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

Fabrício Lisboa Vieira Machado

POR UMA CLIMATOLOGIA DAS FAVELAS: modelo de avaliação do campo térmico e higrométrico nas vilas e comunidades de Belo Horizonte - MG

Belo Horizonte
2024

Fabrício Lisboa Vieira Machado

POR UMA CLIMATOLOGIA DAS FAVELAS: modelo de avaliação do campo térmico e higrométrico nas vilas e comunidades de Belo Horizonte - MG

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

Área de concentração: Geografia Aplicada e Geotecnologias.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Alexandrino Garcia.

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Jardim.

Belo Horizonte
2024

M149p
2024

Machado, Fabrício Lisboa Vieira.

Por uma climatologia das favelas [manuscrito] : modelo de avaliação do campo térmico e higrométrico nas vilas e comunidades de Belo Horizonte - MG / Fabrício Lisboa Vieira Machado. – 2024.

283 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Ricardo Alexandrino Garcia.

Co-orientador: Carlos Henrique Jardim.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Área de concentração: Geografia Aplicada e Geotecnologias.

Bibliografia: f. 253-265.

Inclui apêndices e anexos.

1. Climatologia urbana – Teses. 2. Ilha de calor urbana – Teses. 3. Microclimatologia – Teses. 4. Favelas – Belo Horizonte (MG) – Teses. 5. Belo Horizonte (MG) – Clima – Teses. I. Garcia, Ricardo Alexandrino. II. Jardim, Carlos Henrique. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 551.584.5(815.1)

Ficha catalográfica elaborada por Nathalia Machado Laponez Maia – CRB-6/3002
Biblioteca “Vitória Pedersoli”, Instituto de Geociências da UFMG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"POR UMA CLIMATOLOGIA DAS FAVELAS: MODELO DE AVALIAÇÃO DO CAMPO TÉRMICO E HIGROMÉTRICO NAS VILAS E COMUNIDADES DE BELO HORIZONTE - MG"

FABRICIO LISBÔA VIEIRA MACHADO

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **08 de agosto de 2024**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores doutores:

Daniele Gomes Ferreira

IEPHA

Edelci Nunes da Silva

UFSCar

Plínio da Costa Temba

UFMG

Wellington Lopes Assis

IGC/UFMG

Carlos Henrique Jardim

IGC/UFMG

Ricardo Alexandrino Garcia - Orientador

IGC/UFMG

Belo Horizonte, 08 de agosto de 2024.

Documento assinado eletronicamente por **Edelci Nunes da Silva**, **Usuária Externa**, em 09/08/2024, às 14:00, 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 **Daniele Gomes Ferreira**, **Usuário Externo**, em 09/08/2024, às 14:01, 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 09/08/2024, às 14:07, 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 **Plinio da Costa Temba**, **Decano(a)**, em 09/08/2024, às 14:31, 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 **Carlos Henrique Jardim**, **Professor do Magistério Superior**, em 09/08/2024, às 14:49, 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 **Ricardo Alexandrino Garcia**, **Professor do Magistério Superior**, em 09/08/2024, às 15:47, 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, informando o código verificador **3338020** e o código CRC **F88A2F9D**.

Ao homem mais forte e à mulher mais guerreira do universo observável, meus pais.

AGRADECIMENTOS

Não há como iniciar a seção de agradecimentos da tese sem ser grato à vida do meu pai. Aquele homem, até então saudável, brincalhão e entusiasta dos métodos aplicados nesta pesquisa, foi vítima de parada cardiorrespiratória ao final de 2022, que infelizmente o deixou com sequelas neuromotoras irreversíveis, após mais de 6 meses de internação, entre longas idas e vindas ao CTI. Meu pai foi muitas vezes desacreditado pela equipe médica e até mesmo por familiares, mas a cada pequeno movimento ou gesto de consciência que fazia, renovava-se minha esperança de que seria possível “trazê-lo de volta”, com muita determinação. A qualificação desta pesquisa, inclusive, foi realizada quando ele lutava pela vida, em coma, no leito de CTI.

