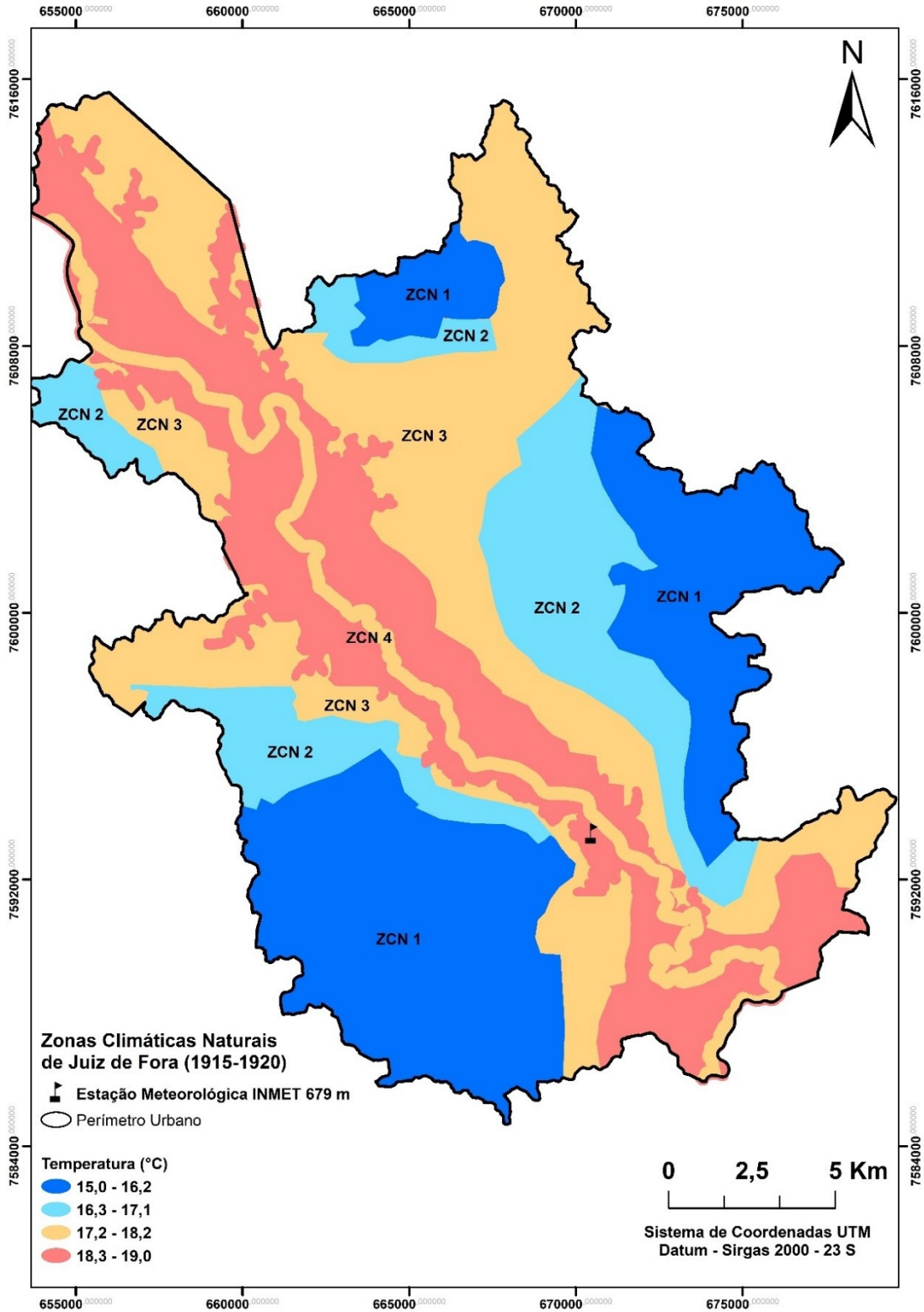
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 – Região da Avenida Presidente Getúlio Vargas no início do século XX.



Fonte: Álbum de Juiz de Fora. Org. Esteves (1915).

Figura 34 – Zonas Climáticas Naturais (ZCNs) em Juiz de Fora (1915- 1920).



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.2 Zonas Climáticas Locais (ZCLs) em Juiz de Fora- MG

### 5.2.1 – ZCLs a partir do Método WUDAPT (*World Urban Database and Access Portal Tools*).

A partir da aplicação do método WUDAPT (*World Urban Database and Access Portal Tools*), foi gerado o mapeamento das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) para Juiz de Fora (Fig. 35). Esse método baseia-se na classificação das unidades LCZ (Local Climate Zones), considerando atributos morfológicos, de cobertura da terra e características térmicas para definir zonas urbanas climáticas homogêneas.

Durante o processo de classificação, foram identificadas algumas limitações, sobretudo em áreas onde diferentes ZCLs apresentam características espectrais semelhantes. Destaca-se a dificuldade do classificador baseado em máxima verossimilhança em fazer a distinção entre áreas industriais e zonas residenciais densas com cobertura metálica, resultando em confusões entre as classes ZCL 3, ZCLs 8 e 10. Essa limitação está associada a uma particularidade do tecido urbano de Juiz de Fora, onde o uso de telhas metálicas é comum tanto em residências de padrão médio e baixo quanto em edificações industriais, devido ao seu baixo custo e fácil acesso. Essa característica local/regional interfere diretamente na interpretação espectral das imagens, reduzindo a acurácia da classificação.

Outro desafio observado foi a baixa diferenciação entre as ZCLs 6 e 9, ambas caracterizadas por menor adensamento construtivo e significativa presença de vegetação urbana. No entanto, a ZCL 9 se distingue por apresentar espaços amplos com ocupação esparsa, o que não foi corretamente captado pela classificação automatizada.

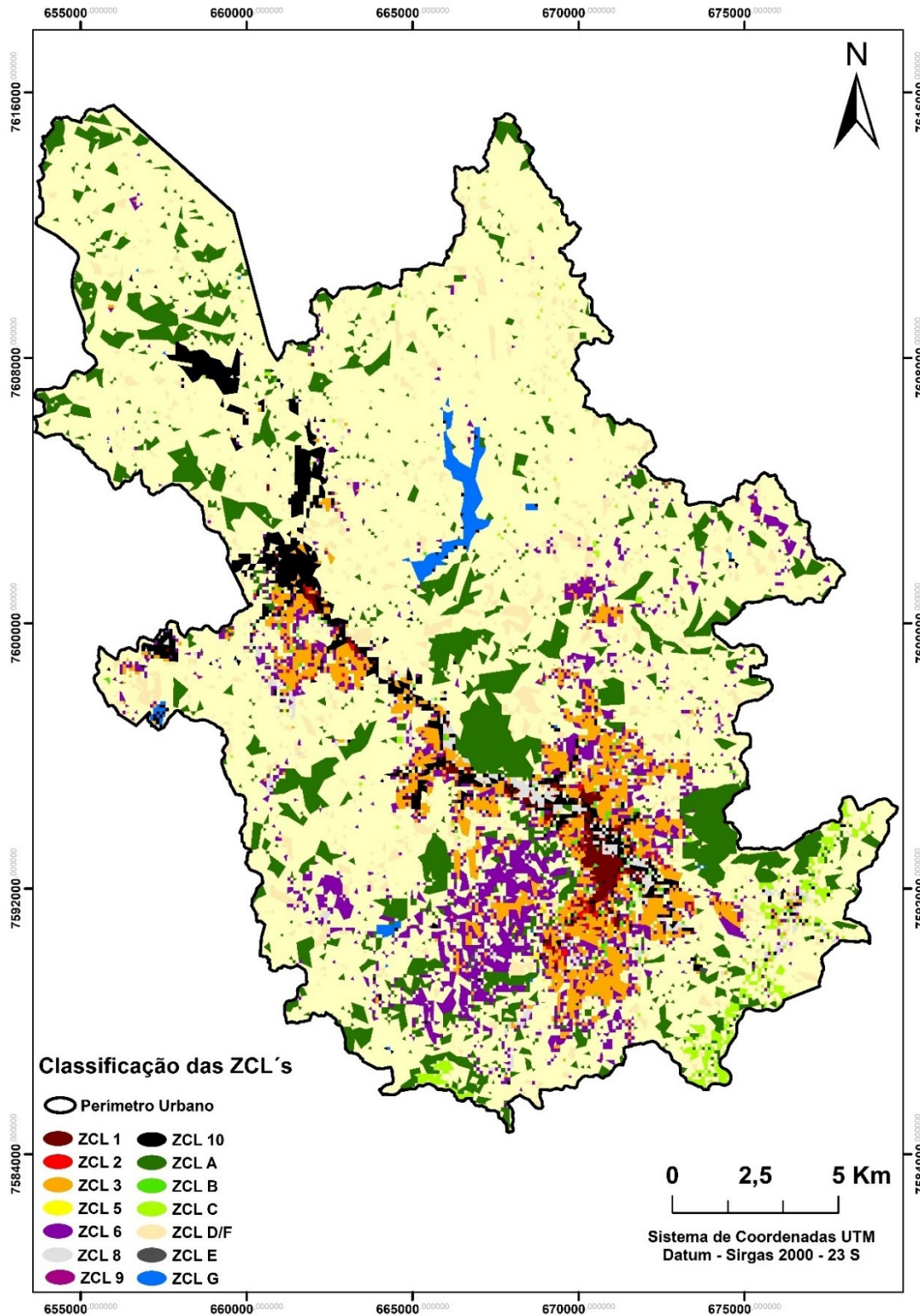
O próprio método WUDAPT estabelece recomendações metodológicas para a exclusão de zonas com amostragem insuficiente. Em Juiz de Fora, a ZCL 4 e a ZCL 7 foram desconsideradas por não possuir número representativo de amostras válidas, o que comprometeria a robustez da classificação dessa categoria.

É importante destacar que o método foi inicialmente desenvolvido e aplicado em cidades de países centrais, onde a distribuição das tipologias urbanas é mais homogênea e os dados auxiliares, como altura das edificações e uso detalhado do

solo, são amplamente disponíveis. Essa diferença de contexto pode explicar as imprecisões observadas na aplicação do método em cidades brasileiras, sobretudo de médio porte, como Juiz de Fora.

Apesar dessas limitações, o método WUDAPT se apresenta como uma alternativa viável para cidades que não dispõem de bases cartográficas detalhadas, dados precisos sobre a morfologia urbana ou informações atualizadas de uso e ocupação da terra. Por utilizar ferramentas acessíveis como o *Google Earth*, o método permite a replicação em diversos contextos urbanos, desde que acompanhado de ajustes e validações locais, especialmente em regiões com características construtivas e paisagísticas distintas daquelas em que o modelo foi originalmente concebido.

Figura 35 – Zonas Climáticas Locais a partir do método “WUDAPT”.



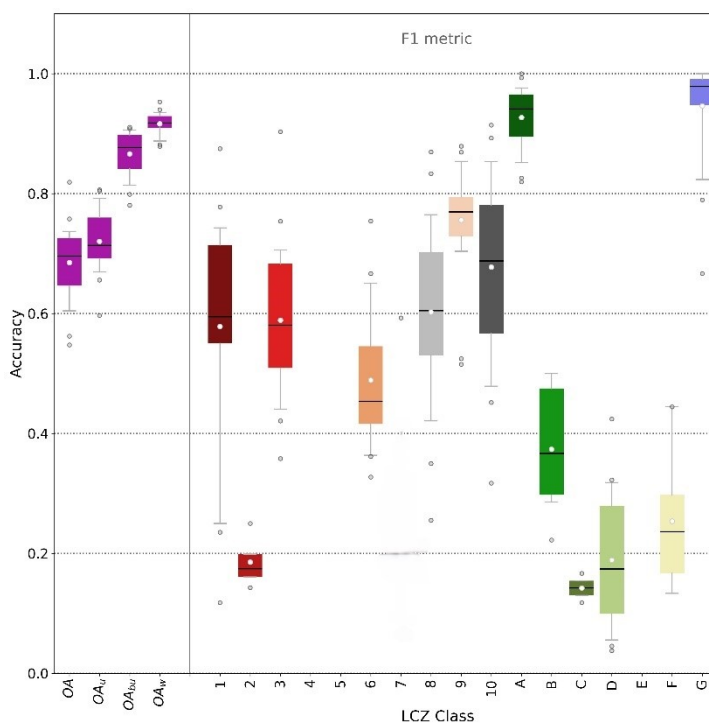
Fonte:

Elaborado pela autora.

O mapeamento geral apresentou acurácia média de 0,75, considerada satisfatória. A Figura 35 apresenta a distribuição da acurácia para cada classe de ZCL com base na métrica F1. A métrica F1 é uma medida estatística amplamente utilizada para avaliar o desempenho de classificadores, especialmente em contextos em que há desequilíbrio entre as classes (MARIANO, 2021). No caso das ZCLs, algumas categorias possuem número significativamente maior de amostras do que outras.

A análise da acurácia por classe, expressa pela métrica F1, revelou variações significativas no desempenho do classificador. As classes com maior coerência em relação à realidade observada foram ZCL G (corpos d'água/reservatórios) e ZCL A (vegetação arbórea densa), ambas com valores de F1 superiores a 0,90 e baixa dispersão entre as amostras, o que evidencia elevada consistência e excelente separabilidade espectral. Também obtiveram resultados satisfatórios as classes ZCL 1 (área urbana densa), ZCL 8 (área industrial) e ZCL 9 (ocupação esparsa), com valores médios de F1 situados entre 0,70 e 0,80.

Figura 36 – Gráfico de distribuição das acurácias para cada ZCL.



Fonte: WUDAPT .Organizado pela autora.

Por outro lado, as classes com menor desempenho de acurácia foram ZCLs 2, C, D e F, todas com F1 inferior a 0,40 e elevada variabilidade. As ZCLs C (vegetação

arbustiva), D (vegetação rasteira) e F (solo exposto) apresentaram maior dificuldade de classificação, especialmente em função da sazonalidade das imagens utilizadas. Durante os períodos de estiagem, a vegetação perde vigor, tornando-se espectralmente semelhante a pastagens degradadas e áreas de solo exposto. O mesmo ocorre em áreas agrícolas após o ciclo de cultivo, quando passam a apresentar solo desnudo. Diante disso, optou-se por agrupar as classes D, F e áreas agrícolas sob a denominação conjunta ZCL D/F.

Quanto ao tipo de edificação, destacou-se como de menor acurácia a ZCL 2, cuja classificação é prejudicada pela heterogeneidade do tecido urbano da cidade. Em Juiz de Fora, é comum a mistura entre edificações de pequeno, médio e grande porte ao longo do mesmo setor urbano, o que dificulta a separação automática entre as tipologias e exige maior conhecimento de campo e ajustes nos parâmetros de classificação.

Essas variações de desempenho reforçam a necessidade de adaptações metodológicas no uso do WUDAPT em cidades brasileiras, considerando suas especificidades construtivas, que influenciam diretamente a resposta espectral das coberturas urbanas e naturais.















#### 5.2.2 – Método Sobreposição de Camadas e Vetorização

A partir da aplicação do método de sobreposição de camadas e vetorização, foi gerado o segundo mapa das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) para o município de Juiz de Fora (Fig. 36). Esse procedimento, associado ao conhecimento de campo, permitiu uma melhor diferenciação entre classes visualmente semelhantes, especialmente entre a ZCL 3 (compactas de baixa elevação) e a ZCL 8 (grandes construções de baixa elevação).

Durante o processo, não foram identificadas amostras representativas da ZCL 4, que corresponde a áreas com edificações de grande porte (múltiplos andares), inseridas em zonas permeáveis e com vegetação abundante, uma tipologia pouco comum na realidade urbana de Juiz de Fora, assim como também não foi encontrada ZCL 7 (compacta, pouco consolidada e de baixa elevação).

A partir do mapeamento final, foi realizada a tabulação da área ocupada por cada classe de ZCL, expressa em valores absolutos (km<sup>2</sup>) e percentuais, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Distribuição das Zonas Climáticas Locais (ZCL) em Juiz de Fora - MG.

Tipo de Construção	Área (km <sup>2</sup> )	(%)
 ZCL 1	3,8	0,8
 ZCL 2	8,5	2,0
 ZCL 3	58	13,4
 ZCL 5	2,6	0,6
 ZCL 6	15,3	3,5
 ZCL 8	6,8	1,6
 ZCL 9	34,8	8,0
 ZCL 10	8,1	1,8
Tipo de Cobertura	Area (km <sup>2</sup> )	(%)
 ZCL A	98,8	22,5
 ZCL B	4,6	1,0
 ZCL C	20,5	4,7
 ZCL D/F	159,3	37,0
 ZCL E	2,2	0,5
 ZCL G	7,1	1,6
<b>Perímetro Urbano</b>	<b>430,4km<sup>2</sup></b>	<b>100%</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

A classificação quanto ao uso da terra no perímetro urbano de Juiz de Fora revelou predominância da ZCL D/F, que reúne áreas de pastagem, cultivo e solo exposto, correspondendo a 37,0 % da área total. Em seguida, destaca-se a presença da ZCL A, associada à vegetação arbórea densa, que cobre 22,5% do território. As demais classes de cobertura apresentam valores reduzidos, como a ZCL C (vegetação rasteira), com 4,7%, e a ZCL B (vegetação esparsa), com apenas 1,0%. Os corpos d'água, agrupados na ZCL G e representados principalmente por represas e reservatórios de abastecimento urbano, e a ZCL E (rocha exposta), ocupam 1,6% e 0,5 %, respectivamente da área mapeada.

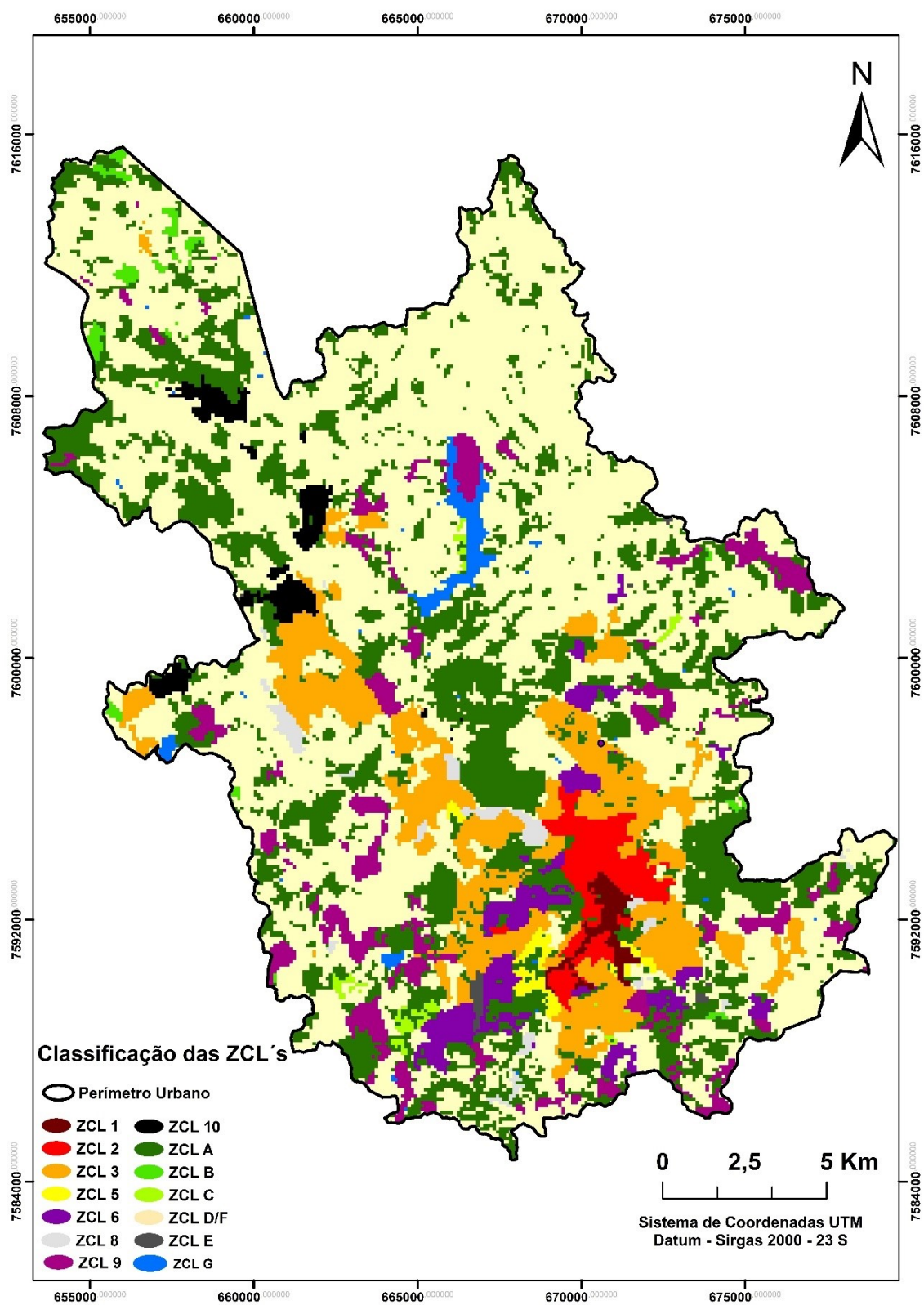
No que se refere às tipologias construtivas, a ZCL 3 (compacta de baixa elevação) aparece como a classe mais expressiva, com 13,4% de cobertura,

evidenciando o predomínio de construções horizontais de baixa altura, sem presença expressiva de vegetação e áreas permeáveis. Em seguida, figuram as áreas escassamente construídas (ZCL 9), com 8%, refletindo a ocupação dispersa em regiões periféricas ou em expansão urbana. A ZCL 6 (abertas de baixa elevação), associada a bairros com baixa densidade e presença de vegetação, como condomínios fechados, representando 3,5%. Já a ZCL 2 (compacta de média elevação), que compreende áreas urbanas de média densidade, ocupa 2,0 %.

Outras classes apresentaram menor representatividade na área urbana, como a ZCL 10, que corresponde a 1,8% da cobertura, e os galpões e grandes construções de baixa elevação (ZCL 8), com 1,6%. A ZCL 1, associada a áreas de alta densidade construtiva e verticalização, e a ZCL 5, correspondente a zonas abertas de média elevação, apresentaram participação ainda mais reduzida, ambas com menos de 1% da área total.

No entanto, destaca-se a importância da ZCL 1, localizada majoritariamente na região central da cidade, uma área relativamente plana e historicamente vinculada às primeiras ocupações urbanas de Juiz de Fora. A região urbana central concentra a segunda maior população da cidade, caracterizada por elevada densidade de edificações e intenso fluxo de pessoas e veículos, sendo atravessada por algumas das principais vias arteriais do município: as avenidas Rio Branco, Getúlio Vargas e Itamar Franco.

Figura 37 – Zonas Climáticas Locais Método Sobreposição e Vetorização.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.3 Temperatura de Superfície (TS) nas Zonas Climáticas Locais de Juiz de Fora

A análise da temperatura de superfície nas diferentes Zonas Climáticas Locais (ZCLs) de Juiz de Fora (Fig. 38) evidencia padrões térmicos diretamente relacionados ao tipo de uso e cobertura da terra. As menores temperaturas foram registradas nas áreas com maior presença de vegetação e corpos d'água, especialmente nas ZCL G (reservatórios e corpos hídricos) e ZCL A (vegetação arbórea densa), o que reforça o papel do coberto vegetal e da água no resfriamento da superfície urbana.

Por outro lado, as temperaturas mais elevadas foram observadas na ZCL E, caracterizada por rocha exposta ou superfícies pavimentadas, que alcançou cerca de 30,5 °C, valor superior ao registrado na ZCL 1, que representa áreas urbanas com edificações altas e adensadas.

Outro destaque é o comportamento térmico das ZCLs C, D e F, que correspondem, respectivamente, a áreas de vegetação arbustiva, rasteira/pastagem/cultivos e solo exposto, apresentando temperaturas em torno de 26,0 °C. Essas zonas mostraram-se mais aquecidas do que algumas áreas urbanas compactas, como a ZCL 3, composta por edificações medianas e adensadas, o que indica que a ausência de sombreamento e a baixa capacidade de retenção hídrica do solo exposto contribuem para o aumento da temperatura.