Mas eu jamais desisti dele ou de dar continuidade ao doutorado, provavelmente porque tenho uma mãe muito forte, que sempre lutou pela minha educação e me deu forças com seu exemplo de vida. Devo muito a você, mãe! E quero eternizar meu mais sincero agradecimento aqui.

Apesar de ainda acamado, meu pai deu grandes passos em direção à recuperação, diante da realidade que lhe é possível, resgatando habilidades cognitivas que lhe permitiram acompanhar o desfecho desta pesquisa. Nesse processo, o geógrafo Fabrício se viu transformado em enfermeiro, médico, fisioterapeuta, fonoaudiólogo, entre outras especialidades da área da saúde. Agradeço aos profissionais que aqui passaram ou aqui estão por isso. Vocês salvaram a vida do meu pai e me tornaram um geógrafo mais resiliente.

Quanto à pesquisa propriamente dita, quero expressar profundo agradecimento a todos os amigos e moradores das vilas e comunidades de Belo Horizonte que contribuíram diretamente para que fosse possível: Matheus Marley (Morro do Papagaio); Thiago (Aglomerado da Serra); Felipe Ladislau e “Tio Jorge” (Cabana do Pai Tomás); Alexandre “Sub”, Lico (*in memoriam*) e Cristina (Pedreira Prado Lopes); Gabriel Sardenberg e Pastor André (Vila Sumaré). Sem o fundamental apoio de vocês, esta pesquisa não se realizaria.

Agradeço ao meu orientador Ricardo Alexandrino Garcia, por ter estendido a mão a mim e concordado com os desafios da pesquisa, recebendo-me tão bem em

encontros em sua residência e garantindo a calma, paciência e compreensão que foram necessárias para o desenvolvimento da tese, mesmo quando os prazos estavam apertados.

Agradeço ao professor Carlos Henrique Jardim, coorientador desta pesquisa e orientador durante a graduação e o mestrado, pelos equipamentos fornecidos e por ter sido o principal responsável pela minha formação em climatologia geográfica, por quem tenho enorme respeito e admiração. Estendo os agradecimentos ao professor Wellington Lopes Assis, por quem compartilho os sentimentos. Agradeço, também, aos professores Plínio Temba e Daniele Gomes Ferreira pelo aceite do convite para participação na defesa da tese e, em especial à professora Edelci Nunes, por ter sido fonte de inspiração ao jovem Fabrício, ainda aluno de graduação, para o desenvolvimento de estudos climáticos em favelas.

Agradeço ao meu irmão Gustavo Lisboa, a minha companheira Mariana Machado e aos grandes amigos Rafael Gomes e Luiz Fernando Campolina, pelo carinho, suporte emocional, apoio gráfico e ações de revisão no texto da tese. Agradeço aos amigos da extinta, mas inesquecível, Diretoria de Gestão Territorial Ambiental da Semad e a todo o Sisema-MG, pela grande escola profissional que representaram na minha vida, em especial aos amigos: Eder Pereira, Sabrina Accioly, Ricardo Campelo, Caroline Rocha, Gustavo Resende, Gabriela Brito, Zuleika Torquetti, Diogo Franco e Marília Melo.

Agradeço aos parceiros profissionais da empresa Cosmo - Mapeamento Ambiental, em especial ao amigo Vítor Alves, e aos inúmeros estagiários que passaram pela minha jornada, principalmente ao Paulo Henrique Maciel Pádua, que auxiliou no tratamento de parte dos dados espaciais da tese.

Para finalizar a longa seção, agradeço ao Deus de todas as crenças e credos, por ter me abençoado até aqui. E obrigado, São Jorge guerreiro! O santo de devoção do meu vitorioso pai.