Esses resultados demonstram a influência direta do uso e cobertura da terra e das características físicas das ZCLs sobre a temperatura de superfície, o que possibilitou a identificação de padrões térmicos, permitindo a distinção das zonas com maior acúmulo de calor, como as ZCLs 1, 8 e 10, daquelas com temperaturas mais amenas, como as ZCLs A e G, caracterizadas por vegetação arbórea e corpos d'água, respectivamente.

A representação espacial contínua da TS também possibilitou a visualização precisa da distribuição térmica em todo o perímetro urbano, favorecendo a identificação de áreas com comportamento térmico semelhante, informação essencial para o planejamento do posicionamento de sensores de temperatura do ar, com base em critérios de representatividade das ZCLs. Além disso, a TS se mostrou uma ferramenta eficiente na validação da classificação das zonas, ao confirmar a coerência

entre tipologia urbana e comportamento térmico. Destaca-se ainda a facilidade de obtenção desses dados via sensores remotos, especialmente em períodos com céu claro, como no mês de setembro, permitindo a geração de mapas térmicos de alta resolução espacial sem a necessidade de extensa instrumentação em campo.

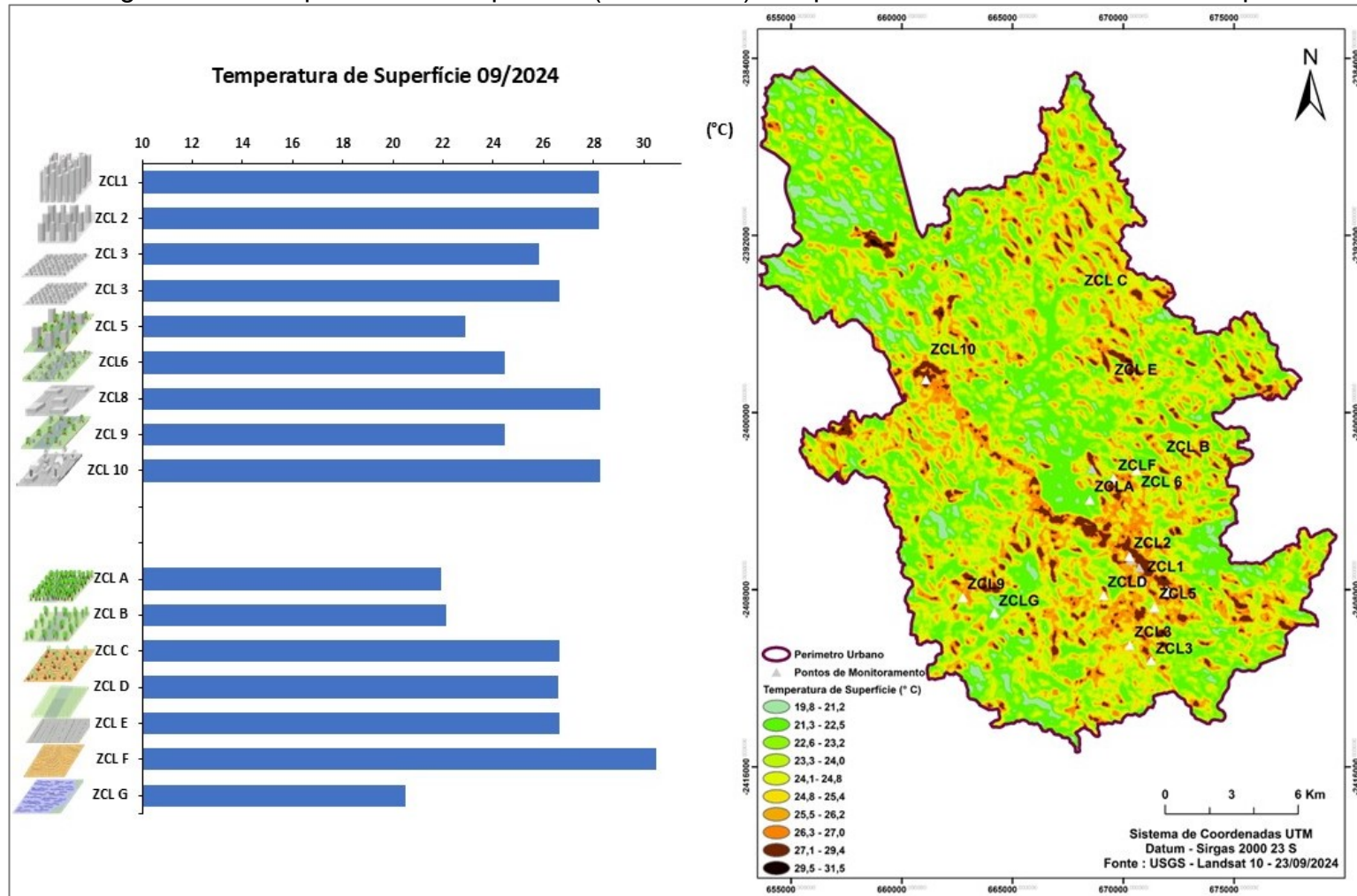
No entanto, o uso exclusivo da temperatura de superfície para analisar o comportamento térmico das ZCLs apresenta limitações que comprometem a compreensão climática urbana em sua totalidade.

O uso de imagens de satélite, por exemplo, é afetado pelas condições atmosféricas no momento da medição: em dias com céu encoberto, comuns durante a atuação de frentes frias, linhas de instabilidade ou cavados, os sensores remotos ópticos não conseguem captar dados, gerando lacunas justamente durante eventos que alteram significativamente o padrão térmico urbano.

Além disso, a temperatura de superfície é obtida em horários específicos (10h da manhã, no caso de Juiz de Fora), o que dificulta a análise contínua do ciclo térmico diário. Outro ponto crítico refere-se à forte influência dos materiais de superfície e do tipo de uso, superfícies impermeáveis tendem a superaquecer, o que pode mascarar os efeitos estruturais das ZCLs, como a morfologia urbana e a densidade construtiva.

Essas limitações evidenciam que a temperatura de superfície, isoladamente, não é suficiente para caracterizar adequadamente o comportamento térmico das ZCLs sob diferentes condições atmosféricas, sendo fundamental sua integração com dados de temperatura do ar e outros parâmetros meteorológicos.

Figura 38 – Temperatura de Superfície (23/09/2024) dos pontos de monitoramento em campo.



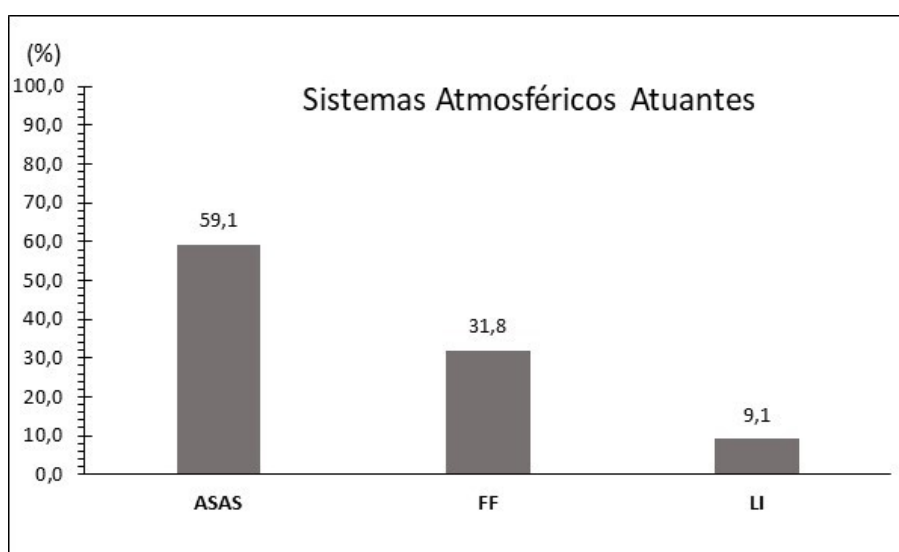
Fonte: Elaborado pela autora.

#### 5.4 Resultados do primeiro trabalho de campo para coleta de dados

A primeira coleta de dados foi realizada entre os dias 13 de julho e 16 de setembro de 2023, totalizando 66 dias de coleta de amostras de temperatura. No entanto, ao descarregar os dados, uma falha operacional no manuseio do *software* resultou na perda de uma parte das informações, afetando alguns dos pontos monitorados. Em função dessa limitação, os resultados apresentados referem-se a apenas cinco locais de amostragem. Apesar dessa restrição, optou-se por integrar esses dados às análises por terem sido coletados durante um período de estiagem, caracterizado por tipos de tempo estáveis, com baixa nebulosidade e ventos fracos, condições consideradas ideais para a realização de experimentos em climatologia urbana, conforme já foi demonstrado nas pesquisas de Lombardo (1985); Assis (2010); Amorim (2019; 2020).

A temperatura média registrada no mês de agosto foi de 18,3 °C, valor ligeiramente superior à normal climatológica de 17,3 °C para o período de referência 1991–2020, representando uma anomalia positiva de +1,0 °C. De acordo com os gráficos dos sistemas atmosféricos atuantes (Fig. 38) e da análise rítmica (Fig. 39), o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) predominou em 59,1% dos dias, promovendo condições de tempo estável, seco e ensolarado.

Figura 39 - Sistemas atmosféricos atuantes entre os dias 13/07/2023 e 16/09/2023 em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

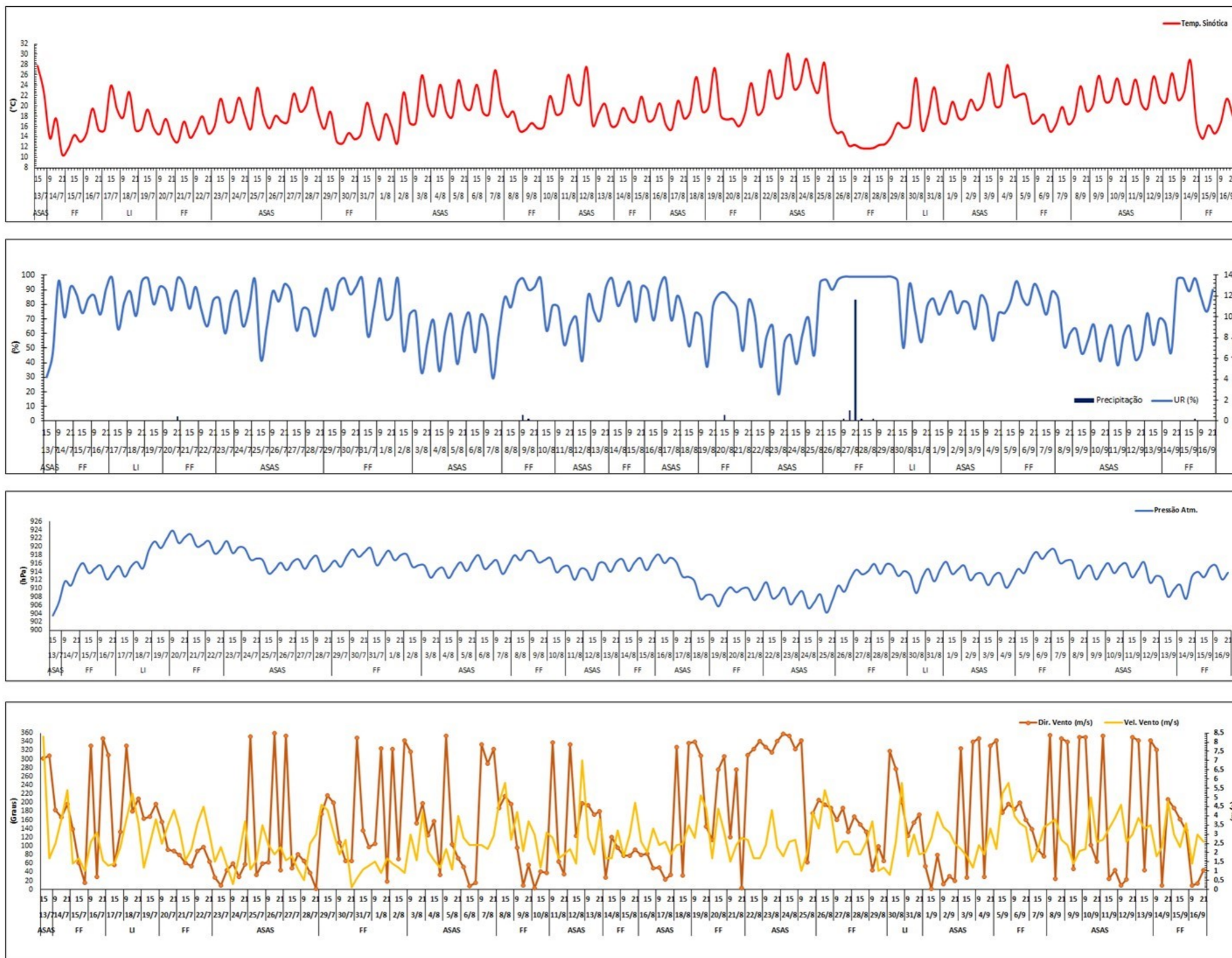
Os sistemas frontais (frentes frias) atuaram em 31,8% do mês, as linhas de instabilidade (LI) estiveram presentes em 9,1% dos dias, mas não contribuíram diretamente para eventos de chuva.

No total, foram registrados 91 mm de precipitação ao longo do período observado, dos quais 69,2 mm ocorreram especificamente no mês de agosto. Todas as ocorrências de chuva nesse mês estiveram associadas à atuação dos sistemas frontais, evidenciando sua importância na dinâmica pluviométrica local.

O comportamento da pressão atmosférica ao longo do período analisado reforça a identificação dos sistemas sinóticos atuantes. Durante a presença do ASAS, a pressão manteve-se elevada e estável, variando entre 1018 e 1022 hPa, o que confirma o predomínio de condições anticiclônicas, secas e estáveis. Em contrapartida, a entrada de frentes frias foi acompanhada de quedas abruptas na pressão, atingindo valores próximos de 1010 hPa, sinalizando a chegada de instabilidade e favorecendo os episódios de precipitação.

A análise da direção do vento mostrou a predominância do quadrante nordeste ao longo do período, enquanto a velocidade manteve-se baixa, geralmente inferior a 2 m/s, favorecendo o acúmulo de calor e a baixa dispersão térmica nas áreas urbanas mais adensadas. Os picos de velocidade coincidiram com a passagem de frentes frias.

Figura 40 - Análise Rítmica dos elementos climáticos entre 13/07/2023 e 16/09/2023.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme pode ser observado na tabela 9, foram encontradas diferenças consideráveis entre os pontos monitorados. O ponto 2, localizado no Centro de Juiz de Fora (ZCL 2), caracterizado por alta densidade construtiva, apresentou a maior temperatura média (20,6°C) entre os pontos analisados. Este comportamento reflete claramente a influência do ambiente urbano verticalizado e impermeabilizado na retenção do calor, tipicamente encontrado em áreas centrais de médio e grande porte.

Tabela 9 - Valores médios dos sensores instalados nas diferentes Zonas Climáticas Locais (ZCL) entre 13/07/2023 e 16/09/2023.

ZCL	Ponto de Monitoramento	Localização	Altitude (m)	T. Média (°C)	T. Mín. (°C)	T. Máx (°C)	Amplitude (°C)	Desvio Padrão
ZCL 2	Ponto 2	Centro de Juiz de Fora	690	20,6	11,6	32,6	21	3,9
ZCL B	Ponto 4	Monte Verde (Zona Rural)	720	19,3	8,2	37,9	29,7	5,2
ZCL 9	Ponto 8	Alphaville	905	16,6	8,5	27,8	19,3	4,5
ZCL 10	Ponto 10	Bairro Industrial	698	20,1	9,2	36,3	27,1	5,2
ZCL D	Ponto 11	UFJF	940	17,9	8,9	30,5	21,6	3,8

Fonte: Organizado pela autora.

Por outro lado, o ponto 8, situado no condomínio Alphaville (ZCL 9), registrou a menor temperatura média (16,6°C) e uma das menores temperaturas mínimas (8,5°C), além de amplitude térmica relativamente elevada (19,3°C). Esse comportamento é condicionado pela sua maior altitude (905 m) e pelas características de ocupação menos densa, que favorecem o resfriamento noturno e dificultam o acúmulo de calor diurno.

O ponto 4, localizado na zona rural de Juiz de Fora (ZCL B), destacou-se pela maior amplitude térmica (29,7°C), e maior desvio padrão associado a uma forte diferença entre temperaturas mínimas (8,2°C) e máximas (37,9°C). Esse padrão é típico de áreas rurais durante períodos de estiagem, comum nos meses de julho e agosto na região de estudo. Com a diminuição da disponibilidade de água no solo, e consequente, diminuição da evaporação e da evapotranspiração das plantas, têm-se menos umidade para regulação térmica diária, acentuando tanto o aquecimento diurno quanto o resfriamento noturno.

O ponto 10, localizado no Bairro Industrial (ZCL 10), apresentou uma temperatura média de 20,1 °C e amplitude térmica de 27,1 °C, configurando-se como o segundo ponto mais quente entre os monitorados. Esse comportamento reflete a

influência das características morfológicas e superficiais locais, especialmente a predominância de materiais com alta admitância térmica, como aço, concreto e metal, que favorecem o acúmulo e a retenção de calor ao longo do dia. Além disso, a baixa presença de vegetação e a grande proporção de superfícies impermeáveis contribuem para a intensificação do aquecimento, sobretudo durante o período diurno, conforme já descrito para a ZCL10 por Stewart (2011).

Por fim, o ponto 11, situado na UFJF (ZCL D), apresentou uma temperatura média de 17,9°C, com valores mínimos de 8,9°C e máximos de 30,5°C. Apesar de estar na maior altitude dentre os pontos (940 m), suas temperaturas são relativamente mais elevadas que o ponto 8, o que pode ser atribuído à sua posição topográfica aberta e à maior exposição à radiação solar direta, sem sombreamento natural ou artificial.

Para melhor visualização dos dados foram confeccionados gráficos da temperatura instantânea dos horários de 9 da manhã, das 15 da tarde, das 21 horas da noite e 3 horas da madrugada, juntamente com a identificação e classificação dos sistemas atmosféricos atuantes (Fig. 42).

A análise da variabilidade térmica nos diferentes horários monitorados permitiu observar padrões bem definidos, diretamente modulados pela combinação das características físicas das ZCLs e pela atuação dos sistemas atmosféricos ao longo do período.

No horário das 9 horas, observou-se que os pontos localizados em áreas urbanas, especialmente o ponto 2 (ZCL 2) e o ponto 10 (ZCL 10), apresentaram sistematicamente temperaturas mais elevadas em comparação aos pontos de maior altitude, como o ponto 8 (ZCL 9) e o ponto 11 (ZCL D), além do ponto 4 (ZCL B). Este comportamento reflete, sobretudo, a maior capacidade das superfícies urbanizadas ao início do aquecimento radiativo.

Tal padrão é intensificado durante a atuação do ASAS, que favorece condições de céu claro, baixa umidade e forte estabilidade atmosférica, reduzindo a ventilação e potencializando o acúmulo de calor nas áreas urbanas.

Às 15 horas da tarde, durante o horário de máxima insolação, observou-se que o Ponto 4 (ZCL B) e o Ponto 10 (ZCL 10) se destacaram com as temperaturas mais elevadas ao longo do período analisado.

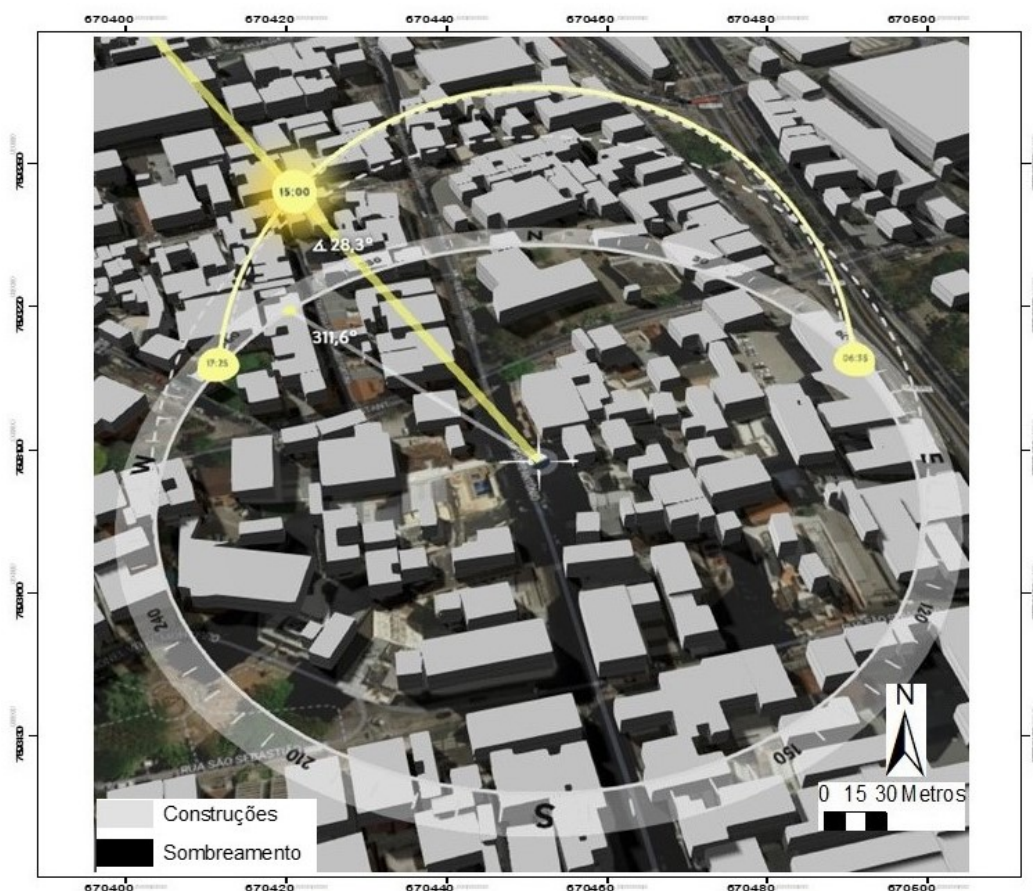
No Ponto 4 (ZCL B), a presença de solo exposto nos arredores e vegetação secundária favorece o predomínio do fluxo de calor sensível, intensificado durante a atuação do ASAS, que, ao reduzir a nebulosidade e promover subsidência atmosférica, potencializa a incidência direta de radiação solar.

O Ponto 10 (ZCL10), por sua vez, situado em área industrial com alta densidade de superfícies impermeáveis (asfalto, concreto e coberturas metálicas), apresenta intensa absorção e armazenamento de calor, com baixa capacidade de resfriamento evaporativo, favorecendo as elevações térmicas observadas.

O Ponto 2 (ZCL 2) apresentou temperaturas mais baixas que a ZCL B e 10, esse padrão é atribuído à presença de sombreamento significativo, tanto pela topografia local, notadamente o Morro do Cristo, que reduz a incidência de radiação solar direta no período vespertino, quanto pelas próprias edificações verticais ao redor do ponto monitorado.

A interação entre o relevo e morfologia urbana contribui, portanto, para atenuar o aquecimento neste setor da cidade. Essa condição é ilustrada na Figura 40, que apresenta um esquema gerado no *software ShadowMap*, evidenciando o sombreamento projetado sobre o Ponto 2.

Figura 41 – Esquema ilustrativo do sombreamento no Ponto 2 (ZCL 2) às 15 horas para o mês de julho.



Fonte: Elaborado pela autora.

O Ponto 8 (ZCL 9), inserido em área residencial de alto padrão, com lotes amplos, baixa densidade construtiva, presença de superfícies permeáveis e vegetação favorece a dissipação térmica, limitando o aquecimento. A sua altitude (917 m) também vai contribuir para este comportamento térmico, mantendo temperaturas ligeiramente superiores àquelas observadas no Ponto 11.

Por fim, o Ponto 11 (ZCL D), apresenta as menores temperaturas entre os pontos urbanos monitorados, resultado da maior altitude, menor densidade construtiva e presença de solos expostos e vegetação, que promovem maior eficiência dos fluxos evaporativos e limitam o acúmulo de calor sensível.

Às 21 horas, observa-se uma intensificação dos contrastes térmicos intraurbanos, com o Ponto 2 (ZCL 2) mantendo-se sistematicamente como o mais

aquecido em relação aos demais pontos monitorados. Esse comportamento caracteriza a formação da ilha de calor urbana noturna, especialmente acentuada em dias sob influência do ASAS, que favorece forte resfriamento radiativo nas áreas menos urbanizadas. Como resultado, amplia-se a diferença térmica entre os ambientes urbanos e rurais.

A maior discrepância registrada nesse horário ocorreu no dia 24 de agosto, quando a temperatura no Ponto 2 (ZCL 2) superou em 5,0 °C a do Ponto 4 (ZCL D), situado na zona rural.

Segundo a classificação de García (1997), variações entre 4 °C e 6 °C configuram ilhas de calor urbanas de forte magnitude, o que permite enquadrar a área da ZCL 2 dentro dessa categoria.

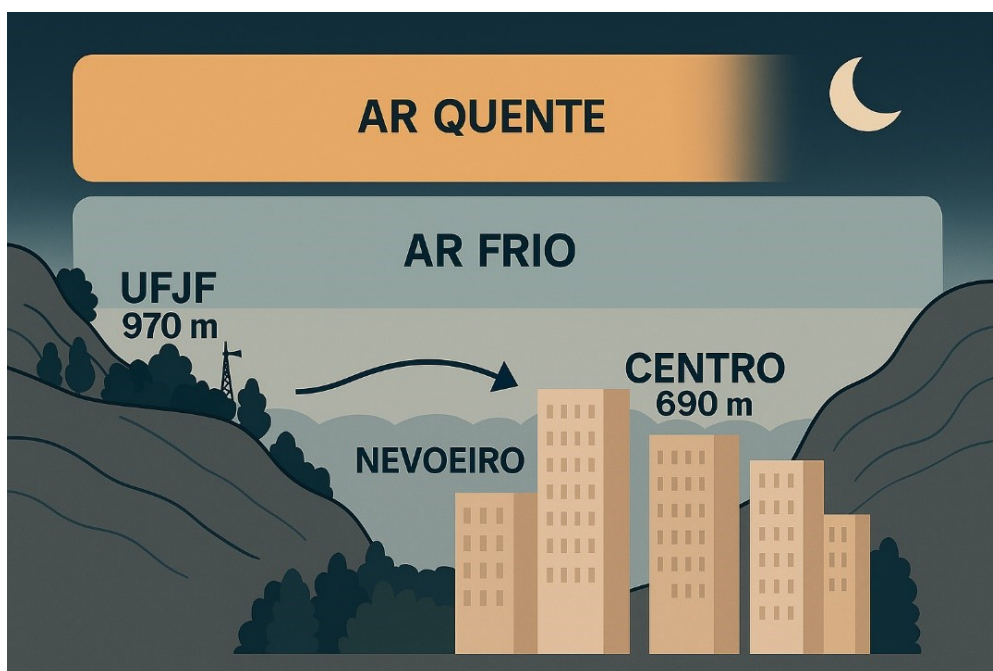
No horário das 3 horas da manhã, momento em que normalmente ocorrem os menores valores de temperatura, os dados demonstraram mais uma vez, forte influência da topografia sobre os padrões de temperatura.

O Ponto 11 (ZCL D), localizado na cota mais elevada da área de estudo, apresentou temperaturas sistematicamente mais altas durante a madrugada, especialmente sob condições de estabilidade atmosférica associadas ao ASAS.

Fisicamente, este fenômeno se caracteriza como uma inversão térmica do tipo radiação, típica de noites claras, com céu limpo e vento fraco, sobretudo no inverno. Durante essas madrugadas, a superfície terrestre perde calor rapidamente por emissão de radiação infravermelha, promovendo o resfriamento acentuado das camadas de ar próximas ao solo.

Este ar frio, mais denso, tende a escoar para as regiões de menor altitude, como os fundos de vales, enquanto as áreas mais elevadas permanecem relativamente aquecidas. (Fig. 42)

Figura 42 - Representação esquemática da inversão térmica noturna em Juiz de Fora – MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

Essa interação entre a dinâmica atmosférica regional e os condicionantes topográficos locais foi amplamente discutida por Romero e Vinagre (1985), ao analisarem o comportamento topoclimático da bacia do rio Mapocho, em Santiago do Chile.

De forma semelhante, Galvani e Lima (2006) também destacaram essa relação no contexto do Parque Nacional de Itatiaia, reforçando a importância dos fatores locais na formação de inversões térmicas. Em ambos os estudos, os autores evidenciaram como a configuração do relevo através das encostas acentuadas, vales profundos e barreiras orográficas, potencializaram os contrastes térmicos na escala topoclimática.

Figura 43 – Temperatura das 9, 15 ,21 e 3 horas da madrugada, entre os dias 13/07/2023 e 15/09/2023.



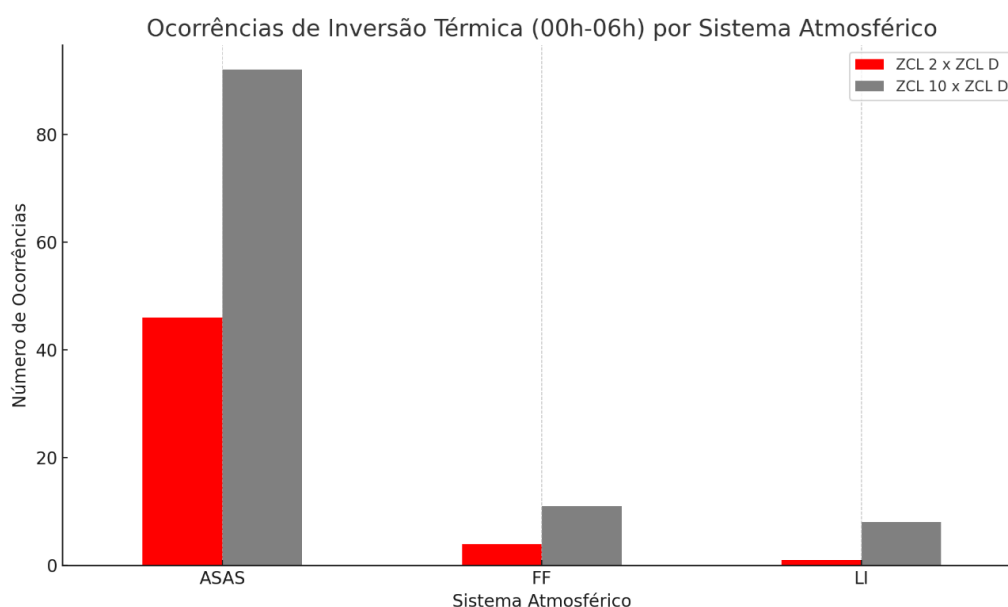
Fonte: Elaborado pela autora.

### 5.4.1 Episódios de Inversão Térmica

Os episódios de inversão térmica foram registradas principalmente nos pontos Ponto 2 (ZCL 2) e Ponto 10 (ZCL 10), ambos localizados em áreas densamente urbanizadas e topograficamente mais baixas, enquanto as áreas de maior altitude e menos urbanizada, sobretudo o Ponto 11 (ZCL D), se manteve mais aquecido.

De acordo com o gráfico de ocorrências de inversão térmica por sistema atmosférico (Fig. 42), podemos visualizar que os episódios de inversão térmica estão predominantemente associados à atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Este sistema de alta pressão favorece condições de estabilidade atmosférica, céu limpo e ventos fracos, que, por sua vez, potencializam o resfriamento radiativo noturno da superfície (Rendón *et al.*, 2014; Yao & Zhong, 2009; Silva *et al.*, 2022). Como consequência, há um acúmulo de ar frio nas regiões de topografia mais baixa, particularmente no vale do Rio Paraibuna, onde se localizam os pontos monitorados.

Figura 44 – Número de Ocorrências de Inversão Térmica por Sistema Atmosférico, considerando os horários entre 00 e 6 horas da manhã nas ZCL 2, ZCL10 e ZCL D.



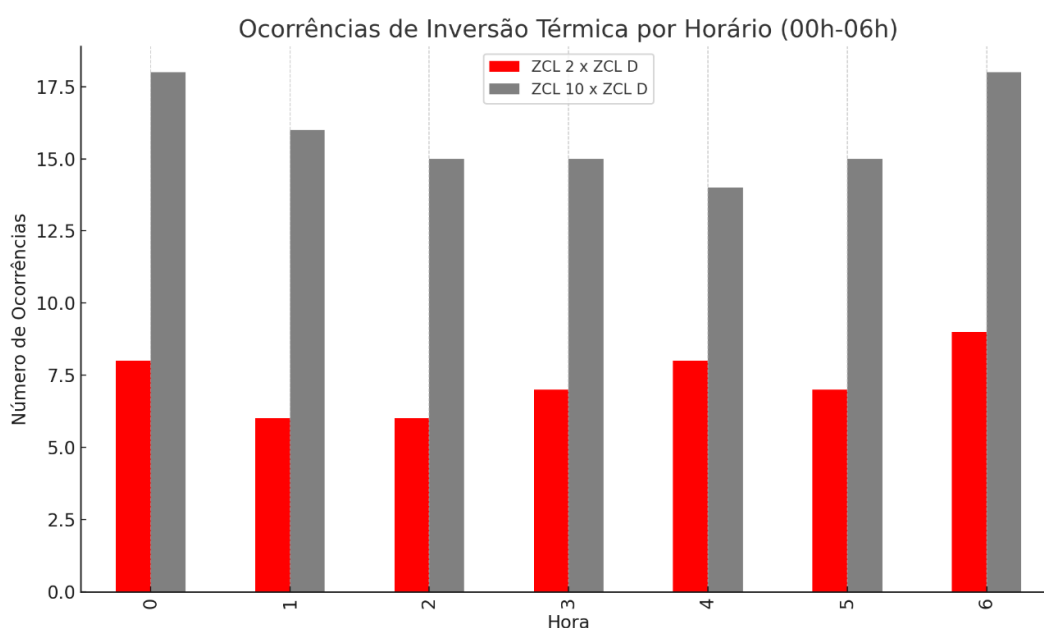
Fonte: Elaborado pela autora.

Embora a maioria dos episódios de inversão térmica tenha ocorrido sob a atuação do ASAS, foram identificadas inversões durante a influência de frentes frias e linhas de instabilidade, ainda que em menor número. De modo geral, o avanço frontal tende a romper a inversão térmica devido à chegada de ar mais frio e ao aumento da turbulência nos baixos níveis da atmosfera.

No entanto, as inversões observadas sob influência dessas condições podem estar associadas a períodos pré-frontais e pós-frontais, em que há maior propensão à estabilização atmosférica, resfriamento radiativo ou mesmo subsidência entre sistemas, processo também descrito por Shi *et al.* (2022), ao destacarem o papel da subsidência na intensificação da estabilidade da camada limite atmosférica.

O fenômeno de inversão, ocorreu de forma recorrente nas madrugadas, sendo particularmente expressivo nos horários de 00h e 06h (Fig. 43), como também foi reportado por Silva *et al.* (2022) em áreas de transição urbano-natural.

Figura 45 – Número de ocorrências de inversão térmica por horário.



Fonte: Elaborado pela autora.

É relevante destacar que o fenômeno se mostrou mais intenso e frequente na comparação entre o Ponto 10 (ZCL 10 – Industrial) e a UFJF (ZCL D), indicando que o bairro industrial apresenta maior susceptibilidade ao acúmulo de ar frio noturno. A inversão mais intensa registrada foi de  $-4,8^{\circ}\text{C}$ , ocorrida no dia 4 de agosto de 2023,

às 04h. No caso do Centro (ZCL 2), o maior episódio observado foi de  $-2,2^{\circ}\text{C}$ , na madrugada de 23 de agosto de 2023, às 04h, também sob influência da ASAS.

Além disso, os dados indicaram que essas inversões não são eventos isolados. Ao contrário, elas ocorrem em séries de dias consecutivos sob influência de sistemas de alta pressão, evidenciando noites com intenso resfriamento nas áreas urbanas mais baixas e também no ponto rural (ZCL B – Monte Verde).

Nessas circunstâncias, verificou-se uma inversão do gradiente térmico vertical, onde áreas tipicamente mais frias, por estarem em maior altitude (como UFJF e Alphaville), mantêm-se relativamente mais aquecidas durante a madrugada.

Outro aspecto relevante é a formação de nevoeiros (Fig.46) nas primeiras horas da manhã, especialmente nas áreas mais baixas da topografia, como o Centro e o Bairro Industrial.

Esses nevoeiros estão diretamente relacionados à saturação do ar próximo à superfície, favorecida pela presença do ar frio e estável aprisionado sob a inversão térmica, condição que reduz a dispersão de poluentes e impacta negativamente a qualidade do ar, como também aumenta o desconforto térmico noturno e acentua as amplitudes térmicas diárias em áreas de menor altitude, tanto urbanas quanto rurais.

Figura 46 – Sequência de fotografias de um episódio típico de nevoeiro e inversão térmica, tiradas a partir da Estação Climatológica da UFJF ( ZCL D).

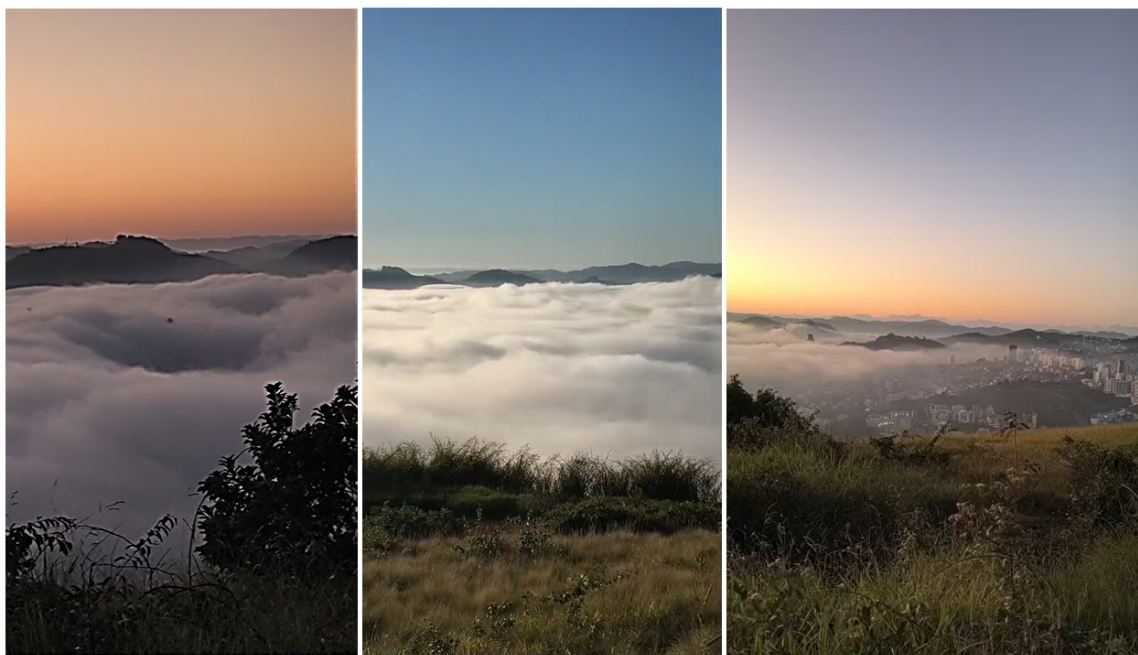


Foto: Andrea Martha

### 5.5 Resultados do segundo trabalho de campo para coleta de dados

A segunda etapa de coleta foi realizada entre os dias 29 e 30 de setembro, com os sensores sendo recolhidos em 13 de novembro de 2023. Para as análises, foram considerados os dados compreendidos entre 1º de outubro e 12 de novembro, totalizando 43 dias de monitoramento contínuo.

O período de monitoramento foi marcado por algumas condições meteorológicas excepcionais, principalmente devido à atuação de um El Niño de forte intensidade. O Índice Oceânico Niño (ONI) registrou valores acima de  $+1,5^{\circ}\text{C}$ , o que demonstrou anomalias consistentes de aquecimento nas águas do Pacífico Equatorial Central (NOAA, 2023).

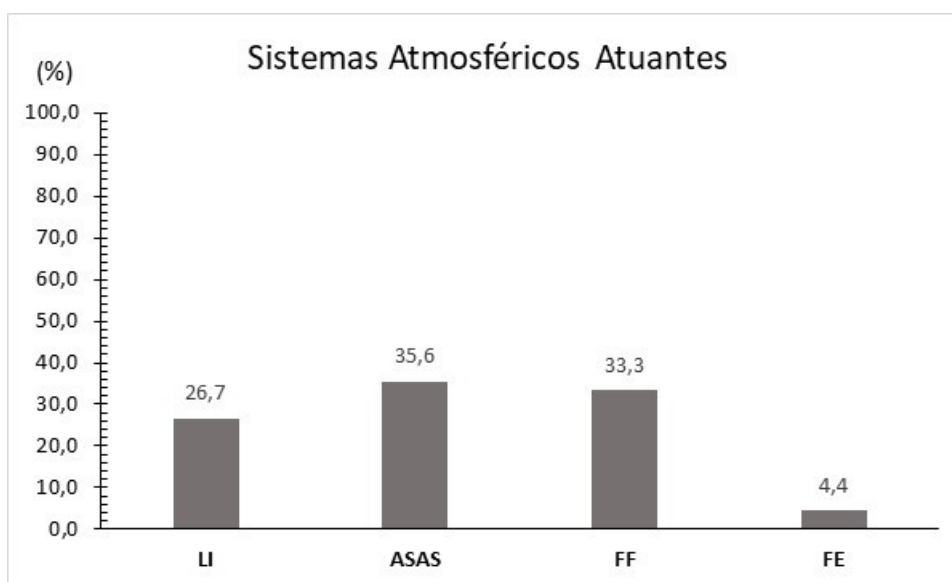
Esse padrão de circulação oceano-atmosférico em macroescala teve um impacto direto na região Sudeste do Brasil, contribuindo para a ocorrência de condições atipicamente quentes. Especificamente em Juiz de Fora, durante o monitoramento, foram observados episódios de onda de calor, intensificados por esse

padrão atmosférico regional. Um desses eventos ocorreu em novembro, levando à emissão de alertas oficiais pelo INMET.

Entre os dias 1 e 31 de outubro foram registrados totais pluviométricos de 315,2 mm, valor muito acima da Normal Climatológica (1991-2020), que é de 117,6 mm, sendo considerado, segundo a Defesa Civil, o terceiro outubro mais chuvoso da história na cidade. Entre os dias 1 e 13 de novembro, o valor pluviométrico registrado foi de 12,6 mm.

De acordo com o gráfico de participação dos sistemas atmosféricos (Fig. 41) e a análise rítmica dos elementos meteorológicos (Fig. 42), é possível observar que o ASAS atuou durante 17 dias (35,6%) do período de monitoramento, enquanto os sistemas frontais, incluindo frentes frias (FF) e frentes estacionárias (FE), estiveram presentes em 17 dias (37,7%). As linhas de instabilidade (LI), por sua vez, foram registradas em 12 dias (26,7%), reforçando a diversidade de sistemas atuantes sobre a região ao longo da realização do monitoramento.

Figura 47 - Sistemas atmosféricos atuantes entre os dias 01/10/2023 e 13/11/2023 em Juiz de Fora- MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise rítmica dos elementos climáticos (Fig. 42) evidenciou que a temperatura do ar apresentou picos recorrentes ao longo de outubro, com elevação

ainda mais expressiva nas duas primeiras semanas de novembro. Tal comportamento é compatível com o predomínio de condições anticiclônicas e com a intensificação das ondas de calor associada à atuação de um El Niño, que favoreceu a manutenção de massas de ar quente e estável sobre o Sudeste brasileiro.

A pressão atmosférica oscilou de acordo com a alternância entre os sistemas atuantes, com elevações sob domínio do ASAS e quedas expressivas associadas à chegada de sistemas frontais. A umidade relativa do ar (UR) apresentou padrão inversamente proporcional à temperatura, com valores mais baixos sob influência do ASAS e elevações pontuais durante episódios de instabilidade.

A precipitação, por sua vez, ocorreu de forma pontual e irregular, concentrando-se em dias específicos. As chuvas observadas estiveram associadas tanto à atividade convectiva local, típica da primavera em áreas de relevo elevado e aquecimento acentuado, quanto à passagem das frentes frias, que atuaram como mecanismos de forçamento dinâmico para a formação de nebulosidade e precipitação.

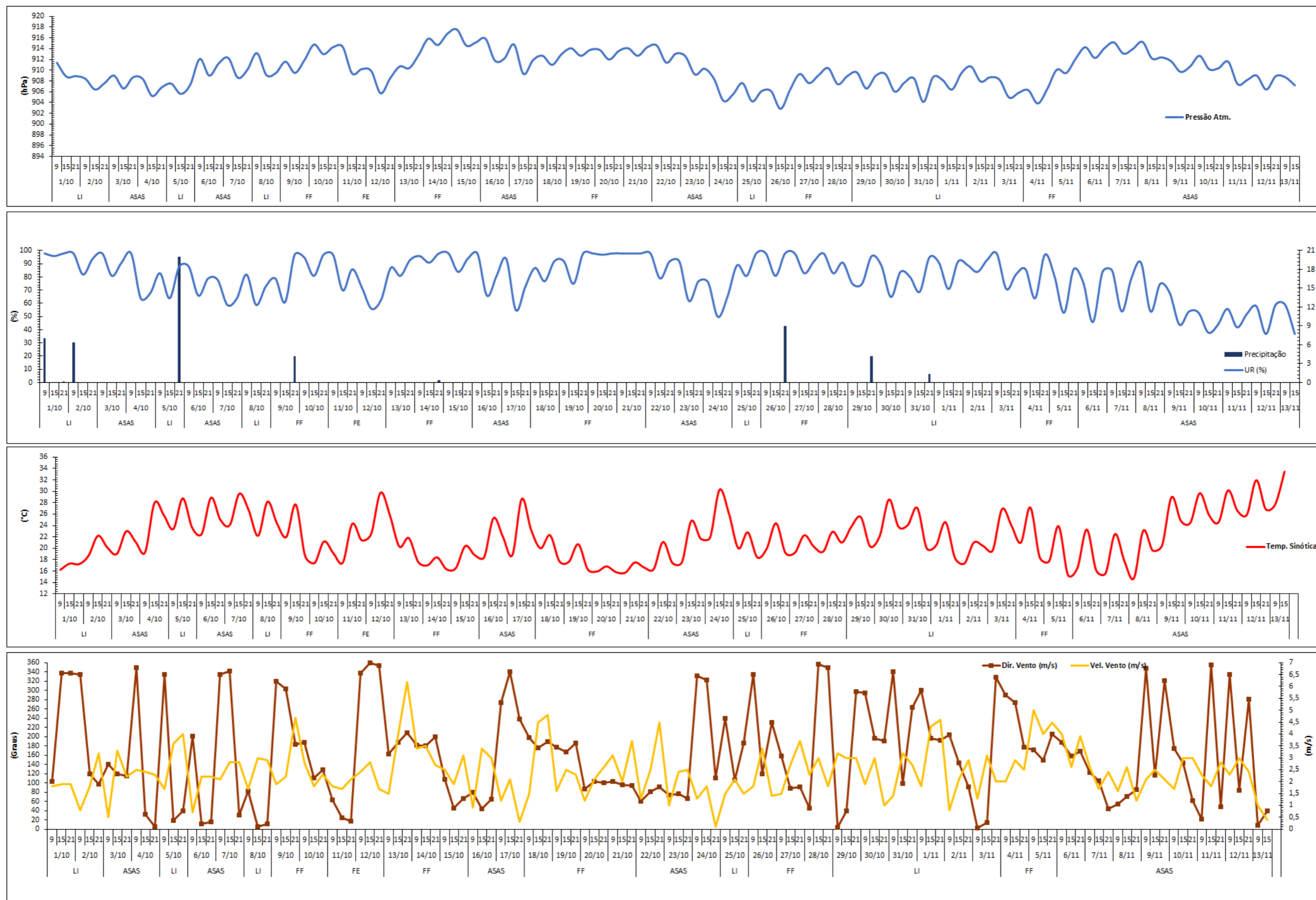
O evento de 5 de outubro se destacou-se por sua severidade: além de registrar 54,6 mm de chuva na estação meteorológica da UFJF (Ponto 11 – ZCL D), foram observadas rajadas de vento superiores a 93 km/h e elevado número de descargas elétricas, caracterizando um episódio de tempo severo amplamente noticiado por pesquisadores e pela mídia<sup>6</sup>.