RESUMO

A substituição de coberturas naturais por feições urbanas desencadeia série de processos físicos capazes de alterar o balanço de energia em superfície e provocar mudanças na organização do clima, sobretudo até as escalas locais. Isso pode resultar em impactos negativos, tendo como exemplo básico a formação de núcleos de calor. Em ambiente intraurbano, a avaliação dessas alterações encontra dificuldade intrínseca aos instrumentos utilizados, o que dificulta a avaliação quantitativa de fenômenos climáticos, especialmente em áreas de vulnerabilidade social. Em Belo Horizonte, as favelas ocupam área de 15,6 km² ou 5% do território, mas permanece desconhecido se o padrão de disposição de suas formas pode desencadear condições climáticas específicas. Nesse sentido, a pesquisa objetiva compreender o desenvolvimento do canal termodinâmico do clima urbano em favelas de Belo Horizonte, visando a construção de modelo de investigação em escala compatível com os espaços. Para tanto, as comunidades Pedreira Prado Lopes, Morro do Papagaio, Vila Novo São Lucas, Vila Sumaré e Cabana do Pai Tomás foram selecionadas como Unidades Amostrais a partir de critérios técnicos e logísticos definidos. Sensores meteorológicos foram instalados nas comunidades para coleta de dados horários de temperatura e umidade relativa do ar. Os registros foram estatisticamente tratados e compuseram método de análise rítmica do clima, a partir do qual foram avaliados fatores geográficos relacionados à derivação do campo termo-higrométrico nas favelas. Também foram empregados como variáveis na construção de indicador sintético do nível de antropização climática das áreas de estudo, baseado em Análise de Componentes Principais. Os resultados indicaram que a comunidade Cabana do Pai Tomás apresentou as maiores médias de temperatura do ar, tanto no período seco (22,5°C), quanto úmido (25,6°C). Foi também a que obteve maior pontuação no indicador do grau de derivação climática (78,4%), sendo considerada, juntamente da Vila Sumaré, como núcleos de calor em Belo Horizonte. Por outro lado, não houve evidências de que as demais comunidades da pesquisa figurem como tal, em especial o Morro do Papagaio, associado à significativa participação do relevo como controlador climático em nível local.

Palavras-chave: favelas; clima urbano; ilhas de calor; métodos quantitativos.

ABSTRACT

The replacement of natural coverings by urban features triggers a series of physical processes capable of altering the surface energy balance and causing changes in the organization of the climate, especially at local scales. This can result in negative impacts, with the formation of heat cores as a basic example. In an intra-urban environment, the assessment of these changes encounters intrinsic difficulties with the instruments used, which makes it difficult to quantitatively assess climate phenomena, especially in areas of social vulnerability. In Belo Horizonte, the favelas occupy an area of 15.6 km² or 5% of the territory, but it remains unknown whether the pattern of their disposition can trigger specific climate conditions. In this sense, the research aims to understand the development of the thermodynamic channel of the urban climate in favelas in Belo Horizonte, aiming to build an investigation model on a scale compatible with the spaces. To this end, the communities of Pedreira Prado Lopes, Morro do Papagaio, Vila Novo São Lucas, Vila Sumaré and Cabana do Pai Tomás were selected as sampling units based on defined technical and logistical criteria. Meteorological sensors were installed in the communities to collect hourly data on temperature and relative humidity. The records were statistically processed and formed part of a method of rhythmic climate analysis, from which geographic factors related to the derivation of the thermo-hygrometric field in the favelas were evaluated. They were also used as variables in the construction of a synthetic indicator of the level of climatic anthropization of the study areas, based on Principal Component Analysis. The results indicated that the Cabana do Pai Tomás community presented the highest average air temperatures, both in the dry (22.5°C) and wet (25.6°C) periods. It also obtained the highest score in the indicator of the degree of climatic derivation (78.4%), and is considered, together with Vila Sumaré, as hotspots in Belo Horizonte. On the other hand, there was no evidence that the other communities in the study are such, especially Morro do Papagaio, associated with the significant participation of the relief as a climate controller at the local level.