Em relação ao vento, a velocidade média manteve-se predominantemente moderada, com intensificações nos dias de atuação frontal e em situações de instabilidade atmosférica. A direção do vento mostrou elevada variabilidade, acompanhando a alternância dos sistemas atmosféricos atuantes e reforçando o dinamismo do período.

---

<sup>6</sup> Temporal em Juiz de Fora teve mais de 3 mil raios. <https://encurtador.com.br/vAGTV>  
Fonte: G1 (Zona da Mata)

Figura 48 - Análise Rítmica dos elementos climáticos entre 01/10/2023 e 13/11/2023.



Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme apresentado na Tabela 10, o resumo dos dados médios registrados pelos sensores nas diferentes ZCLs evidenciaram importantes contrastes térmicos intraurbanos. Os valores mais elevados de temperatura média foram registrados nos pontos localizados nas áreas centrais densamente urbanizadas, como o Ponto 3 (ZCL 1) e o Ponto 2 (ZCL 2), que atingiram, respectivamente, 29,6 °C e 24,6 °C. Em seguida, destacaram-se o Ponto 10 (ZCL 10, 24,7 °C), o Ponto 7 (ZCL 8, 24,5 °C) e o Ponto 13 (ZCL 3 – Santa Luzia, 24,2 °C).

Por outro lado, as menores médias térmicas foram observadas nos pontos localizados em áreas com maior altitude e cobertura vegetal, como o Ponto 8 (ZCL 9, 21,6 °C) e o Ponto 11 (ZCL D, 21,6 °C), revelando a atuação de fatores topográficos e morfológicos no amortecimento térmico.

Destaca-se ainda o comportamento térmico extremo do Ponto 3 (ZCL 1), que apresentou não apenas a maior temperatura média, mas também o maior valor de temperatura máxima registrada (46,8 °C) e o maior desvio padrão (5,5 °C), o que evidencia um microclima urbano altamente aquecido e termicamente instável, combinação de fatores locais como elevada verticalização, ausência de áreas verdes, intensa circulação de pessoas e veículos.

Tabela 10 - Valores médios dos sensores instalados nas diferentes Zonas Climáticas Locais (ZCL) entre 01/10/2023 e 13/11/2023.

<b>Ponto de Monitoramento</b>	<b>ZCL</b>	<b>Localização</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Umidade Média (%)</b>	<b>T. Média (°C)</b>	<b>T. Mín. (°C)</b>	<b>T. Máx. (°C)</b>	<b>Amplitude (°C)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
Ponto 1	ZCL 5	Bairro Bom Pastor	810	70,5	22,3	13,7	36,1	22,5	4,4
Ponto 2	ZCL 2	Colégio Apogeu (Centro)	690	70,4	24,6	16,3	39,0	22,7	4,5
Ponto 3	ZCL 1	Museu UFJF (Centro)	685	69,5	25,4	17,2	46,8	29,6	5,5
Ponto 4	ZCL B	Monte Verde (Zona Rural)	720	75,8	23,5	13,2	38,7	25,5	4,8
Ponto 5	ZCL 3	Bairro Jardim de Alá	810	75,5	23,3	13,8	40,5	26,7	5,1
Ponto 6	ZCL 6	Bairro Vivendas da Serra	807	68,6	23,7	14,4	40,2	25,8	5,0
Ponto 7	ZCL 8	Bairro Poço Rico	680	72,5	24,6	15,4	41,2	25,8	5,4
Ponto 8	ZCL 9	Condomínio Alphaville	917	87,2	21,0	12,4	34,2	21,8	4,0
Ponto 9	ZCLG	Represa São Pedro	860	85,8	21,6	13,2	33,9	12,3	4,1
Ponto 10	ZCL 10	Bairro Industrial	698	74,0	24,7	15,1	41,2	26,1	5,2
Ponto 11	ZCL D	Campus UFJF (Martelos)	940	82,8	20,9	12,9	32,7	19,8	3,9
Ponto 12	ZCLA	Jardim Botânico UFJF	775	74,9	21,4	14,0	37,3	23,3	4,8
Ponto 13	ZCL 3	Bairro Santa Luzia	765	71,5	24,6	15,9	41,2	25,3	5,2
Ponto 14	ZCL F	Bairro Bandeirantes	710	83,2	22,6	13,6	36,6	23,0	4,3

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 43 é possível visualizar o comportamento da temperatura do ar nas diferentes ZCLs em função dos sistemas atmosféricos atuantes, nos horários das 9h, 15h e 21h. De forma geral, as maiores temperaturas foram registradas sob a influência do ASAS, enquanto os valores mais baixos ocorreram durante a atuação de sistemas frontais (FF/FE), seguidos pelas linhas de instabilidade. Este padrão evidencia a forte relação entre a dinâmica térmica local e os sistemas de escala sinótica.

No horário das 9 horas da manhã, destaca-se o Ponto 3 (ZCL 1) com temperaturas extremamente elevadas, chegando a 46,8 °C. Esse comportamento pode estar associado a múltiplos fatores locais, como a intensa circulação de veículos, especialmente do transporte coletivo, coincidente com o horário de abertura do comércio, além do aquecimento acelerado das superfícies urbanas expostas à radiação solar nas primeiras horas do dia.

Outro ponto que também apresentou temperaturas elevadas nesse horário foi o Ponto 10 (ZCL 10), cuja configuração urbana marcada por grandes áreas impermeabilizadas, ausência de vegetação e presença de materiais como concreto e cobertura metálica favorece a rápida absorção e retenção de calor. A baixa albedo das superfícies industriais e a reduzida ventilação contribuem para o acúmulo de calor mesmo nas primeiras horas do dia.

É válido ressaltar que esses *outliers* térmicos foram intensificados pelas ondas de calor registradas durante o período de coleta, associadas à atuação de um evento de El Niño de forte intensidade. Esse fenômeno macroclimático, ao elevar anormalmente as temperaturas no Pacífico Equatorial Central, alterou o regime de circulação atmosférica sobre o continente, promovendo condições persistentes de tempo quente e seco no Sudeste do Brasil.

Essa configuração contribuiu para potencializar os efeitos locais da urbanização, intensificando o contraste térmico entre os diferentes tipos de uso e cobertura da terra. Assim, observa-se uma interação multiescalar, em que fenômenos de escala global amplificam as manifestações do clima urbano local.

Durante o período da tarde (15h), o Ponto 3 (ZCL 1) que se destacava no início do dia por apresentar as maiores temperaturas, não se manteve como o mais aquecido. Esse decréscimo relativo pode ser explicado pela ocorrência de sombreamento urbano, proporcionado pela alta verticalização da região central, que reduz a exposição direta à radiação solar no período vespertino. Essa condição limita o acúmulo de calor sensível na superfície, provocando uma inversão no padrão térmico diurno observado nas primeiras horas do dia.

Os Pontos 10 (ZCL 10), Ponto 7 (ZCL 8) e Ponto 13 (ZCL 3 – Bairro Santa Luzia), que se mantiveram entre os mais aquecidos em diversos dias, independentemente do sistema atmosférico atuante. Esses setores urbanos compartilham características morfológicas e funcionais que favorecem o acúmulo de calor, como alta densidade construtiva, presença de coberturas metálicas, superfícies predominantemente impermeáveis e pouca vegetação

Em particular, a ZCL 8 apresentou comportamento térmico expressivamente elevado, com registros superiores a 35 °C em diversos dias, o que pode ser explicado pela presença de galpões de cobertura metálica, grande fluxo veicular e baixa cobertura arbórea. Da mesma forma, a ZCL 3 (Santa Luzia), por sua ocupação residencial densa e carente de áreas verdes, apresentou temperaturas consistentemente altas no horário de pico térmico, refletindo uma elevada capacidade de aquecimento dentro da malha urbana.

Por outro lado, um destaque importante é o Ponto 4 (ZCL B – área rural), que em quase todos os dias monitorados às 15h registrou temperaturas mais elevadas do que a maioria dos pontos urbanos. Essa tendência pode ser atribuída à baixa umidade superficial, à presença de solo exposto e à escassa cobertura vegetal, características que favorecem a conversão direta da radiação solar em calor sensível, intensificando o aquecimento superficial mesmo em ambiente rural.

No entanto, essa condição se inverteu durante os episódios mais intensos de atuação do ASAS, especialmente nos dias com ondas de calor associadas ao El Niño, quando as temperaturas nas ZCLs urbanas atingiram níveis extremamente elevados, superando amplamente os registros da zona rural.

Nesses casos, os efeitos da impermeabilização urbana, da baixa ventilação e do acúmulo térmico em materiais de construção foram potencializados, enquanto o Ponto 4, mesmo exposto e seco, manteve-se relativamente menos aquecido, evidenciando que, sob condições de forte bloqueio atmosférico, o clima urbano pode superar o rural em magnitude térmica.

Às 21 horas, momento que marca o início da noite e a ausência total de radiação solar, a distribuição da temperatura entre os diferentes pontos monitorados passou a refletir mais diretamente a capacidade térmica das superfícies e a eficiência dos processos de resfriamento local. Esse horário é clássico na literatura para a identificação de ilhas de calor urbanas noturnas, pois evidencia o quanto o calor armazenado ao longo do dia persiste no ambiente urbano.

Destacou-se a semelhança de comportamento térmico entre os Pontos 2 e 3, correspondentes às ZCLs 2 e 1, ambas localizadas na área central da cidade. Caracterizadas por elevada verticalização capaz de reter o calor em suas superfícies impermeáveis e liberar lentamente parte desse calor para a atmosfera ajuda a explicar a manutenção de valores superiores a 24 °C em diversas noites, especialmente sob condições de estabilidade atmosférica associadas ao ASAS.

As maiores amplitudes térmicas entre as ZCLs urbanas e a ZCL (rural) observadas durante a atuação do ASAS, foram no dia 24 de outubro, o Ponto 3 (ZCL 1) registrou uma temperatura 5,9 °C superior à do Ponto 4 (ZCL B), enquanto o Ponto 2 (ZCL 2) apresentou uma diferença de 5,3 °C.

Esses valores configuram ilhas de calor atmosféricas de forte magnitude, conforme os critérios estabelecidos por García (1997), consolidando o papel das características morfológicas urbanas na amplificação dos extremos térmicos.

Além das ZCLs centrais, a ZCL 10 (Bairro Industrial), a ZCL 8 (Poço Rico) e a ZCL 3 (Santa Luzia), demonstraram significativa inércia térmica mantiveram temperaturas elevadas durante a noite, com diferenças discretas entre si, reforçando que a impermeabilização, a escassez de áreas verdes e a baixa ventilação são fatores determinantes para o prolongamento do calor nas cidades após o pôr do sol.

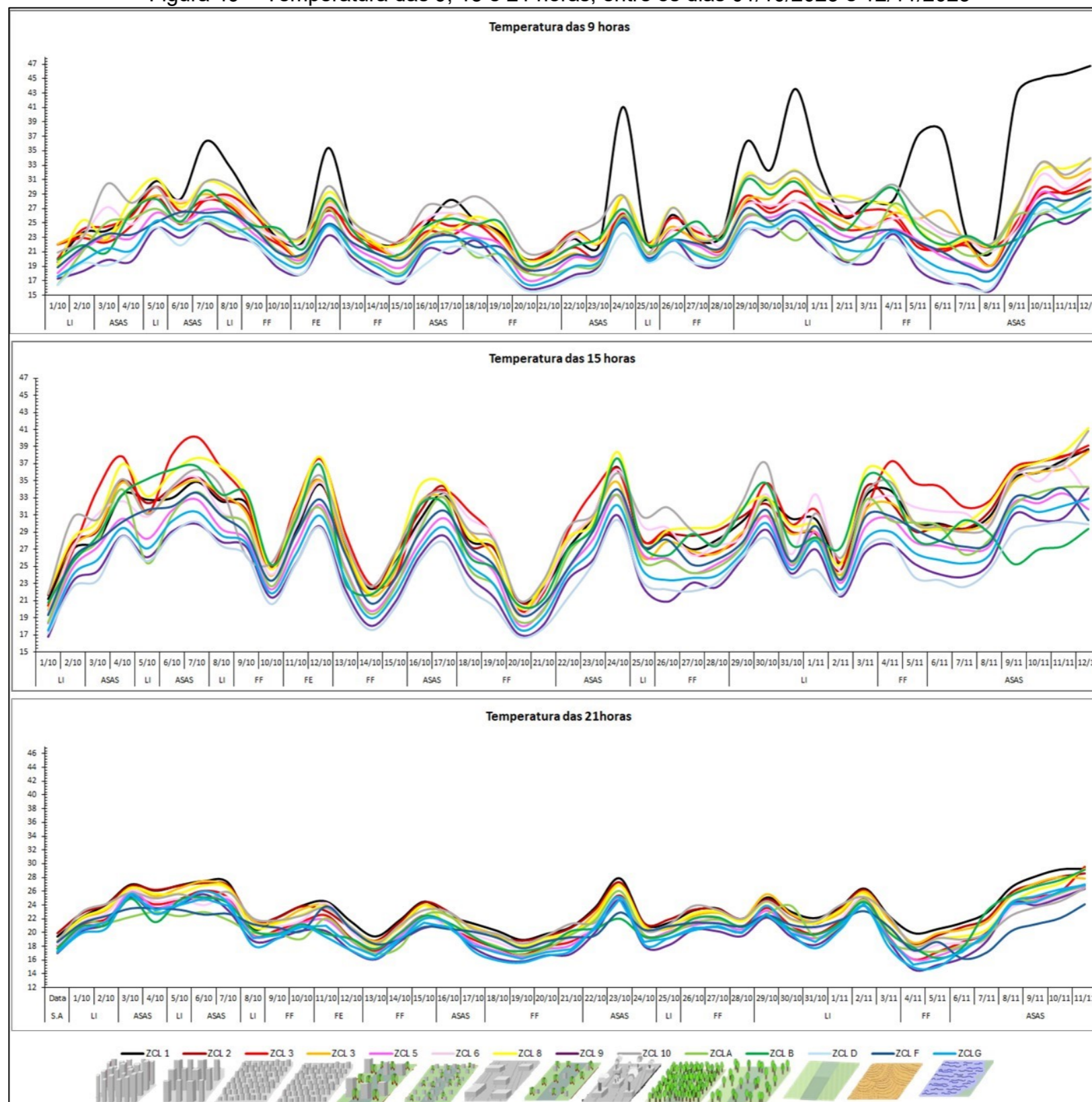
Em contrapartida, ZCLs como a ZCL B (rural), a ZCL 9, e especialmente a ZCL D, apresentaram sistematicamente as menores temperaturas às 21h. Nessas áreas, o resfriamento radiativo noturno é favorecido por uma combinação de fatores como a presença de vegetação, a permeabilidade do solo, a menor densidade construtiva e a ausência de materiais urbanos acumuladores de calor, resultando em respostas térmicas rápidas após o pôr do sol.

A esse grupo de zonas climáticas locais com resfriamento acentuado somam-se também a ZCL G (Represa São Pedro), caracterizada por um ambiente arbóreo, aberto e com presença de lâmina d'água, o que contribui para a moderação térmica e a dissipação de calor; a ZCL A (Jardim Botânico da UFJF), inserida em área de vegetação densa e uso institucional de baixa intensidade; e a ZCL F (Bairro Bandeirantes), que, embora inserida no tecido urbano, apresenta baixíssima densidade edificada, amplos espaços livres e contato com áreas não urbanizadas, favorecendo o resfriamento noturno.

Esses setores funcionam como ilhas de frescor noturnas, reforçando a importância da estrutura ecológica urbana e da topografia na modulação do microclima.

Ao contrário das áreas centrais, que acumulam e retêm calor, essas ZCLs demonstram maior resiliência térmica, respondendo de forma mais equilibrada às oscilações atmosféricas e evidenciando a heterogeneidade térmica intraurbana durante o período noturno.

Figura 49 - Temperatura das 9, 15 e 21 horas, entre os dias 01/10/2023 e 12/11/2023

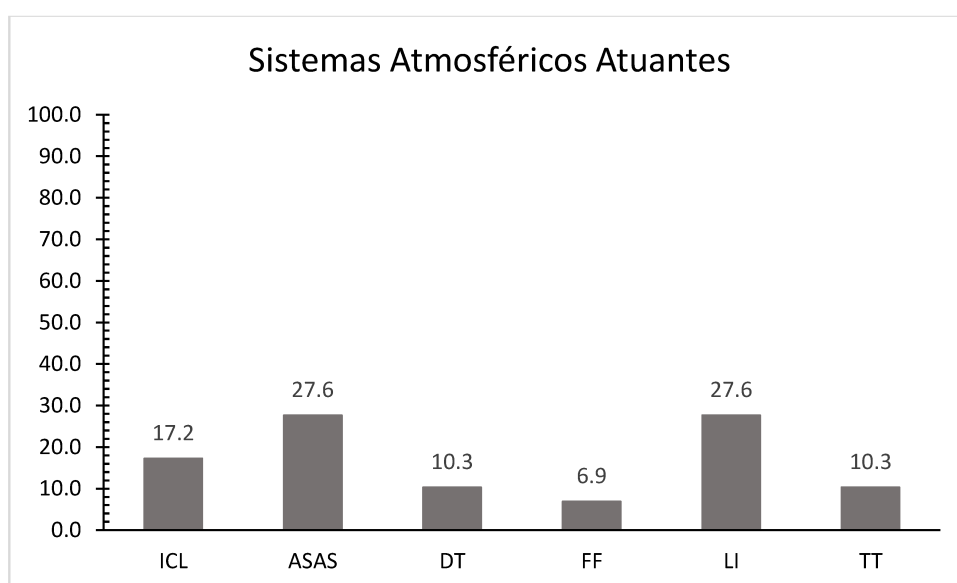


Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.6 Resultados do terceiro trabalho de campo para coleta de dados

Durante a realização do terceiro trabalho de campo, realizado entre os dias 1º e 29 de fevereiro de 2024, foi possível identificar a atuação de diferentes sistemas atmosféricos em Juiz de Fora. De acordo com o gráfico de frequência dos sistemas atuantes (Fig. 50) e a análise rítmica apresentada na Figura 51, observa-se a alternância entre condições atmosféricas estáveis e instáveis.

Figura 50 - Sistemas atmosféricos atuantes entre os dias 01/02/2024 e 29/02/2024 em Juiz de Fora- MG.



Fonte: Elaborado pela autora.

Entre os sistemas promotores de estabilidade, destacaram-se o ASAS, cuja persistência favoreceu a intensificação de episódios de aquecimento mais severo, céu claro e aumento da insolação por alguns dias consecutivos. Por outro lado, também foram observadas atuações de sistemas instáveis, como as Linhas de Instabilidade (LI), além de fenômenos de escala local associados à convecção, característicos do verão, como as Instabilidades Convectivas Locais (ICL), desencadeadas pelo aquecimento da superfície terrestre e pelo conseqüente movimento vertical do ar.

Além disso, ao longo do mês, registrou-se também a atuação de um fenômeno raro, uma Depressão Tropical (DT) que evoluiu para uma Tempestade Tropical (TT), as quais contribuíram para a redução momentânea das temperaturas e o aumento da umidade relativa. Esse sistema de baixa pressão, foi denominado de Akará pela

Marinha do Brasil, e se formou no litoral do estado do Rio de Janeiro a partir do dia 15 de fevereiro (INMET,2024). O sistema intensificou as áreas de instabilidade sobre a região Sudeste, favorecendo a ocorrência de chuvas intensas e rajadas de vento que chegaram a 78 km/h, ocasionando danos estruturais e queda de árvores em diversos pontos da cidade<sup>7</sup>. Esses eventos ressaltam a influência de sistemas atmosféricos transientes, como os ciclones, na modulação da precipitação regional.

Durante o mês de fevereiro foi registrado um total de 293 mm de precipitação, valor aproximadamente 72% acima da média climatológica do mês, que é de 170,3 mm (período de referência: 1991–2020). Até o dia 15, já haviam sido acumulados 108,9 mm, o que representa cerca de 63,9% da média mensal, com registros pontuais de até 54 mm em apenas 24 horas. Esse desvio expressivo em relação à média histórica foi fortemente influenciado justamente pela atuação do ciclone Akará e demais sistemas instáveis ao longo do mês.

A Figura 49, apresenta a análise rítmica dos elementos climáticos, permitindo visualizar a variabilidade diária da temperatura do ar, precipitação, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento. No primeiro gráfico, observa-se a oscilação das temperaturas máximas e mínimas, com tendência de elevação nos primeiros dias do mês e uma queda acentuada após o dia 15, coincidindo com a atuação do ciclone subtropical Akará.

O segundo gráfico evidencia os totais pluviométricos diários, com destaque para os dias 14 e 15, cujos acumulados ultrapassaram os 60 mm, além de oscilações significativas na umidade relativa do ar. A análise integrada dos parâmetros meteorológicos reforça a influência direta dos sistemas atmosféricos identificados sobre as variáveis climáticas locais.

Durante os dias de atuação do ciclone Akará (17 a 21/02), houve intensificação das áreas de instabilidade, com aumento expressivo da precipitação e da umidade relativa do ar, queda da pressão atmosférica, típica de sistemas de baixa pressão, e ventos mais intensos, com registros superiores a 10 m/s e mudanças acentuadas na direção do vento.

---

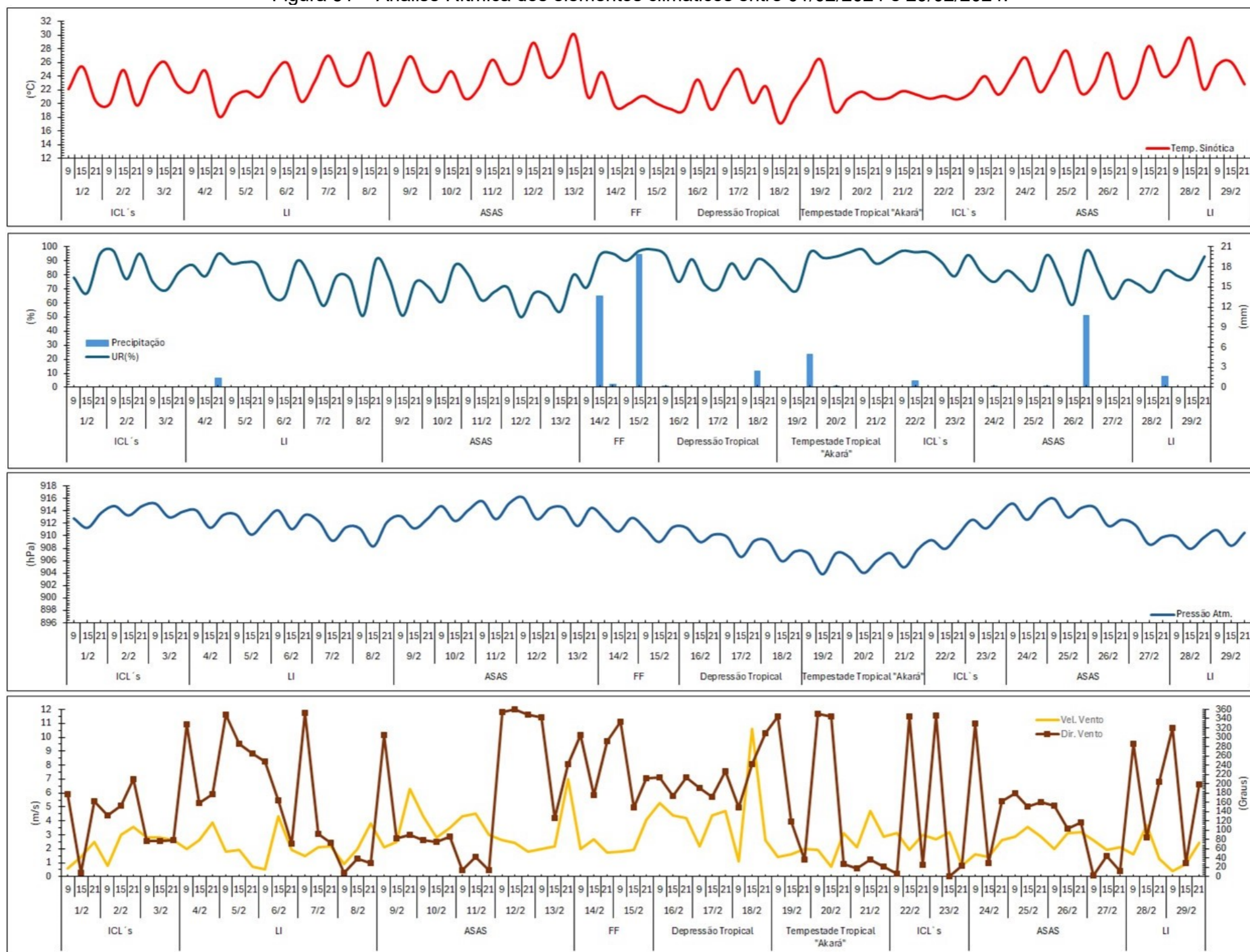
<sup>7</sup> <https://tribunademinas.com.br/noticias/cidade/19-02-2024/chuva-danos-jf.html>

Nesse período, também se verificou a interrupção da elevação térmica, com o declínio nas temperaturas médias. Em contraste, nos períodos sob domínio do ASAS, especialmente entre os dias 10 a 14 e 24 a 27/02, prevaleceram condições de tempo estável, com céu claro, temperaturas mais elevadas, baixa umidade relativa e ventos de menor intensidade.

Já os episódios de Instabilidades Convectivas Locais (ICL), registrados nos dias 1, 2, 22, 23 e 28/02, destacaram-se por serem eventos isolados, porém intensos, de precipitação e aumento da umidade, características típicas de verão e associadas ao aquecimento diurno da superfície.

Esses padrões evidenciaram a atuação conjunta de sistemas atmosféricos transientes e locais na modulação do tempo e do clima em escala urbana, refletindo a complexidade das interações atmosféricas durante o mês analisado.

Figura 51 - Análise Rítmica dos elementos climáticos entre 01/02/2024 e 29/02/2024.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise dos valores médios registrados pelos sensores distribuídos nas diferentes ZCLs durante o mês de fevereiro de 2024, assim como no primeiro e no segundo campo, revelou padrões térmicos diretamente relacionados às características morfológicas, topográficas e funcionais.

A Tabela 11 sintetiza essas informações com base nos valores mínimos máximos e médios de temperatura do ar, umidade relativa, amplitude térmica e desvio padrão, permitindo identificar contrastes significativos no comportamento térmico intraurbano.

Tabela 11 - Valores médios dos sensores instalados nas diferentes Zonas Climáticas Locais (ZCL) entre 01/02/2024 e 29/02/2024.

Ponto de Monitoramento	ZCL	Localização	Altitude (m)	Umi.Média (%)	T. Média (°C)	T. Mín. (°C)	T. Máx (°C)	Amplitude (°C)	Desvio Padrão
Ponto 1	ZCL 5	Bairro Bom Pastor	810	82,6	23,3	17,2	33,4	16,3	3,7
Ponto 2	ZCL 2	Colégio Apogeu (Centro)	690	72,5	25,8	18,7	38,3	19,6	4,1
Ponto 3	ZCL 1	Museu UFJF (Centro)	685	71,7	26,3	19,4	37,8	18,4	4,4
Ponto 4	ZCL B	Monte Verde (Zona Rural)	720	76,9	25,7	16,8	45,4	28,6	5,8
Ponto 5	ZCL 3	Bairro Jardim de Alá	810	79,1	24,7	17,8	36,1	18,4	4,0
Ponto 6	ZCL 6	Bairro Vivendas da Serra	807	69,5	24,6	17,2	38,1	20,9	4,7
Ponto 7	ZCL 8	Bairro Poço Rico	680	73,7	25,8	17,8	37,9	20,1	4,4
Ponto 8	ZCL 9	Condomínio Alphaville	917	89,1	22,0	15,9	30,9	15,0	3,1
Ponto 9	ZCLG	Represa São Pedro	860	90,0	23,5	16,4	33,7	17,3	3,9
Ponto 10	ZCL 10	Bairro Industrial	698	74,9	25,8	16,9	39,4	22,6	4,8
Ponto 11	ZCL D	Campus UFJF (Martelos)	940	85,9	22,0	16,7	30,1	13,4	2,8
Ponto 12	ZCLA	Jardim Botânico UFJF	775	85,7	22,2	15,3	32,9	17,6	4,2
Ponto 13	ZCL 3	Bairro Santa Luzia	765	72,5	25,9	18,0	41,7	23,7	4,9
Ponto 14	ZCL F	Bairro Bandeirantes	710	84,3	23,9	17,3	30,7	13,4	2,9

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim como ocorreu durante o segundo campo (out/nov), as ZCLs com maior temperatura média do ar no mês foram, majoritariamente, aquelas com maior densidade construtiva, baixa cobertura vegetal, intensa impermeabilização do solo, e localizadas nas menores altitudes.

A ZCL 1 e 2, correspondente as áreas verticalizadas e centrais, juntamente com as ZCL 3(Santa Luzia), ZCL 8 e ZCL 10 apresentaram as temperaturas médias mais elevadas do período.

A ZCL B, se destacou pela média mais alta (25,7°C), associada à maior amplitude térmica média entre todas as zonas (25,6 °C). Esse padrão reflete a intensa

exposição à radiação solar durante o dia, favorecida pela ausência de sombreamento e presença de solo exposto e pastagens nos arredores. À noite, a perda de calor se torna mais acentuada em função da baixa capacidade térmica dos materiais naturais e da reduzida concentração de poluentes e aerossóis, fatores que contribuem para um resfriamento radiativo mais eficiente.

Por outro lado, as ZCLs com menores temperaturas médias foram aquelas associadas a vegetação densa, menor adensamento e maior altitude. A ZCL D (Campus da UFJF, 940 m) e a ZCL 9( Condomínio Alphaville, 917 m) tiveram a menor média mensal (22,0°C). Seguida da ZCL G (Jardim Botânico da UFJF, 775 m) com 22,2 °C, e ZCL G (Represa São Pedro, 860 m) com 23,9 °C.

Esses valores foram acompanhados de menores amplitudes térmicas (entre 13,4 °C e 17,6 °C) e baixos desvios padrão, reforçando a estabilidade térmica proporcionada por áreas vegetadas, com menor densidade construtiva e solos mais permeáveis. Os maiores índices de umidade relativa também foram observados nessas ZCLs confirmando a relação entre cobertura vegetal, umidade e conforto térmico.

A figura 52, ilustra o comportamento da temperatura do ar registrada às 9h, 15h e 21h, permitindo identificar padrões térmicos distintos no espaço urbano em função do horário e da dinâmica atmosférica. A comparação entre os três gráficos de linha demonstra como o aquecimento, o pico térmico e a dissipação do calor variam de acordo com a morfologia urbana, o uso e cobertura da terra, e a atuação dos sistemas sinóticos.

O gráfico das 9h mostrou que a ZCL B, apresentou valores de temperatura do ar excepcionalmente elevados logo nas primeiras horas do dia, principalmente sob a atuação do ASAS. Esse comportamento confirma que a localização em zona rural não garante, por si só, condições térmicas mais amenas. Esse resultado encontra respaldo em Jardim e Galvani (2022), que destacaram que certas formações de cerrado, localizadas fora do meio urbano, podem apresentar temperaturas elevadas similares às registradas em áreas urbanas durante o dia.

As ZCLs 1, 2, 3 (Santa Luzia) e 8 e 10 apresentaram valores elevados, repetindo o comportamento similar ao observado durante o segundo campo.

Por outro lado, as ZCLs 3 (Jardim de Alá), ZCL 5 (Bom Pastor), ZCL 9 (Alphaville), ZCL A (Jardim Botânico da UFJF), ZCL D (UFJF) e ZCL G (Represa São Pedro), apresentaram temperaturas mais baixas, reflexo da altitude e presença de vegetação, funcionando como refúgios térmicos.

Durante a atuação de frentes frias (como as dos dias 14 e 15/2) foi observada a redução da temperatura em todas as ZCLs.

O gráfico das 15h evidenciou os maiores contrastes térmicos entre as ZCLs, com destaque para as ZCLs 3, 8 e 10, que frequentemente registraram temperaturas superiores a 35 °C, especialmente no dia 13 de fevereiro, sob forte influência do ASAS. Por outro lado, as ZCLs 1 e 2 nem sempre se apresentaram como as mais aquecidas nesse horário, devido ao sombreamento promovido pela própria verticalização urbana. Esse efeito de sombreamento reduz a incidência direta de radiação solar nas superfícies, atenuando o aquecimento em determinados trechos densamente edificadas, sobretudo no período da tarde.

O gráfico das 21h indica uma aparente homogeneização térmica entre as ZCLs. No entanto, as ZCLs mais urbanizadas continuaram mantendo temperaturas mais elevadas do que as ZCLs menos adensadas.

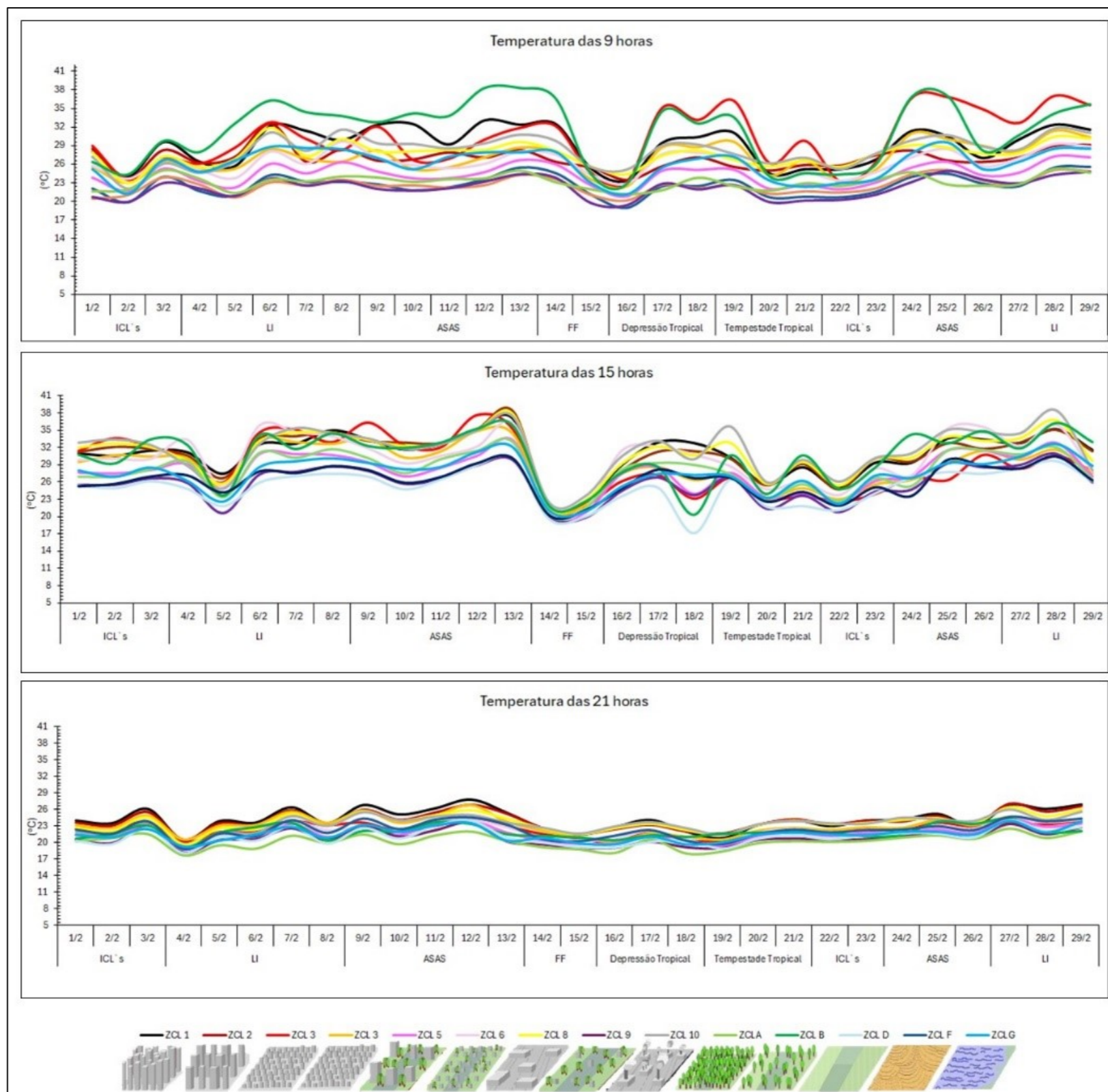
A análise dos dados tabulares confirma esse padrão. Em 12/2, por exemplo, ZCL 1 apresentou 27,8 °C às 21h, enquanto ZCL A registrou apenas 22,0 °C. Em 27/2, ZCL 2 alcançou 27,0 °C, ZCL 1, 26,8 °C e ZCL 3, 26,5 °C — valores altos para o período noturno. Por outro lado, ZCL A manteve 22,6 °C e ZCL F, 24,6 °C.

Com base em dias representativos, calculou-se a intensidade média da ilha de calor entre as ZCLs urbanas e as vegetadas. Os valores variaram entre 2,4 °C e 4,8 °C, com uma média geral de 3,29 °C. Esse valor evidencia a persistência de calor nas zonas densamente construídas, resultado da elevada capacidade térmica dos materiais urbanos e da baixa eficiência de resfriamento por evapotranspiração e ventilação.

A análise comparativa dos três horários demonstra que o comportamento térmico intraurbano é dinâmico e sensível tanto à estrutura urbana quanto à atuação dos sistemas atmosféricos. O período da tarde representa o pico térmico e o momento de maior contraste entre as ZCLs. Já o período noturno revela a inércia térmica das zonas urbanas e a atuação clara da ilha de calor. O horário matinal mostra como as zonas urbanas acumulam e reemitem rapidamente o calor absorvido no dia anterior.

As ZCLs com menor densidade, maior vegetação e localização mais elevada (ZCL D, ZCL A, ZCL F) atuam como reguladores térmicos naturais, apresentando menores temperaturas médias e maior resiliência frente a extremos. Em contrapartida, as zonas urbanizadas (ZCL 1, ZCL 2, ZCL 3, ZCL 8 e ZCL 10) se configuram como núcleos de aquecimento persistente, impactando diretamente no conforto térmico urbano, na saúde pública e na demanda energética.

Figura 52 - Temperatura das 9, 15 e 21 horas, entre os dias 01/02/2024 e 29/02/2024.



Fonte: Elaborado pela autora.

## 5.7 Comportamento Térmico das Zonas Climáticas Locais nos diferentes tipos de tempos

Nesse tópico serão apresentados gráficos de dispersão das ZCLs em função da temperatura média (°C) e da altitude (m), sob diferentes sistemas atmosféricos. Primeiramente foram confeccionados gráficos com as médias térmicas encontradas em diferentes sistemas atmosféricos, tanto para o campo realizado no período da primavera (01/10 a 13/11/2023) quanto para o período do verão (01/02/2024 a 29/02/2024). Em seguida serão apresentados gráficos de dias representativos de cada sistema atmosférico no horário das 21 h, com o objetivo de comparar o fenômeno das ilhas de calor no período da primavera e do verão.

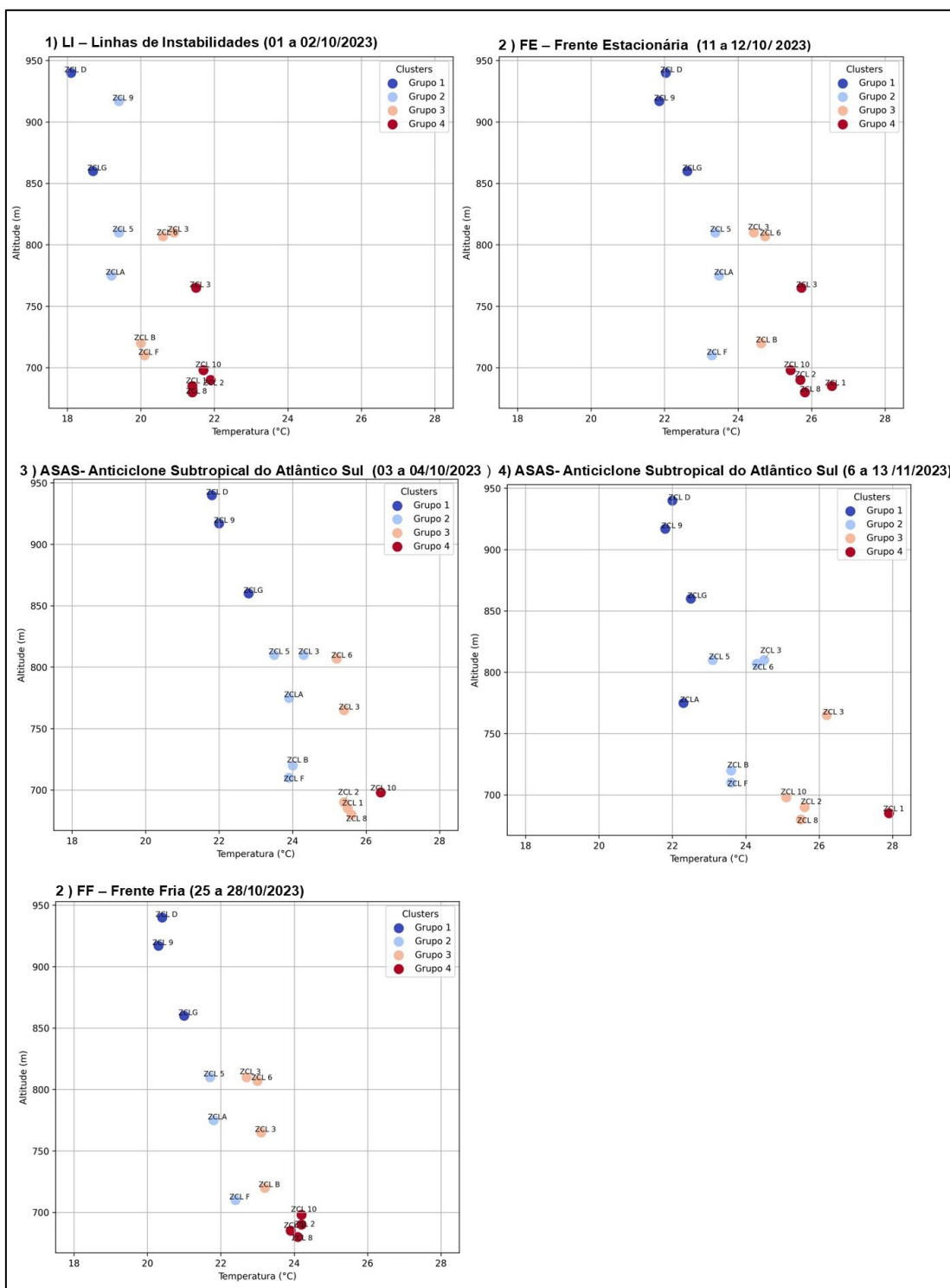
A figura 53, mostra um padrão consistente de estratificação térmica em que de maneira recorrente, as ZCL 1, 2, 8 e 10 destacaram-se como os núcleos mais quentes do ambiente urbano, integrando majoritariamente o Grupo 4. Essas áreas apresentam características de maior densidade construtiva e baixa altimetria, o que favorece a retenção de calor. Por outro lado, as zonas ZCL 9, ZCL D e ZCL G, situadas em cotas elevadas e com menor grau de urbanização, mantiveram-se como as mais frias ao longo de todos os episódios.

Este comportamento foi amplificado sob a atuação do ASAS, nos episódios de 03 a 04/10/2023 e 06 a 13/11/2023. Nesses eventos, ZCL 1 e ZCL 10 foram isoladas no grupo mais quente (Grupo 4), evidenciando um acúmulo térmico desproporcional. O isolamento dessas zonas nos agrupamentos mais quentes está diretamente associado à estabilidade atmosférica promovida pelo ASAS, que reduz a ventilação e impede a mistura vertical, favorecendo o acúmulo de calor em áreas urbanas densas e de baixa altitude. Esse comportamento foi identificado de forma clara pelo algoritmo de clusterização, que não encontrou outras zonas com características suficientemente semelhantes para compor o mesmo grupo.

Nos demais sistemas analisados, como Linhas de Instabilidade (LI), Frente Estacionária (FE) e Frente Fria (FF), o padrão altitudinal permaneceu evidente, mas com menor intensidade de isolamento térmico. As frentes frias, em particular,

promoveram uma redução do contraste térmico entre as zonas, indicando o efeito moderador das massas de ar frio.

Figura 53 - Gráficos de dispersão da temperatura média nas Zonas Climáticas Locais, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos entre outubro e novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 54, ilustra o comportamento térmico médio das ZCLs durante o mês de fevereiro de 2024. As temperaturas médias variaram entre 17,5 °C e 28,5 °C, com destaque para as ZCLs 1, 2, 3, 8 e 10, que estiveram recorrentemente entre os grupos mais quentes ao longo dos eventos analisados. Essa persistência térmica pode ser atribuída à tipologia urbana predominante nessas zonas: elevada densidade construtiva, reduzida presença de vegetação e maior proporção de superfícies expostas à radiação solar.

Nesse contexto, a ZCL B merece atenção. Embora classificada como zona rural, apresentou comportamento térmico similar ao das zonas urbanizadas, mantendo-se entre os grupos mais aquecidos. Esse resultado pode ser parcialmente explicado pela utilização da média diária como métrica de agrupamento, já que, durante o período da manhã, sobretudo em dias estáveis essa área registrou valores elevados de temperatura, influenciando significativamente os dados consolidados.

Por outro lado, as ZCLs 9, D e G, situadas em altitudes mais elevadas, mais uma vez permaneceram predominantemente entre os grupos mais amenos, evidenciando o papel da topografia como importante modulador climático local. A combinação entre elevação, cobertura vegetal e menor densidade urbana contribui para a atenuação das variações térmicas, mesmo sob condições sinóticas mais intensas. No caso específico da ZCL G, a proximidade da Represa São Pedro potencializa esse efeito moderador, atuando como regulador térmico adicional devido à elevada capacidade térmica da água e aos processos de evaporação que reduzem o aquecimento diurno.

A ZCL A, de altitude intermediária, também apresentou comportamento térmico ameno ao longo dos eventos analisados, tal comportamento é atribuído ao fato de corresponder ao Jardim Botânico da UFJF, uma área com elevada cobertura vegetal e atenuação térmica promovida pela presença contínua de sombreamento, alta umidade do solo e reduzido albedo das superfícies. Assim, mesmo em situações de estabilidade atmosférica, tende a manter-se entre os grupos mais amenos, evidenciando o papel crucial da vegetação no microclima urbano.