Keywords: favelas; urban climate; heat islands; quantitative methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Camadas verticais de organização da influência do ambiente urbano na atmosfera. 37

Figura 02. Habitação popular de baixa renda típica de Belo Horizonte, em 1920, popularmente conhecida como “cafua”. 47

Figura 03. Extinta favela “Pindura Saia”, associada à abertura da Avenida Afonso Pena, em Belo Horizonte, 1960.....48

Figura 04. Evolução da mancha urbana de Belo Horizonte entre 1918 e 2018. 50

Figura 05. Localização das favelas e estações meteorológicas oficiais do INMET em Belo Horizonte - MG. 51

Figura 06. Espectro eletromagnético organizado por comprimentos de onda. Destaque ao infravermelho termal dado pelos autores. 59

Figura 07. Principais aspectos do relevo, rede de drenagem e de uso e cobertura da terra no município de Belo Horizonte - MG. 67

Figura 08. Distribuição da temperatura média compensada do ar e precipitação mensal acumulada em Belo Horizonte, segundo as Normais Climatológicas do Brasil (1991-2020). 72

Figura 09. Balanço hídrico climático calculado para o município de Belo Horizonte (MG) segundo as Normais Climatológicas do Brasil (1991 a 2020). 73

Figura 10. Roteiro metodológico para desenvolvimento da pesquisa em perspectiva de integração escalar. 77

Figura 11. Frequência de distribuição mensal das imagens termais do satélite Landsat-8 (B10) para Belo Horizonte entre 2013 e 2020 empregadas na pesquisa. 79

Figura 12. *Script* gráfico modelado em ambiente GIS para cálculo automático de temperatura de superfície sobre imagens termais para uma dada área de estudo...82

Figura 13. Concentração espacial de vilas e comunidades em Belo Horizonte estimada por Modelo Densidade de Kernel. 89

Figura 14. Concentração populacional em vilas e comunidades de Belo Horizonte estimada por Modelo Densidade de Kernel. 91

Figura 15. Localização da Unidade Amostral Pedreira Prado Lopes e da comunidade vizinha Vila Senhor dos Passos. 96

Figura 16. Localização da Unidade Amostral Morro do Papagaio e vilas adjacentes, no Aglomerado Santa Lúcia. 99

Figura 17. Localização das vilas e comunidades componentes do Aglomerado da Serra, onde se insere a Unidade Amostral Vila Novo São Lucas. 102

Figura 18. Localização da Unidade Amostral Vila Sumaré. 105

Figura 19. Localização da Unidade Amostral Cabana do Pai Tomás. 108

Figura 20. Registro fotográfico dos abrigos meteorológicos e dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar (A). Perfil esquemático do abrigo (B), contendo 1. teto; 2. lâmina de isopor; 3. tubo PVC (parede externa); 4. tubo PVC (parede interna); 5. calço de madeira para manter afastamento e fixar as paredes externa e interna; 6. parafuso unindo os dois abrigos e o suporte do sensor; 7. suporte do registrador; 8. parafuso da haste que prende o abrigo ao teto; 9. parafuso de união dos dois abrigos (parede externa e interna); 10 lâmina de EVA; 11. registrador; 12. alça externa; 13. arame; 14. lâmina de EVA superposta ao isopor; 15. haste de metal unindo teto e corpo do abrigo. 111

Figura 21. Sensores *dataloggers*, modelo Instrutherm HT-500, dispostos em caixa isolada para aferir a similaridade de medida dos valores de temperatura e umidade relativa do ar no mesmo horário e local. 113

Figura 22. Local de instalação da Unidade Amostral 1, na Pedreira Prado Lopes. 117

Figura 23. Local de instalação da Unidade Amostral 2, no Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia). 119

Figura 24. Local de instalação da Unidade Amostral 3, na Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra). 121

Figura 25. Local de instalação da Unidade Amostral 4, na Vila Sumaré. 122

Figura 26. Local de instalação da Unidade Amostral 5, na comunidade Cabana do Pai Tomás. 123