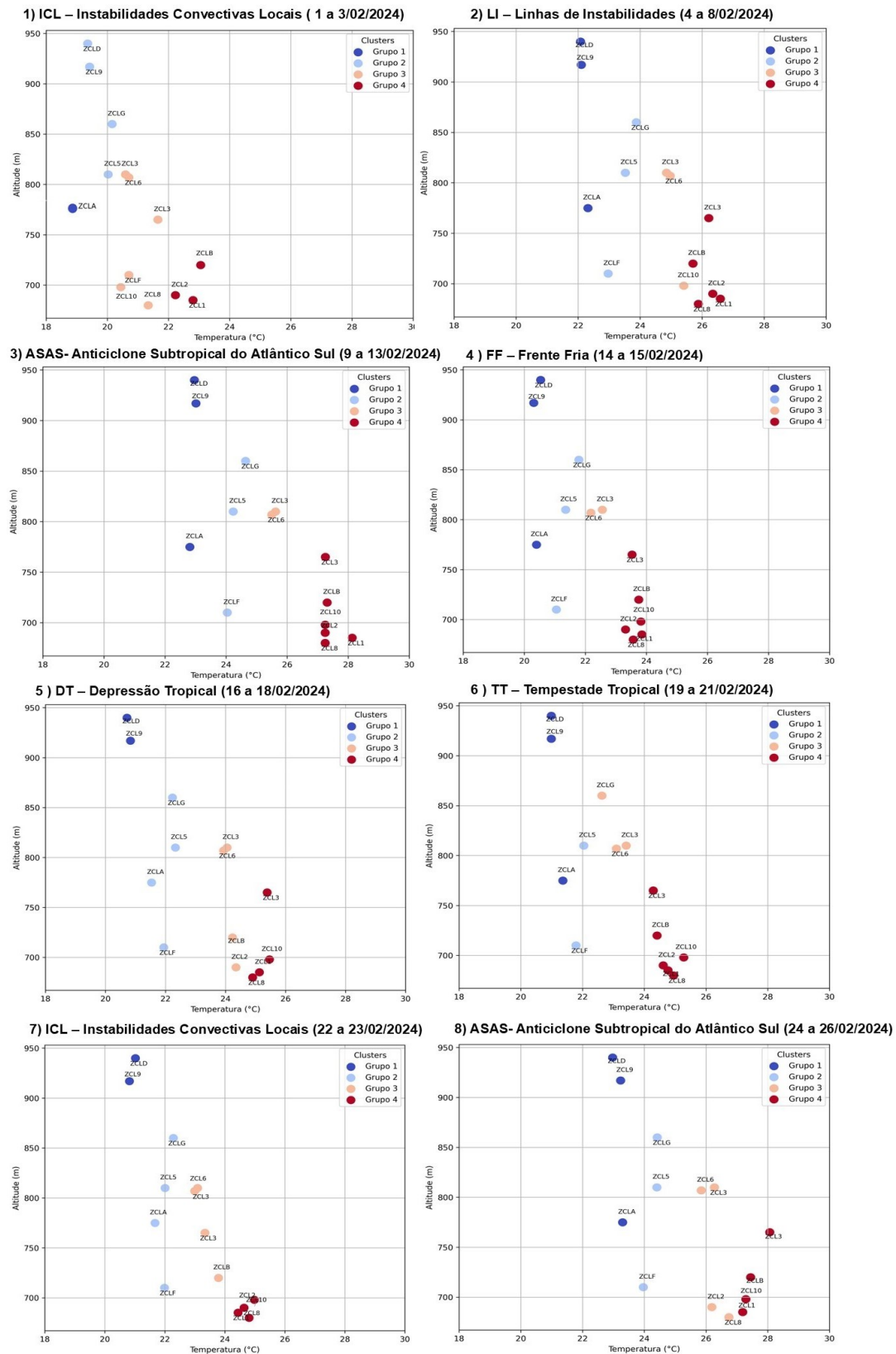
Nos sistemas de atuação mais prolongada e estável, como o ASAS ocorreu um acentuado contraste entre os grupos: enquanto o Grupo 1, permaneceu nas zonas naturais de maior altitude (ZCL D, ZCL 9, G), com temperaturas entre 22 °C e 24 °C, o Grupo 4 concentra-se novamente nas zonas urbanizadas baixas, agora com valores médios superiores a 27 °C. Isso evidencia o papel amplificador do ASAS sobre o efeito de aquecimento urbano, uma vez que a ausência de nebulosidade e precipitação permite maior acúmulo de calor nas superfícies urbanas.

Nos episódios de Frente Fria (FF), verificou-se maior homogeneização térmica entre as ZCLs, com a maioria agrupada entre 20,5 °C e 23,5 °C. Apesar de as zonas mais densas ainda figurarem entre as mais quentes, o gradiente térmico entre os grupos foi consideravelmente reduzido, corroborando o efeito mitigador das frentes frias sobre o campo térmico urbano.

Durante os eventos de Depressão Tropical (DT) e Tempestade Tropical (TT), observou-se um comportamento intermediário. A influência altimétrica manteve-se presente, embora a separação entre os grupos tenha sido menos marcada do que nas frentes frias. Isso se deve à variabilidade térmica promovida pela cobertura de nuvens e pelas precipitações intermitentes, típicas desses sistemas.

É importante ressaltar que os valores analisados correspondem às temperaturas médias diárias registradas durante a atuação de cada sistema atmosférico, o que naturalmente suaviza extremos e comportamentos pontuais captados em escalas horárias. Ainda assim, os padrões espaciais persistentes e as diferenças de amplitude entre os episódios revelam como os sistemas sinóticos, ao interagirem com a morfologia urbana e o relevo local, estruturam o clima intraurbano de Juiz de Fora.

Figura 54 - Gráficos de dispersão da temperatura média nas Zonas Climáticas Locais, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos em fevereiro de 2024.

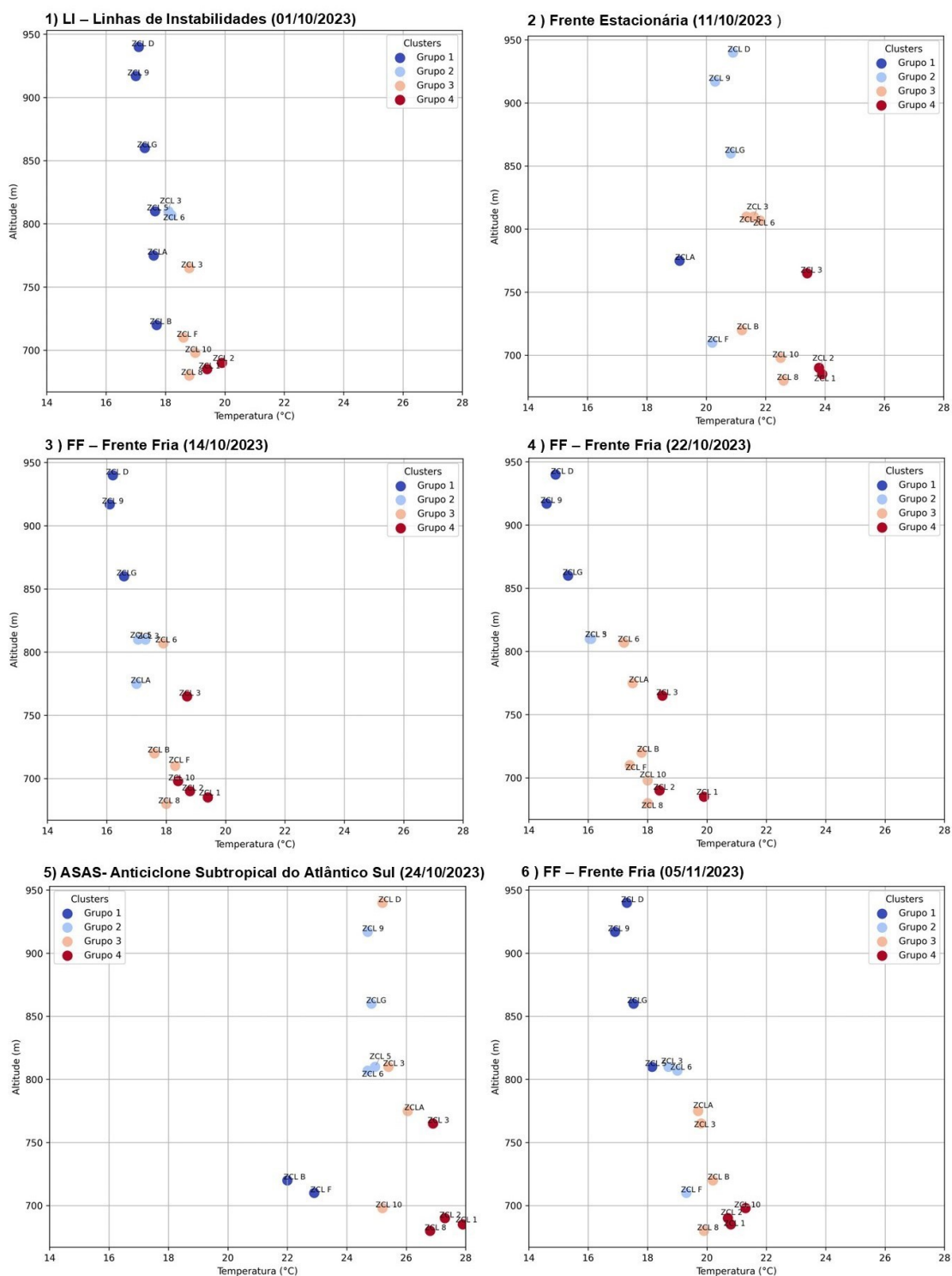


Fonte:

Elaborado pela autora.

A figura 55 , ilustra o comportamento térmico das Zonas Climáticas Locais às 21h em dias representativos do mês de outubro e novembro.

Figura 55 - Gráficos de dispersão das Zonas Climáticas Locais às 21 horas, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos em outubro e novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pela autora.

De modo geral, as ZCLs densamente urbanizadas, como ZCL 1, ZCL 2 e ZCL 10, localizadas nas menores altitudes, mantiveram-se sistematicamente entre os clusters mais quentes, caracterizando núcleos persistentes de ilhas de calor urbanas noturnas. Em contrapartida, zonas localizadas em áreas mais elevadas e com maior presença de vegetação e solo permeável, como ZCL 9, D, G, A e F, concentraram-se nos grupos mais frios, atuando como ilhas de frescor noturnas, especialmente sob condições atmosféricas estáveis, como nos dias de atuação do ASAS.

Durante a atuação do ASAS (24/10/2023), observa-se que o padrão térmico esperado, em que as temperaturas diminuem com o aumento da altitude, foi parcialmente suplantado. As ZCLs situadas em altitudes elevadas, como ZCL 9 e ZCL D, apresentaram temperaturas superiores a 26 °C, superando pontos em altitudes mais baixas. Isso indica que o sistema atmosférico atuante exerceu maior influência sobre a distribuição térmica do que o fator altimétrico, provavelmente em função da subsidência típica do ASAS, que intensifica o aquecimento em áreas elevadas.

Por outro lado, durante a atuação de frentes frias (14/10, 22/10 e 05/11) e linhas de instabilidade (01/10), verificou-se uma homogeneização térmica entre as ZCLs, com redução dos contrastes espaciais e predomínio de temperaturas entre 18 °C e 22 °C. Nesses casos, o resfriamento noturno foi mais eficaz, especialmente nas ZCLs situadas em cotas mais elevadas (como D e G), sugerindo a influência marcante do gradiente altimétrico sob condições pós-frontais. A presença de nebulosidade remanescente e trocas advectivas típicas das instabilidades também contribuiu para moderar o resfriamento radiativo e suavizar os extremos térmicos intraurbanos.

Um aspecto notável diz respeito à diferenciação térmica entre as unidades classificadas como ZCL 3. Apesar de compartilharem a mesma tipologia construtiva, a diferença de altitude entre elas resultou em regimes térmicos noturnos contrastantes. A ZCL 3 localizada em Santa Luzia, situada em cota mais elevada (790 m), registrou temperaturas consistentemente mais baixas do que sua contraparte em altitudes menores, reforçando o papel da topografia como modulador do microclima urbano, mesmo em áreas com características morfológicas semelhantes. Tal observação está em consonância com os achados de Richard et al. (2018) em Dijon e Masiero e Souza (2018) em São José do Rio Preto, que destacaram a relevância

da altimetria para a variabilidade térmica intra-classe em cidades com relevo acentuado.

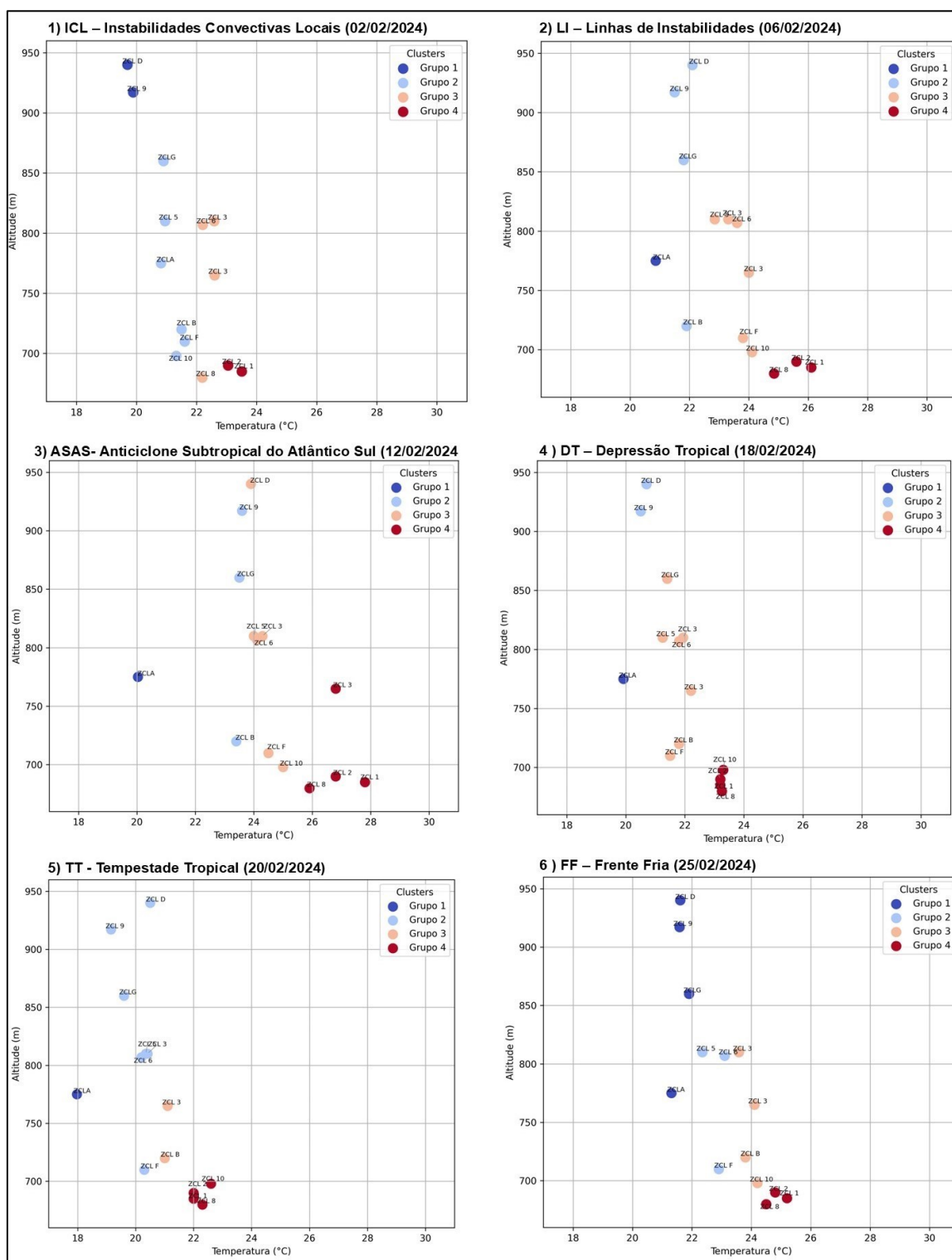
Em eventos de frente estacionária, como o de 11/10, as temperaturas noturnas se mantiveram relativamente elevadas em praticamente todas as ZCLs. Essa condição está associada à limitação das trocas verticais e à elevada umidade atmosférica, típicas de configurações de bloqueio, resultando em resfriamento ineficiente e persistência do calor acumulado ao longo do dia.

Em síntese, os resultados demonstram que a configuração térmica noturna em Juiz de Fora reflete a complexa interação entre morfologia urbana, relevo e tempo atmosférico atuante. ZCLs mais densas e de baixa altitude tendem a manter-se aquecidas à noite, enquanto áreas mais arborizadas e elevadas promovem o resfriamento, sobretudo em condições atmosféricas mais instáveis.

Entretanto, exceções como ZCL B, ZCL G e as variações entre as unidades da ZCL 3 evidenciam que fatores como umidade do solo, presença de corpos d'água e urbanização recente também exercem influência significativa, reforçando a importância de análises sistêmicas para compreensão das dinâmicas térmicas urbanas.

A figura 56 ilustra os agrupamentos térmicos das Zonas Climáticas Locais para as 21 horas, durante o mês de fevereiro de 2024.

Figura 56 – Gráficos de dispersão das Zonas Climáticas Locais às 21 horas, sob diferentes tipos de sistemas atmosféricos para o mês de fevereiro de 2024.



Fonte: Elaborado pela autora.

De modo geral, independentemente do sistema sinótico predominante, observa-se que as ZCLs mais densamente urbanizadas e situadas em áreas de menor altitude, como as ZCL1, 2, 8 e 10, apresentam sistematicamente as temperaturas mais elevadas no período noturno, agrupando-se nos clusters mais quentes (Grupo 4).

Esse comportamento é típico do efeito de ilha de calor que se intensifica em áreas com elevado grau de impermeabilização do solo, baixa ventilação, e alta retenção de calor pelas superfícies construídas (Stewart & Oke, 2012; Bechtel et al., 2015).

A ausência de cobertura vegetal e a geometria urbana complexa (com baixo *sky view factor*) dificultam o resfriamento radiativo noturno, resultando na manutenção de temperaturas elevadas mesmo após o pôr do sol.

Em contrapartida, as ZCLs naturais, como as ZCL D e G, localizadas em áreas mais elevadas e vegetadas, mantêm-se sistematicamente nos clusters mais frios (Grupo 1), com temperaturas abaixo de 22 °C em praticamente todos os sistemas analisados.

A altitude exerce um papel moderador constante, promovendo o resfriamento do ar pela expansão adiabática, além de favorecer maior perda de calor radiativo em superfícies vegetadas com alta umidade do solo (Brousse et al., 2016; Crétat et al., 2024).

Essa configuração evidencia a relevância das variáveis topográficas e de cobertura da terra na modulação térmica noturna do espaço urbano, contribuindo para a manutenção de microclimas mais amenos nas áreas periféricas ou preservadas.

A análise por sistema atmosférico revela diferenças importantes na magnitude e na dispersão térmica entre as ZCLs. Durante a atuação do ASAS, observou-se o maior contraste térmico entre as zonas, com as áreas urbanas atingindo temperaturas próximas a 28 °C, enquanto as naturais mantiveram-se abaixo de 21 °C.

Essa diferença de até 7 °C caracteriza episódios clássicos de ilha de calor e reflete a estabilidade atmosférica imposta pelo ASAS, que reduz a ventilação noturna e potencializa o acúmulo de calor absorvido durante o dia, reforçando a persistência do fenômeno.

O agrupamento térmico das zonas urbanas nos clusters mais quentes sob esse sistema sinótico é particularmente evidente e compatível com o que se espera da atuação de sistemas de subsidência e céu limpo.

Nos episódios de instabilidade, como nas Instabilidades Convectivas Locais (ICL) e nas Linhas de Instabilidade (LI), há uma ligeira atenuação do contraste térmico, mas as ZCLs urbanas ainda se mantêm notoriamente mais quentes. A presença de umidade e a formação de nuvens associadas a esses sistemas tendem a limitar a perda de calor por radiação nas zonas naturais, elevando sutilmente suas temperaturas noturnas.

Ainda assim, a hierarquia térmica entre as zonas se preserva, com agrupamento coerente entre urbanas quentes e naturais frias, e a ilha de calor permanece diagnosticável, embora com menor intensidade.

Durante a atuação de sistemas tropicais, como Depressão Tropical (DT) e Tempestade Tropical (TT), nota-se uma compressão térmica entre os grupos. A elevada nebulosidade e a umidade atmosférica reduzem a amplitude térmica diária, impedindo tanto o aquecimento intenso das zonas urbanas quanto o resfriamento eficiente das zonas naturais.

No entanto, as diferenças estruturais entre as ZCLs seguem determinando padrões de temperatura distintos, com as zonas densamente construídas permanecendo entre os clusters mais quentes, ainda que em valores mais modestos. Nesses casos, as ilhas de calor são menos intensas, mas continuam presentes, revelando a resiliência térmica das áreas urbanas.

Finalmente, sob a influência de frentes frias, as temperaturas noturnas se homogeneízam de forma mais acentuada, o que reflete a entrada de ar mais frio e a nebulosidade associada. Mesmo assim, observa-se que as ZCLs urbanas de baixa altitude continuam sendo as mais quentes, ainda que com valores próximos aos das zonas intermediárias.

Esse comportamento destaca que, embora os sistemas frontais tenham capacidade de mitigar o efeito da ilha de calor, eles não anulam as diferenças estruturais da paisagem urbana que condicionam a dinâmica térmica noturna.

Em conjunto, os resultados apontam que a estrutura urbana, a altitude e o tipo de sistema atmosférico atuante interagem de forma complexa na definição da temperatura do ar durante a noite.

A altitude se confirma como variável estabilizadora do campo térmico, especialmente em noites estáveis como as dominadas pelo ASAS, enquanto a estrutura das ZCLs urbanas funciona como amplificadora do calor acumulado ao longo do dia.

A recorrência das zonas densamente urbanizadas nos clusters mais quentes sob todos os sistemas sinóticos analisados confirma a presença consistente de ilhas de calor urbanas noturnas em Juiz de Fora, evidenciando a importância de considerar simultaneamente fatores locais (morfologia, relevo e cobertura) e regionais (sistemas atmosféricos) na compreensão da climatologia urbana noturna.

Ainda que os padrões principais tenham se mantido entre os dois períodos, observou-se variação na dispersão térmica intraurbana conforme o tipo de sistema atmosférico atuante. Em outubro e novembro de 2023, a predominância do ASAS e de bloqueios atmosféricos associados ao El Niño favoreceu a ampliação dos contrastes térmicos, com amplitudes que ultrapassaram 6 °C entre zonas urbanas e periféricas.

Em dias como 24/10, por exemplo, as temperaturas às 21h nas ZCLs 1 e 10 superaram os 27 °C, enquanto as ZCLs mais elevadas, como D e G, permaneceram abaixo dos 21 °C. Esse comportamento reflete a intensa retenção de calor em áreas densas e impermeabilizadas e a eficiência do resfriamento radiativo em ambientes arborizados e elevados.

A ZCL B, embora rural, apresentou temperaturas elevadas em dias secos, devido à baixa umidade superficial e ausência de vegetação, reiterando que a classificação do uso da terra não garante, por si só, eficiência térmica noturna.

Durante o mês de fevereiro de 2024, a ilha de calor urbana manteve-se presente, no entanto a intensidade foi significativamente menor. As ZCLs urbanas, como a 1, 2 e 10, continuaram figurando entre os grupos mais quentes às 21h, o que confirma a persistência do fenômeno.

No entanto, a amplitude térmica entre zonas urbanas e periféricas foi mais contida, raramente ultrapassando 4 °C. Esse padrão mais homogêneo reflete a frequente atuação de sistemas úmidos e instáveis ao longo do mês, como frentes frias, tempestades tropicais e instabilidades convectivas locais, que aumentaram a nebulosidade, favoreceram a ventilação e elevaram a umidade atmosférica.

Esses fatores atuaram na moderação do aquecimento diurno e na aceleração do resfriamento noturno, suavizando os contrastes térmicos intraurbanos. Assim, embora a configuração da ilha de calor ainda estivesse presente, sua magnitude foi atenuada pela dinâmica atmosférica sazonal, destacando o papel dos sistemas sinóticos como moduladores do microclima urbano.