Figura 27. Local de instalação da Unidade Amostral 6, no bairro Xangrilá, Contagem, MG. 125

Figura 28. RPA multirotor modelo DJI Phantom 4 Pro que foi utilizado na pesquisa. 131

Figura 29. Planejamento de voo do RPA Phantom 4 Pro, na Vila Sumaré, em exibição no aplicativo Pix4D Capture. 133

Figura 30. Exemplos de MDS (a) e MDT com curvas de nível (b) gerados pelo pesquisador em testes realizados em área rural. 137

Figura 31. Esboço esquemático do comportamento de feições vegetacionais analisadas através do NDVI. 148

Figura 32. Modelo para implementação do Índice de Antropização Climática em Favelas. As cores separam as variáveis de entrada por eixos temáticos, sendo amarelo, representativo do campo térmico; roxo, do campo higrométrico; verde, de aspectos morfológicos e vegetacionais da superfície; e rosa, de indicadores socioeconômicos. 154

Figura 33. Temperatura de superfície (°C) nas vilas e comunidades no entorno do centro de exposição Expominas (destaque), nos dias 25/06/2014 (a) e 29/09/2020 (b). 157

Figura 34. Distribuição da temperatura de superfície (°C) nas áreas vegetadas do Aglomerado da Serra (a) e Conjunto Taquaril (b) no dia 01/06/2017. 159

Figura 35. Temperatura de superfície (°C) calculada para as vilas “Pedreira Prado Lopes”, “Buraco Quente” e “Concórdia” (destaque) em 03/01/2015 e 02/10/2015, respectivamente. 160

Figura 36. Evolução da temperatura de superfície média, mínima e máxima nas vilas e comunidades de Belo Horizonte entre 2013 e 2020. 162

Figura 37. Evolução da temperatura superficial estimada por satélite em Belo Horizonte entre 2013 e 2020. 164

Figura 38. Distribuição da temperatura média de superfície remotamente estimada para Belo Horizonte entre 2013 e 2020. 167

Figura 39. Regressão linear calculada entre a temperatura do ar medida nas estações meteorológicas do INMET Pampulha, Cercadinho e Rola Moça e a temperatura de superfície estimada por satélite nos pixels onde se localizam as estações, entre 2013 e 2020. 169

Figura 40. Imagens dos satélites meteorológicos GOES13 e GOES16 para a América Latina em 31/08/2015 (a) e 09/06/2020 (b). 169

Figura 41. Variação da temperatura média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período seco de 2022. 174

Figura 42. Variação da umidade relativa do ar média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período seco de 2022. 175

Figura 43. Encadeamento dos sistemas atmosféricos e tipos de tempo atuantes sobre Belo Horizonte no período seco de 2022. 178

Figura 44. Encadeamento dos sistemas atmosféricos e tipos de tempo atuantes sobre Belo Horizonte no período úmido de 2023. 181

Figura 45. Variação da temperatura média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período úmido de 2023. 183

Figura 46. Variação da umidade relativa do ar média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período úmido de 2023. 184

Figura 47. Análise rítmica horária dos elementos climáticos nas Unidades Amostrais. Recorte temporal episódico de 27 a 31/08/2022 (período seco). 193

Figura 48. Nuvens de pontos geradas por processamento aerofotogramétrico digital, contendo a representação tridimensional e hipsométrica do Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia) e Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra),

respectivamente. Cores mais quentes indicam patamares altimétricos mais elevados. 195

Figura 49. Análise rítmica horária dos elementos climáticos nas Unidades Amostrais. Recorte temporal episódico de 09 a 14/02/2023 (período úmido). 199

Figura 50. Manchete de 14/02/2023, destacando impactos negativos de episódio de precipitação acentuada em curto tempo. 201

Figura 51. Nuvens de pontos geradas por processamento aerofotogramétrico digital, contendo a representação tridimensional e hipsométrica da Pedreira Prado Lopes, Vila Sumaré e Cabana do Pai Tomás, respectivamente. Cores mais quentes indicam patamares altimétricos mais elevados. 203