#### 5.8 Modelagem e Espacialização da Temperatura do Ar

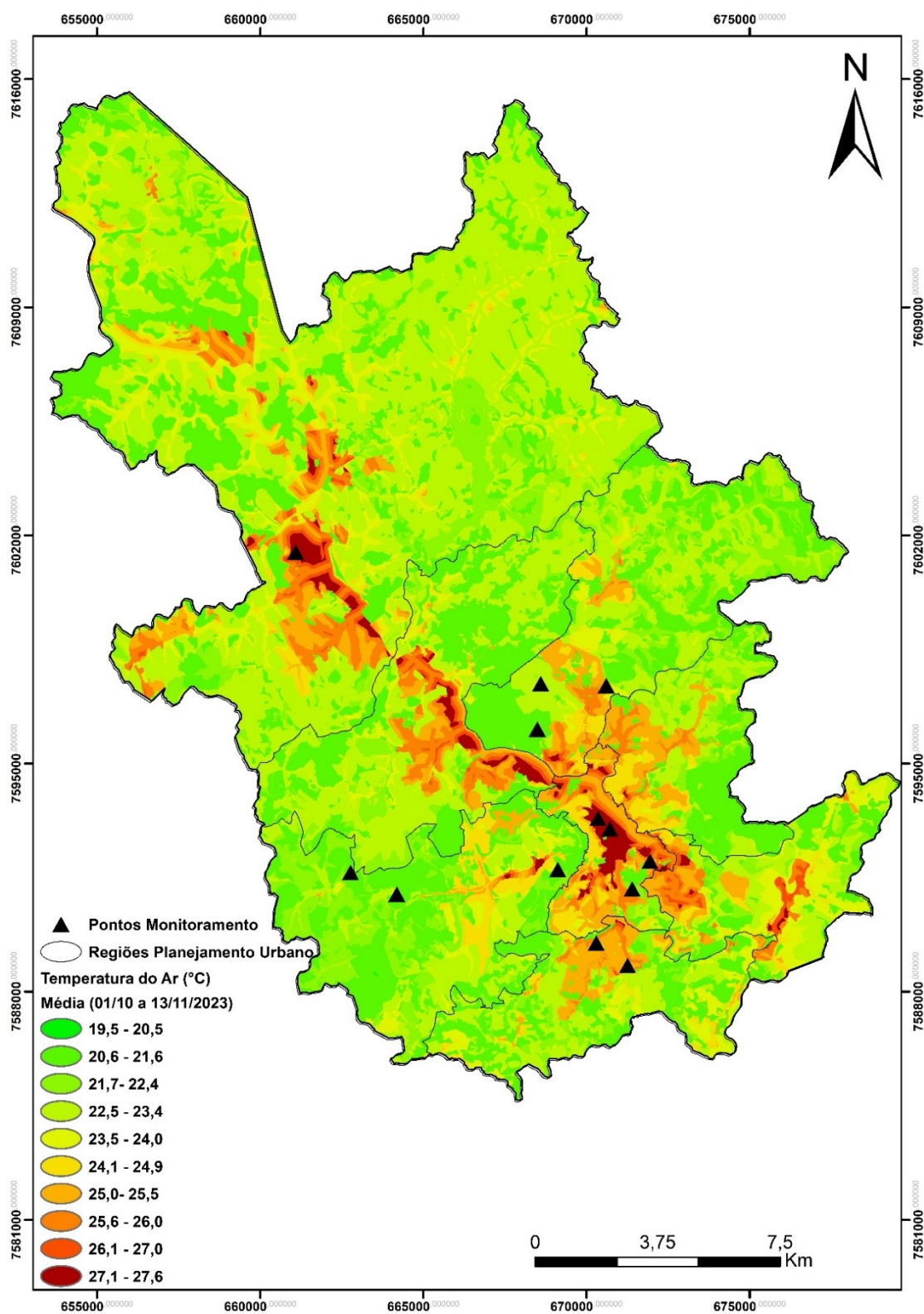
Os mapas representados nas figuras 57, 58 e 59, resultados do modelo proposto por Assis (2022), espacializou a temperatura do ar com base nos dados observacionais coletados em campo, integrando a classificação dos tipos de ZCLs, altitude e presença de corpos hídricos.

A figura 57, retrata a espacialização da temperatura média do ar no período de 1º de outubro a 13 de novembro de 2023.

As temperaturas médias mais elevadas, variaram entre 26,1 °C e 27,6 °C e foram observadas predominantemente nas áreas classificadas como ZCL 1, bem como em trechos das ZCLs 2, 3, 8 e 10, localizados ao longo dos principais eixos viários, como as avenidas Rio Branco, Getúlio Vargas e Itamar Franco.

Por outro lado, as áreas mais frescas, com temperaturas médias entre 19,5 °C e 21,6 °C, concentram-se principalmente nas porções próximas a presença de vegetação, corpos hídricos, maior altitude e menor densidade construtiva, configurando o que se pode classificar como ilhas de frescor urbana. Tais zonas coincidem com ZCLs classificadas como vegetação natural (A e B), e áreas de relevo mais elevado, que favorecem maior ventilação e menor retenção de calor.

Figura 57 - Distribuição da Temperatura Média do Ar em Juiz de Fora (01/10 a 13/11/2023).



Elaborado pela autora.

A figura 58, compreende a distribuição espacial da temperatura média do ar, sob a influência de três diferentes sistemas atmosféricos: uma Linha de Instabilidade (LI) no dia 25 de outubro de 2023, uma Frente Fria (FF) entre os dias 26 e 28 de outubro de 2023 e a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) entre 6 e 13 de novembro de 2023.

Durante a atuação da Linha de Instabilidade (Figura 58 A), observou-se um padrão térmico caracterizado por temperaturas moderadas a elevadas, variando entre 17,5 °C e 25,5 °C, a presença da LI promoveu instabilidade atmosférica e nebulosidade variável, o que limitou um maior aquecimento diurno, embora ainda se notasse a elevada influência do aquecimento no Centro (ZCL 1 e 2) e no Bairro Industrial (ZCL 10).

Com a passagem da Frente Fria entre os dias 26 e 28 de outubro (Figura 58 B), houve uma redução expressiva nas temperaturas em todo o município, com valores médios variando entre 16,0 °C e 23,0 °C.

Observou-se maior homogeneidade espacial da temperatura, com predomínio de valores abaixo de 20 °C, especialmente nas áreas mais elevadas. A atuação da frente fria resultou em resfriamento generalizado e atenuação do contraste térmico entre as diferentes zonas climáticas locais, o que contribuiu para a redução da intensidade das ilhas de calor.

Em contraste, o período sob domínio do ASAS (Figura 58 C), entre 6 e 13 de novembro, apresentou as maiores temperaturas médias registradas na série analisada, com variações de 20,2 °C a 32,5 °C. O ASAS proporcionou condições de tempo estável, seco e com forte radiação solar, favorecendo o acúmulo de calor, principalmente nas ZCL 1 e 2 .

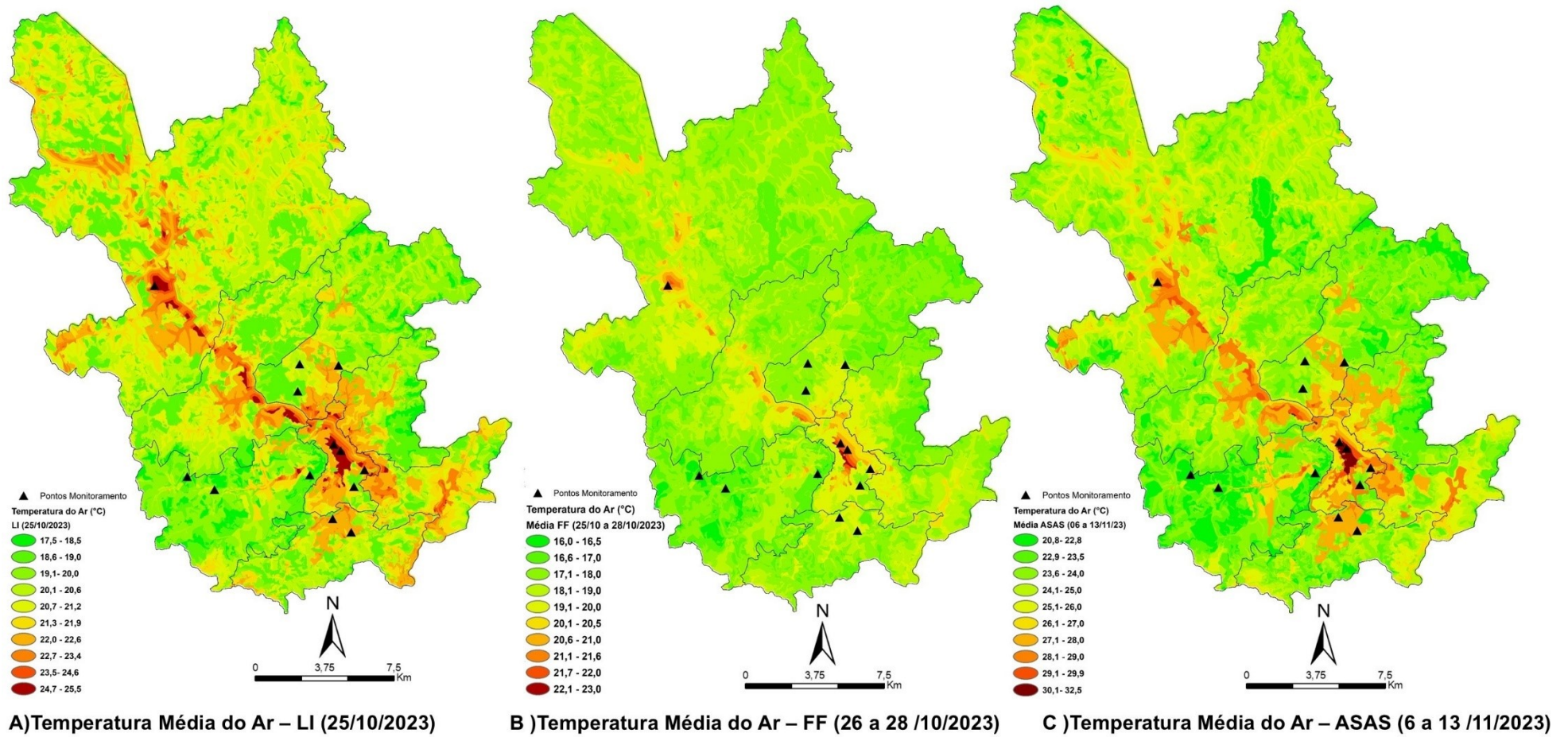
Nessas áreas as temperaturas médias ultrapassaram os 30 °C, evidenciando a propensão de intensas ilhas de calor, em contraste com os valores mais amenos registrados nas zonas periféricas e de maior altitude.

A comparação entre os três sistemas, evidenciaram a influência direta dos sistemas atmosféricos na modulação térmica do espaço urbano. Enquanto a frente

fria promoveu resfriamento e homogeneidade térmica, a atuação da ASAS acentuou os contrastes térmicos e intensificou o aquecimento urbano.

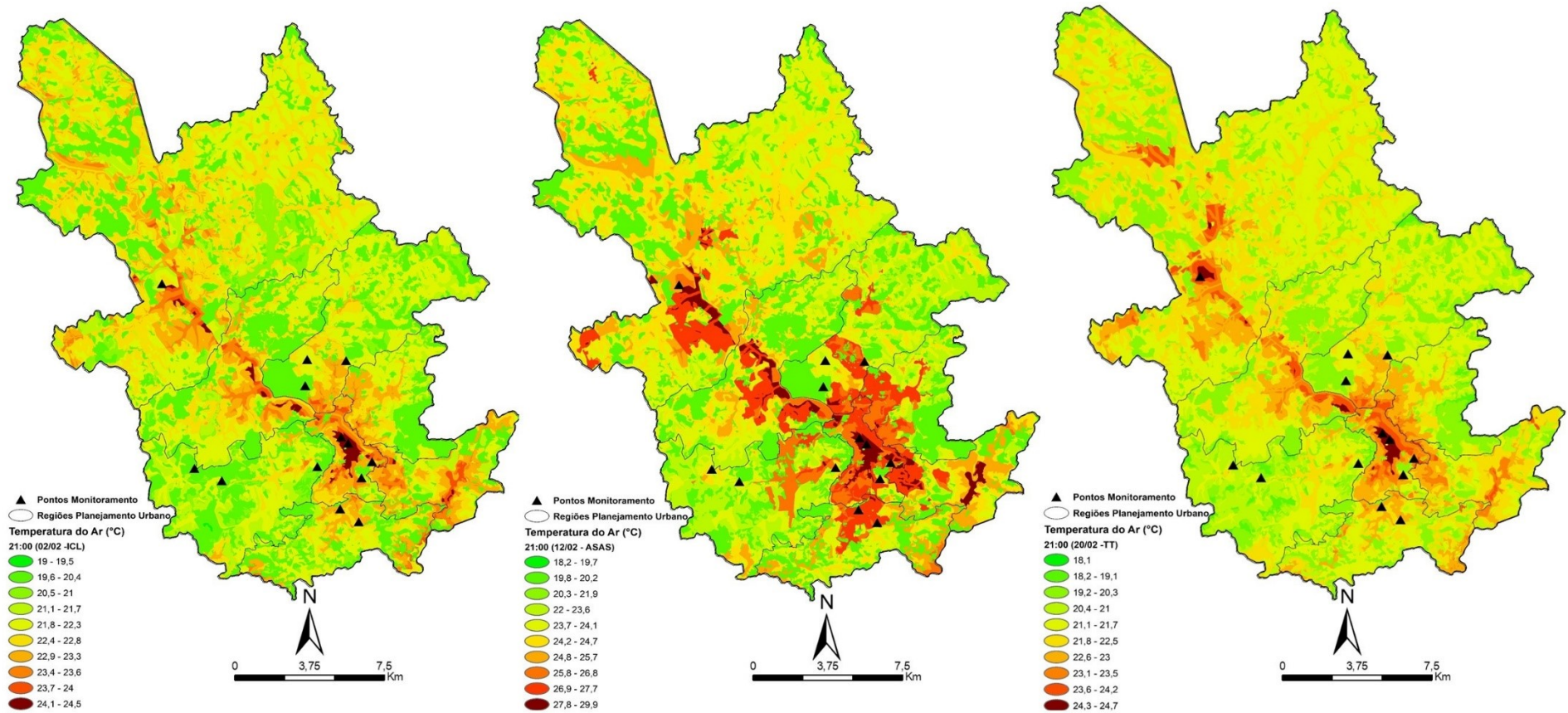
A linha de instabilidade, por sua vez, representou uma condição intermediária, com temperaturas elevadas, mas ainda sob efeito de instabilidade atmosférica. Esses resultados reforçam a importância da interação entre a circulação atmosférica e as características físico-geográficas locais na configuração da variabilidade térmica intraurbana

Figura 58 – Distribuição da Temperatura Média do Ar em Juiz de Fora sob diferentes sistemas atmosféricos.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 59 – Distribuição da Temperatura do Ar às 21 horas, em Juiz de Fora sob diferentes sistemas atmosféricos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A figura 59, ilustra os mapas de temperatura do ar às 21h, produzidos para três diferentes contextos sinóticos (ICL – 02/02, ASAS – 12/02, TT – 20/02), e evidenciaram fortes contrastes entre áreas urbanizadas e periféricas de Juiz de Fora.

Sob a atuação da ASAS, observou-se o maior acúmulo de calor noturno, com temperaturas ultrapassando 29 °C nas regiões densamente urbanizadas, enquanto às áreas com presença de vegetação variaram entre 18 e 23°C, configurando ilha de calor de forte magnitude.

Já nas situações de instabilidades como as Instabilidades Convectivas Locais (ICL) e Tempestade Tropical (TT), as temperaturas apresentaram menor amplitude e maior distribuição espacial, refletindo condições mais favoráveis ao resfriamento noturno.

Com base nos mapas de espacialização da temperatura do ar em Juiz de Fora, observou-se a conformação de um eixo de aquecimento contínuo entre o sudeste e o noroeste do município, alinhado com o traçado da Avenida Juscelino Kubitschek, principal via arterial que conecta o Centro (ZCL 1 e 2) à Zona Norte da cidade (ZCL 3, 8 e 10).

Essa faixa coincide com a planície do Rio Paraibuna, área caracterizada por alta densidade construtiva, presença de grandes galpões industriais metálicos e intensa atividade logística, elementos que favorecem o acúmulo de calor tanto na superfície quanto na atmosfera próxima.

A formação da ilha de calor, portanto, não se restringe apenas à região central, mas se expande em direção às áreas periféricas, revelando núcleos secundários de aquecimento associados à urbanização difusa e à fragmentação funcional do espaço urbano.

Esses núcleos, que podem assumir a forma de ilhas de calor de forte intensidade, especialmente em horários noturnos, estão associados a subcentros urbanos, com infraestrutura consolidada, baixa cobertura vegetal e elevado fluxo de veículos.

Esse padrão espacial de distribuição térmica é característico de cidades de urbanização recente, nas quais a estrutura urbana é policêntrica e a expansão periférica incorpora elementos típicos do centro, como adensamento construtivo, impermeabilização do solo e uso intensivo de materiais termicamente ineficientes.

Assim, a configuração térmica de Juiz de Fora revela uma distribuição assimétrica do aquecimento urbano, padrão diferente dos encontrados nas cidades estudadas por Oke (1987); Voogt e Oke (2002); Grimmond (2006).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo central investigar a estrutura térmica intraurbana da cidade de Juiz de Fora a partir de sua variabilidade espaço-temporal, considerando a ocorrência de ilhas de calor e de frescor, bem como de núcleos de aquecimento, tendo como referência a classificação das Zonas Climáticas Locais (ZCLs), em diálogo crítico com o papel do sítio urbano e da dinâmica atmosférica.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a estrutura térmica da cidade não pode ser explicada de forma isolada a partir da morfologia construída, mas resulta da interação indissociável entre forma urbana, relevo, hidrografia e sistemas atmosféricos atuantes.

É oportuno destacar que os achados desta pesquisa não esgotam a discussão sobre o clima urbano de Juiz de Fora, especialmente em função da escala temporal dos experimentos realizados. Ainda assim, os resultados contribuem de forma significativa para o entendimento da organização térmica intraurbana em cidades médias inseridas em ambientes tropicais de altitude e relevo fortemente compartimentado.

Entre os aspectos positivos desta pesquisa, ressaltam-se: (i) a aplicação inédita e abrangente da classificação de Zonas Climáticas Locais (ZCL) no perímetro urbano; (ii) a combinação de diferentes abordagens analíticas: sinótica, rítmica, análise de clusters e modelagem, para a elaboração de um diagnóstico térmico; e (iii) a possibilidade de replicação da metodologia para outras realidades climáticas, ampliando sua contribuição tanto para o campo acadêmico quanto para o planejamento urbano. Entre as limitações, destaca-se, sobretudo, a restrição temporal da série de dados analisada e o número limitado de pontos amostrais por ZCL utilizados nos trabalhos de campo.

Para a delimitação das Zonas Climáticas Naturais (ZCNs), tomou-se como ponto de partida o levantamento das temperaturas médias históricas entre 1915 - 1920, enquanto a definição das Zonas Climáticas Locais (ZCLs) foi orientada por dados atualizados de uso e cobertura do solo, altura e densidade das edificações.

A delimitação das Zonas Climáticas Naturais (ZCNs), embora elaborada a partir de dados históricos de apenas uma estação meteorológica, contribuiu para estabelecer um panorama climático de referência para o município, anterior as transformações significativas ocasionadas pela urbanização. Esse resgate histórico possibilita a identificação de áreas de maior resiliência térmica e o entendimento da relação entre ocupação urbana e alterações microclimáticas, fortalecendo as análises sobre a evolução do clima urbano de Juiz de Fora.

A comparação entre as ZCNs e as ZCLs, evidenciou a magnitude das transformações climáticas induzidas pela urbanização. As ZCNs apresentaram uma configuração térmica mais homogênea, condicionada pela altitude, cobertura vegetal e baixa ocupação antrópica. Em contrapartida, as ZCLs refletem um mosaico térmico complexo, com microclimas urbanos distintos influenciados por verticalização, adensamento das edificações, pavimentação e supressão de áreas verdes. Esse contraste demonstra a influência direta da urbanização sobre o clima local e a intensificação das ilhas de calor, especialmente nas zonas mais densamente edificadas (ZCLs 1, 2, 3, 8 e 10).

Os resultados dialogam com estudos anteriores realizados na cidade por Martins (1996) e Ribeiro *et al.* (2018), que identificaram ilhas de calor intensas associadas ao sítio urbano e ao adensamento construtivo. Confirmou-se, inclusive, sob distintos sistemas atmosféricos, a persistência do fenômeno nas áreas densamente construídas, como nas ZCLs 1, 2, 8 e 10.

As ZCL's 1 e 2, ainda que representem menos de 3% da área total urbana, foram consistentemente as mais quentes, devido à sua alta verticalização, baixa permeabilidade do solo e escassa cobertura vegetal. Já a ZCL 3, de maior representatividade entre as ZCLs em Juiz de Fora, e localizada em altitudes intermediárias, se destacou por ser como uma zona consistentemente quente, associada ao ambiente urbano denso e à baixa cobertura vegetal, integrando os clusters mais quentes, revelando seu papel no reforço na produção de ilhas de calor urbanas, mesmo sem estar diretamente localizada no centro da cidade (STEWART *et al.*, 2014).

A análise desenvolvida nesta pesquisa foi orientada pelas três hipóteses formuladas na introdução, as quais permitiram interpretar a estrutura térmica intraurbana de Juiz de Fora a partir da interação entre forma urbana, sítio físico e dinâmica atmosférica.

A primeira hipótese postulava que as Zonas Climáticas Locais não apresentam comportamento térmico homogêneo em cidades marcadas por relevo complexo, sendo suas respostas condicionadas pelas variações altimétricas e pela organização da rede hidrográfica. Os resultados confirmaram essa hipótese ao evidenciar que a singular combinação entre contrastes altimétricos, orientação das vertentes e diversidade no uso e ocupação do solo condiciona respostas micro e topoclimáticas distintas no interior do espaço urbano.

A altitude mostrou-se um fator estruturante da dinâmica térmica, promovendo resfriamento sistemático nas áreas mais elevadas e favorecendo, sobretudo no período noturno, a ocorrência de inversões térmicas nas porções mais baixas do relevo, associadas à drenagem do ar frio para os fundos de vale.

Esses processos resultaram em padrões térmicos diferenciados mesmo entre ZCLs com características morfológicas semelhantes, evidenciando a reconfiguração espacial das ZCLs em função do sítio físico.

A segunda hipótese considerava que a atuação dos sistemas atmosféricos regionais e sinóticos modula a intensidade, a distribuição espacial e a persistência das ilhas de calor e de frescor intraurbanas, promovendo uma reconfiguração temporal do comportamento térmico das ZCLs. Essa hipótese foi corroborada pelos resultados dos experimentos de campo, que demonstraram a influência decisiva das condições sinóticas na modulação da temperatura do ar.

Sob a atuação de sistemas frontais, observou-se redução expressiva das temperaturas máximas em todos os pontos amostrais, acompanhada de relativa homogeneização térmica entre as ZCLs, em função do aumento da nebulosidade e da umidade relativa. As linhas de instabilidade, por sua vez, produziram impactos mais pontuais, associados a variações térmicas abruptas, especialmente no período vespertino.

A terceira hipótese postulava que, em situações atmosféricas estáveis, os contrastes térmicos intraurbanos tendem a se intensificar, enquanto em situações instáveis esses contrastes são atenuados.

Os resultados confirmaram essa proposição ao indicar que a atuação da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) favoreceu tanto o aquecimento diurno quanto o resfriamento noturno, ampliando a amplitude térmica e intensificando os contrastes intraurbanos, sobretudo entre áreas mais e menos urbanizadas. Em contrapartida, as situações atmosféricas instáveis contribuíram para a redução desses contrastes, reforçando o papel da estabilidade atmosférica na intensificação das ilhas de calor e de frescor intraurbanas.

A análise das ZCLs classificadas como não urbanas evidenciou ainda que esses ambientes não constituem apenas um referencial térmico estático, mas apresentam dinâmica própria, capaz de revelar transições e gradientes climáticos relevantes para a compreensão do clima intraurbano. A ZCL B, por exemplo, apresentou elevação térmica nas primeiras horas da manhã, sobretudo durante a atuação da ASAS, associada à umidade do solo, à cobertura esparsa, à baixa densidade arbórea e a mecanismos de mesoescala. Esses resultados reforçam a superação da dicotomia urbano–rural e evidenciam o papel do ambiente não urbano como contraponto analítico fundamental.

A aplicação do modelo de espacialização da temperatura do ar, adaptado às ZCLs e incorporando variáveis como altitude e proximidade de corpos hídricos, demonstrou potencial para replicação em diferentes contextos urbanos, contribuindo para o preenchimento de lacunas na literatura e para o aprimoramento da análise da variabilidade térmica intraurbana.

Por fim, os resultados obtidos reafirmam a relevância das Zonas Climáticas Locais como unidades de análise do clima urbano, desde que utilizadas de forma crítica e integradas à análise do sítio físico e da dinâmica atmosférica. Em cidades médias brasileiras como Juiz de Fora, essa abordagem possibilita diagnósticos mais precisos da estrutura térmica urbana, oferecendo subsídios importantes para o planejamento urbano climático e para a mitigação dos efeitos adversos das ilhas de calor.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, P. J.; MILLS, G. Local climate classification and Dublin's urban heat island. **Atmosphere**, v. 5, n. 4, p. 755–774, 2014.  
<https://doi.org/10.3390/atmos5040755>
- AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003
- AB'SABER, A. N. **Geomorfologia do Sítio Urbano de São Paulo**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2007.
- ANDRADE, F. E. **A Invenção de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Autêntica, 2008.
- AMORIM, M. C. C. T. (2019). Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15 (Edição Especial – XIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica), 22–42, 2019.
- AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de Calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte: teoria e prática**. Curitiba: Apris, 2020.
- ANJOS, M., TARGINO, A. C., KRECL, P., OUKAWA, G. Y. & BRAGA, R. F. Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. **Building and Environment**, 185, 2020.
- ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva tempo-espacial**. Tese (Doutorado em Geografia) –Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- ASSIS, D. C. **O Conforto Térmico Associado às Variáveis de Cobertura da Terra na Região Central de Juiz de Fora – MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.
- ASSIS, D.C.; FERREIRA, C.C.M. Zoneamento térmico e suas correlações associadas aos padrões de uso e ocupação da terra da região urbana, centro em Juiz de Fora - MG. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.22,p. 554-573, 2018.
- ASSIS, D. C. **Interação entre fatores espaciais e tipos de tempo na organização das unidades climáticas em Juiz de Fora – MG**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- BARBOSA, Y. A. **O processo urbano de Juiz de Fora – MG - Aspectos econômicos e espaciais do Caminho Novo ao ocaso industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso em Geografia da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2013.
- BARBOSA, Y. A. **Espaço, História e Cidade: Uma abordagem geográfica do processo urbano de Juiz de Fora na última década do século XIX**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Instituto de Ciências Humanas- ICH, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

- BARROS, S. F. S. Eixos de expansão urbana em Juiz de Fora/MG: novos empreendimentos e centralidades na BR-040. **Boletim de Geografia**, Maringá, v39, p.369-382, 2021.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosphere, weather and climate**. 9° ed. London: Routledge, 2013.
- BECHTEL, B. et al. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 199-219, 2015.
- BROUSSE, O.; MARTILLI, A.; FOLEY, M.; MILLS, G.; BECHTEL, B. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. **Urban Climate**, n17, 2016.
- CARDOSO, R. S.; AMORIM, M. C. C. T. Urban heat island analysis using the 'local climate zone' scheme in Presidente Prudente, Brazil. **Investigaciones Geográficas**, n. 69, 2018.
- CARNEIRO, P. A.; MATOS, R. E. Geografia histórica da ocupação da Zona da Mata mineira: acerca do mito das "áreas proibidas". In XIV Seminário sobre Economia Mineira. **Anais do Seminário**. Diamantina: Cedeplar, UFMG, 2010.
- CARVALHO, P. M.; SANCHES, F.; VIANNA, Y. C. G.; OLIVEIRA, T. A.; FERREIRA, C. C. M. Comparação da temperatura do ar noturna entre centro e periferia: uma contribuição aos estudos sobre clima urbano em Juiz de Fora-MG. **Revista de Geografia – PPGeo/UFJF**, v. 12, n. 2 (Edição Especial – Climatologia), p. 19-41, 2022.
- CASTRO, J. F. M. ALENCAR, B.J.; SOARES, T. L. Análise da Infraestrutura socioeconômica e das áreas de influência da Zona da Mata de Minas Gerais (1991-200). **Cadernos de Geografia**, v.22, n 37, p.29-46, 2012.
- CAVALCANTI, I F. A; FERREIRA, N. J; SILVA, M. G. J; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. Oficina de Textos, São Paulo 2009.
- CHANDLER, T. J. **The Climate of London**. Hutchinson & Co., Londres, 1965
- CHING, J.; MIDDLEDITCH, A.; GRIMMOND, C. S. B.; SALIMUN, E.; TANG, J.; WANG, Y. WUDAPT: Facilitating advanced urban canopy modelling for weather, climate and air quality applications. **Urban Climate**, v. 10, p. 411-427, 2014.
- CRÉTAT, J., RICHARD, Y., POHL, B., EMERY, J., DUDEK, J., PERGAUD, J., REGA, M., POUPELIN, M., JOLY, D., THÉVENIN, T., MARQUÈS, E.; MASSON, V. Impact of topography and land cover on air temperature space-time variability in an urban environment with contrasted topography (Dijon, France, 2014–2021). **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, n. 3, p. 1941–1958, 2024. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04742-4>

DEMUZERE, M.; CHING, J.; SHUSTER, W.; VOOGT, J. A.; MIDDLEITCH, A.; HEDENUS, F.; GRIMMOND, C. S. B. The portal component, strategic perspectives, and review of tactical plans for full implementation of WUDAPT. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE, 2015, Toulouse**. Toulouse: Meteo France, p. 293-296, 2015.

DE PAULA, R. Z. A. Região e Regionalização: um estudo da formação regional da Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista Heera**, v.1, n.1, p.66-80, 2006.

DUARTE, B. P. **Evolução Tectônica dos Ortognaisses dos Complexos Juiz de Fora e Mantiqueira na região de Juiz de Fora, MG**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

DU, S.; KUANG, X.; CHEN, J.; YE, Y.; LI, P.; SHI, X. Development of an expanded local climate zone scheme to accommodate diversified urban morphological evolution: A case study of Shanghai, China. **Urban Climate**, v. 54, 2024.

EDUARDO, C. C. **Cartografia geomorfológica comparada: aplicações no município de Juiz de Fora - MG como subsídio ao planejamento**. Dissertação de Mestrado (em Geografia), Instituto de Ciências Humanas- ICH, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2018.

ESRI, Desktop. **ArcGIS. version 10.8**. ESRI: Redlands, CA, USA, 2020.

ESRI. **An Overview of the Raster Interpolation toolset**. ArcGIS PRO. Disponível em <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/2.8/tool-reference/3d-analyst/an-overview-of-theraster-interpolation-toolset.htm>. Acesso em: 01/11/ 2023.

ESTEVES, A. **Álbum do Município de Juiz de Fora**. Belo Horizonte, Imprensa Oficial do Estado de Minas, 1915.

FENG, W.; LIU, J. A literature survey of local climate zone classification. *Buildings*, v. 12, n. 10, p. 1693, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/10/1693>

FAN, Y. et al. Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. *Remote Sensing*, v. 15, n. 4, p. 884, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15040884>

FERNANDES, R., NASCIMENTO, V., FREITAS, M., OMETTO, J., 2023. Local Climate Zones to Identify Surface Urban Heat Islands: A Systematic Review. **Remote Sensing**, v. 15, n. 4, p. 884, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15040884>

FERREIRA, C. C. M. Aplicação da lógica nebulosa (Fuzzy Cluster) na definição de umidades climáticas: estudo de caso na bacia do rio Paraíba - MG/RJ. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 10, p. 85-97, 2012.

FERREIRA, C. C. M. Modelo para Análise de Variáveis de Cobertura da Terra e a Identificação de Microclimas, em Centros Urbanos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.14, p.50-75, jan-jul, 2014.

FERREIRA, C. C. M; FERREIRA G. M. VIANNA, Y. C. G. Variações ou tendências climáticas: um estudo com as séries de temperatura do ar para a cidade de Juiz de Fora-MG. **Revista de Ciências Humanas**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 414-433, jul./dez. 2015.

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

FERREIRA, H. V. L.; UGEDA JÚNIOR, J. C. Variação da temperatura da superfície através de imagens aster em zonas climáticas locais da cidade de Cuiabá, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.26, 2020.

FREITAS FILHO, A. P; SOUZA, A. L; MARTINS, M. G; QUAGLINO, M. A; HAZAN, S. S. Pequenas usinas hidrelétricas: o caso da usina de Marmelos. **Revista História e Economia**, v. 9, n. 2, p.19-32, 2011.

FITZ, P. R. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

GALVANI, E.; LIMA, N. G. B. A ocorrência de inversão térmica no perfil topoclimático do Pico das Agulhas Negras – RJ. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA**, 7., 2006, Rondonópolis. Anais Rondonópolis, 2006.

GARCÍA, F.F. Ciudad y câmbio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. **Investigaciones Geográficas**, v.49, p.173-195, 2009.

GARCIA, M. C. M. Una Propuesta de Terminologia Castellana em Climatologia Urbana. **Investigaciones Geográficas**, n 17, p. 89 -97, 1997.

GARCIA, F.F; ÁLVAREZ, D. R. Olas de calor e influencia urbana em Madrid y su área metropolitana. **Estudios Geográficos**, 2008

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

GEIGER, R. **The Climate Near The Ground**. Massachusetts University, Massachusetts, 1950.

GENOVEZ, P. F. A viagem enquanto forma de poder: a viagem de Pedro II e a inauguração da rodovia União e Indústria, em 1861. **Tempo**, v. 3, n. 5, p.161-180, 1998.

GRAMSCH, E.; CÁCERES, D.; OYOLA, P.; REYES, F.; VÁSQUEZ, Y.; RUBIO, M. A.; SÁNCHEZ, G. On the effect of atmospheric stability and surface and subsidence inversions on air pollution concentrations in Santiago, Chile. **Atmospheric Environment**, v. 98, p. 290–298, 2014.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.050>

GRIMMOND, C.S.B; OKE, T. R. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). **Journal Applied Meteorology**, vol. 41, p. 792–810, 2002.

GRIMMOND, C. S. B., 2006, Progress in measuring and observing the urban atmosphere. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 84, p. 3-22, 2006.

HAN, J.; MO, N.; CAI, J.; OUYANG, L.; LIU, Z. Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 11, p. 538, 2024. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03285-4>

HATHWAY, E. A., & SHARPLES, S. The interaction of rivers and urban form in mitigating the urban heat island effect: A UK case study. **Building and Environment**, 58, 14 e 22, 2012.

HOWARD, L. **The Climate of London**: Deduced from Meteorological Observations, Made in the Metropolis and at Various Places Around It. 2. ed. ampliada, 3 volumes. London: Harvey and Darton; J. and A. Arch; Longman; Hatchard; S. Highley; R. Hunter, 1818. Edição digital publicada pela International Association for Urban Climate IAUC.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente nos municípios — 1º de julho de 2024**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28 jul. 2025.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Avisos meteorológicos especiais. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://alertas.inmet.gov.br>. Acesso em: 28 abr. 2025.

JARDIM, C.H; GALVANI, E. Unidades Topoclimáticas no Parque Nacional da Serra do Cipó. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.30, p.219-245, jan-jun,2022.

JESUS, E. F.R. Algumas reflexões teórico-conceituais na climatologia geográfica em mesoescala: uma proposta de investigação. **GeoTextos**, vol. 4, n. 1 e 2, p.165-187, 2008.

JUIZ DE FORA. Plano Diretor Participativo do Município de Juiz de Fora – MG. 2018. Disponível em: [https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/sistema\\_informacoes/plano\\_diretor.php](https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/sistema_informacoes/plano_diretor.php). Acesso em: 27 jun. 2023.

JUIZ DE FORA. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Juiz de Fora. Juiz de Fora: Funalfa Edições, 2004. Disponível em: [https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/plano\\_diretor/plano\\_anterior.php](https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/plano_diretor/plano_anterior.php). Acesso em: 27 jun. 2024.

LANDSBERG, H. E. The Climate of Towns. In: THOMAS, W.E., **EcMan's Role in changing the face of heart**. The Wenner Green Foundation Anthropological Research. The University of Chicago Press, 1956.

LEWIS, S.; MASLIN, M. Defining the Anthropocene. **Nature**, 519, p. 171–180, 2015.

LOMBARDO, M. A. F. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985.

MACHADO, P. J. O.; RAIMUNDO, C. S.; MARQUES, V. Juiz de Fora e a urbanização do Paraibuna. **Revista Geografia (UFJF)**, Juiz de Fora, v. 6, n. 1, p. 23–34, 2016.

MARIANO, D. Métricas de avaliação em machine learning: acurácia, sensibilidade, precisão, especificidade e F-score. **Revista Brasileira de Bioinformática**, ed.1,jul.2021.

MARQUES NETO, R; SILVA, F. P; FERNANDES, R. A; BARRETO, J. C.; EDUARDO, C. C. A espacialidade do relevo em paisagens transformadas e sua representação: mapeamento geomorfológico da bacia do rio Paraibuna, Sudeste de Minas Gerais. **RA'EGA – o espaço geográfico em análise**, Curitiba, v. 41, p. 65–81, 2017.

MARQUES NETO, R. M; BATELLA, W; MILANEZ, B. O significado Regional da Zona da Mata Mineira: breve apresentação. In: NETO, R. M; BATELLA, W; MILANEZ, B. **Dinâmicas Geográficas na Zona da Mata Mineira**. Curitiba, 2022.

MARTINS, L. A. **A Temperatura do Ar em Juiz de Fora-MG: Influências do Sítio e da Estrutura Urbana**. Dissertação de Mestrado. Rio Claro, Pós-Graduação em Geografia, 1996.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. Mapping humidity plume over local climate zones in a high-altitude tropical climate city, Brazil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 177–197, out./dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400300>.

MEGDA, O. R., & MASIERO, E. Análise das Ilhas de Calor Urbano sobre Zonas Climáticas Locais com o uso de VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado – em uma cidade média. *urbe*. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.13, 2021.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia - noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2007.

MENDONÇA, F. O estudo do SCU – Sistema Clima Urbano no Brasil: aplicações e avanços. *In*: MONTEIRO, C. A. F. A (org); SANT'ANNA NETO, J. L.; MENDONÇA, F.A; ZAVATTINI, J. A. **A Construção da Climatologia Geográfica no Brasil**. Campinas, Editora: Alínea, 2015

MENEZES, M. L. P; SANTOS, F. A. S. A recente produção de espaços públicos de lazer, consumo e cultura na Zona Norte de Juiz de Fora. *In*: NETO, R. M; BATELLA, W; MILANEZ, B. **Dinâmicas Geográficas na Zona da Mata Mineira**. Curitiba, 2022.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo. IGEO/USP, 1976.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2013.

MONTEIRO, C. A. F. Por um suporte teórico e prático para estimular estudos geográficos de clima urbano no Brasil. **Geosul**, Florianópolis, n.9, p.7-19, 1990a.

MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **Geosul**, Florianópolis, n.9, p.61-79, 1990b.

MONTEIRO, C. A. F. O estudo geográfico do clima. **Cadernos Geográficos**, Florianópolis, n.1, p.7-72, mai. 1999.

MUSHORE, T. D.; ODINDI, J.; SLOTOW, R.; MUTANGA, O. Remote sensing-based outdoor thermal comfort assessment in local climate zones in the rural–urban continuum of eThekweni Municipality, South Africa. **Remote Sensing**, v. 15, n. 23, p. 5461, 2023. <https://doi.org/10.3390/rs15235461>

MURAKAWA, S., SEKINE, T., NARITA, K., NISHINA, D. Study of the effects of a river on the thermal environment in an urban area. **Energy and Buildings**, v. 16, n. 3–4, p. 993–1001, 1991.

NEVES, L.P. **Adoção do Partido na Arquitetura**. Salvador: ed.UFBA, 1989.

**NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION**. Oceanic Niño Index (ONI). National Centers for Environmental Information, 2023. Disponível em: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/e\\_sostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/e_sostuff/ONI_v5.php). Acesso em: 28 jul. 2025.

OLIVEIRA, T. A.; TAVARES, C. de M. G.; SANCHES, F.; FERREIRA, C. C. M. Variabilidade pluviométrica no município de Juiz de Fora-MG no período de 1910-2018: investigação a partir da técnica do box plot. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 26, p.457-478, 2020.

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

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE. **Mudanças climáticas são a maior ameaça à saúde Humana**. Genebra: OMS, 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br>. Acesso em 01/09/2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **World Urbanization Prospects: The 2025 Revision**. Disponível em: <https://www.un.org/>. Acesso em: 28 jun. 2025.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, v. 7, n. 8, p. 769-779, 1973.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. Taylor & Francis e-Library. 2ª ed. Vancouver, 1978.

PERERA, N. G. R.; EMMANUEL, R. A “Local Climate Zone” Based Approach to Urban Planning in Colombo, Sri Lanka. **Urban Climate**, v. 23, p. 188-203, 2018.

PIMENTEL, F.O. **Clima urbano: o uso de modelos geoespaciais na investigação do comportamento térmico em Juiz de Fora – MG. 2017**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

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, n. 15, p. 49-66, 2019.

RENDÓN, A. M.; SALAZAR, J. F.; PALACIO, C. A; WIRTH, V.; BRÖTZ, B. Effects of urbanization on the temperature inversion breakup in a mountain valley with implications for air quality. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 53, n. 4, p. 840–858, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-0205.1>.

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. **Boletim Geografia Teorética**, Rio Claro, v.23, p. 45-49, 1993.

RIBEIRO, C. R.; GONÇALVES, A. P.; BASTOS, F. P. Ilhas de calor urbanas e conforto térmico humano em cidades de porte médio: estudo aplicado em Juiz de Fora (MG). **Ra’e Ga – O Espaço Geográfico em Análise**, v. 45, n. 1, p. 281-300, dez. 2018. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v45i0.51262>.

RICHARD, Y.; EMERY, J.; DUDEK, J.; PERGAUD, J.; CHATEAU-SMITH, C.; ZITO, S.; REGA, M.; VAIRET, T.; CASTEL, T.; THÉVENIN, T.; et al. How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. **Urban Climate**, 26, 258–274, 2018.

ROCHA, G. C; TORRES, F. T. P; ANDRADE, F.L; PAULA, R. T. Onde Mora o Perigo? Ameaças e Riscos Ambientais em Juiz de Fora e Região. *In*: NETO, R. M; BATELLA, W; MILANEZ, B **Dinâmicas Geográficas na Zona da Mata Mineira**. Curitiba, 2022.

RODRIGUES, A. S. R. **A produção do espaço urbano em Juiz de Fora-MG: Dinâmicas imobiliárias e novas centralidades**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

ROMERO, H.; VINAGRE, J. Topoclimatología de la cuenca del Río Mapocho. **Revista de Geografía Norte Grande**, Santiago, n. 32, p. 35–52, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.5354/0719-5370.1985.27689>.

ROMERO, M. A. B. **Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano**. São Paulo:Projetos Editores Associados Ltda., 1998.

SANT'ANNA NETO, J. L. Da complexidade física do universo ao cotidiano da sociedade: mudanças, variabilidade, ritmo climático. **Revista Terra Livre**, n. 20, p. 51-64, 2003.

SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do Sudeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 1, n. 1, p. 43–60, dez. 2005.

SANT'ANNA NETO, J. L. O clima urbano como construção social: da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 8, p. 45 – 60, 2011.

SANT'ANNA NETO, J.L. Escalas geográficas do clima: Mudança, variabilidade e Ritmo. *In*: AMORIM, M.C.C.T.; SANT'ANNA NETO, J. L.; MONTEIRO, A (orgs). **Climatologia urbana e regional: Questões teóricas e estudos de caso**. São Paulo: Outras Expressões, 2013.

SANT'ANNA NETO, J. L. As Matrizes da Construção da Climatologia Geográfica Brasileira. *In*: MONTEIRO, C. A. F. A; SANT'ANNA NETO, J. L; MENDONÇA, F. A; ZAVATTINI, J. A. **A Construção da Climatologia Geográfica no Brasil**. Campinas, Editora: Alínea, 2015.

SILVA, A. N.; WOLLMANN, C. A.; IENSSE, A. C. Inversão térmica e evapotranspiração em área de transição urbano/natural em Santa Maria/RS: uma abordagem topoclimática. **Revista Geografia (UFJF)**, v. 12, p. 42–63, 2022.

SILVA, R. F. R.; GERALDO, W. M. de J.; MENEZES, M. L. P. O espaço urbano de Juiz de Fora e a dinâmica regional contemporânea. **Principia: Caminhos da Iniciação Científica**, v. 15, p. 79–84, 2011.

SILVA, C. A. Estudos e Técnicas de pesquisa de Clima Urbano com foco no subsistema físico-químico, novos instrumentos, novas possibilidades. *In*: SANT'ANNA NETO, J. L; AMORIM, M. C. C. T; SILVA, C. A (Orgs.). **Clima e Gestão do Território**. p.7-32, Paco editorial, Jundiaí, 2016.

SHI, Y.; ZENG, Q.; LIU, Lei; H., Juntao; Z., Zhe; DING, W.; HU, F. Observed evidence that subsidence process stabilizes the boundary layer and increases the ground concentration of secondary pollutants. **Journal of Geophysical Research:Atmospheres**,v.127,n.3,2022.

SORRE, M. Objeto e Método da Climatologia. In: *Traité de climatologie biologique et medicale*, Paris, 1934. Tradução de Conti, J.B. **Revista do Departamento de Geografia**, 2006.

SORRE, M. **Les fondements de la géographie humaine**. Paris: Librairie Armand Colin, 1951.

ŚWITA, R.; SUSZYŃSKI, Z. Cluster segmentation of thermal image sequences using kd-tree structure. **International Journal of Thermophysics**, New York, v. 35, p. 2374-2387, 2014.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: the case of Nagano, Japan. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN CLIMATE**, 7., 2009, Yokohama: ICUC, 2009.

STEWART, I. D. **Redefining the urban heat island**. Tese (PhD em Geografia). University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, 2012.

TASCA, L. **As contradições e complementaridades nas leis urbanas de Juiz de Fora**. Tese (Doutorado em Planejamento Urbano e Regional) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010

THORNTHWAITE, C. W. **Topoclimatology**. Seabrook, 1953.

THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R. The water balances. Publications in **Climatology**, New Jersey, Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TRICART, J.; CAILLEUX, A. **Introduction à la géomorphologie climatique**. Paris: Librairie Armand Colin, 1956.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Recife, 2006.

VELOSO, H.P.; GÓES-FILHO, L. **Fitogeografia brasileira – Classificação fisionômico-ecológica da vegetação neotropical**. Bol. Técnico Radam-Brasil (série vegetação) ,1982.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal Remote Sensing of Urban Climates. **Elsevier Science Journals**, p.370-384, dez.2002.

WANG, Y.; ZHOU, W.; JI, S.; YANG, X.; LI, W.; HAN, L.; LIU, W. Developing comprehensive local climate zone land use datasets for major Chinese cities. **Remote Sensing**, Basel, v. 15, n. 12, p. 3111, 2023.

WENYUN, F; LIU, J. A literature survey of local climate zone classification: status, application, and prospect. **Buildings**, n1693, v.12, 2022.

WONG, N. H.; TAN, C. L.; NINDYANI, A. D. S.; JUSUF, S. K.; TAN, E. Influence of water bodies on outdoor air temperature in hot and humid climate. *In: ICSDC*

2011: Integrating Sustainability Practices in the Construction Industry (p. 81-89), 2012.

WULF, A. **A invenção da natureza: a vida e as descobertas de Alexander von Humboldt, o gênio esquecido**. 1. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2016.

WORLD URBAN DATABASE AND ACCESS PORTAL TOOLS. **World Urban Database**. WUDAPT, 2023. Disponível em: <https://www.wudapt.org/>. Acesso em: 01/05/2023.

WULF, A. **A invenção da natureza: a vida e as descobertas de Alexander von Humboldt, o gênio esquecido**. 1. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 2016.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo, Oficina de Textos, 2013.

YAO, W.; ZHONG, S. Nocturnal temperature inversions in a small, enclosed basin and their relationship to ambient atmospheric conditions. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 104, p. 99–113, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00703-008-0026-8>.

YAN, Y. et al. Exploring the effect of riparian vegetation on local thermal regulation. *Urban Climate*, v. 59, 102275, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102275>

YUAN, C.; YANG, H. Research on K-value selection method of K-means clustering algorithm. **Multidisciplinary Scientific Journal**, Basel, v. 2, n. 2, p. 226-235, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/j2020016>.

ZHAI, H.; LV, C.; LIU, W.; YANG, C.; FAN, D.; WANG, Z.; GUAN, Q. Understanding spatio-temporal patterns of land use/land cover change under urbanization in Wuhan, China, 2000–2019. **Remote Sensing**, Basel, v. 13, n. 16, p. 1–24, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163331>

ZHANG, R.; YANG, J.; SUN, D.; MA, L.; YU, Y.; XIA, X.; XIA, Y. Warming and cooling effects of local climate zones on land surface temperature: a stepwise regression analysis. **Frontiers in Public Health**, Lausanne, v. 10, art. 1072174, 2022.

ZHENG, Y.; REN, C.; XU, Y.; WANG, R.; HO, J.; LAU, K.; NG, E. GIS-Based Mapping of Local Climate Zone in the High-Density City of Hong Kong. **Urban Climate**, v. 24, p. 419-448, jun. 2018.

ZHONG, S., QIAN, Y., ZHAO, C., LEUNG, R., WANG, H., YANG, B., FAN, J., YAN, H., YANG, X. Q., & LIU, D. Urbanization-induced urban heat island and aerosol effects on climate extremes in the Yangtze River Delta region of China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, v. 17, n. 7, p. 5439–5457, 2017. <https://doi.org/10.5194/acp-17-5439-2017>

ZAVATTINI, J. A.; BOIN, M. N. **Climatologia geográfica: teoria e prática de pesquisa**. Campinas: Alínea, 2013.