Figura 52. Especificidades das edificações e estruturas viárias informais observadas na Vila Sumaré (a), Cabana do Pai Tomás (b) e Vila Novo São Lucas (c), a partir do levantamento aerofotogramétrico com RPA. 205

Figura 53. Exemplo de maquete tridimensional gerada a partir do processamento aerofotogramétrico digital do levantamento realizado com RPA no Morro do Papagaio. 208

Figura 54. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 1 - Pedreira Prado Lopes.....213

Figura 55. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 2 - Morro do Papagaio. 214

Figura 56. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 3 - Vila Novo São Lucas. 215

Figura 57. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 4 - Vila Sumaré. 216

Figura 58. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 5 - Cabana do Pai Tomás. 217

Figura 59. Distribuição espacial da variável NDVI (média 2015 a 2021) nas Unidades Amostrais da pesquisa. 219

Figura 60. Distribuição espacial da variável NDBI (média 2015 a 2021) nas Unidades Amostrais da pesquisa. 220

Figura 61. Diagrama da matriz de correlação das variáveis da ACP implementada. Tons azuis indicam correlação positiva, ao passo que tons vermelhos indicam correlação negativa. 222

Figura 62. Correlações entre as variáveis meteorológicas do período seco e úmido e o eixo 1 das novas Análises de Componentes Principais implementadas. 228

Figura 63. Pontuação não ponderada das Unidades Amostrais em relação ao Índice de Antropização Climática em Favelas. 234

Figura 64. Pontuação final (ponderada) das Unidades Amostrais em relação ao Índice de Antropização Climática em Favelas. 235

Figura 65. Manchete destacando o recorde de temperatura do ar alcançado pela estação INMET Pampulha em 25/09/2023. 238

Figura 66. Manchete de 13/12/2023, destacando a ocorrência do quarto episódio de onda de calor naquele ano. 238

Figura 67. Manchete de 16/11/2023, destacando condições microclimáticas comuns às vilas e comunidades de Belo Horizonte que impactam em recordes de temperatura do ar. 238

Figura 68. Manchete de 05/10/2023, destacando resultados do estudo conduzido pela Prefeitura de Belo Horizonte. 242

Figura 69. Interpolação das variáveis temperatura e umidade relativa do ar a partir dos dados médios coletados nas Unidades Amostrais e estações INMET. 245

Figura 70. Distribuição espacial do Índice de Antropização Climática simplificado nas favelas de Belo Horizonte. 247

Figura 71. Regressão linear múltipla calculada entre a temperatura média geral dos períodos de campo e as variáveis geográficas remotamente obtidas. 248

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Frequência de resultados encontrados na pesquisa dos termos "*urban heat island*" e/ou "ilha de calor" em plataformas de hospedagem de periódicos científicos. 45

Tabela 02. Principais características das bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS a bordo do satélite Landsat-8. 78

Tabela 03. Fatores corretivos para os dados de temperatura e umidade relativa do ar medidos entre os sensores *dataloggers* da pesquisa. 114

Tabela 04. Fatores corretivos para os dados de temperatura e umidade relativa do ar medidos entre o modelo de sensor *datalogger* da pesquisa e as estações INMET Pampulha e Juiz de Fora. 115

Tabela 05. Características das bandas espectrais do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2. 149

Tabela 06. Resumo quantitativo das variáveis climáticas mensuradas nas Unidades Amostrais da pesquisa durante o período seco de 2022. 179

Tabela 07. Resumo quantitativo das variáveis climáticas mensuradas nas Unidades Amostrais da pesquisa durante o período úmido de 2023. 189

Tabela 08. Propriedades térmicas dos principais materiais constituintes do ambiente urbano. 192

Tabela 09. Percentual de variância explicada por cada Componente Principal calculada. 224

Tabela 10. Correlação entre cada variável do modelo e as diferentes Componentes Principais. 225

Tabela 11. Escores de participação de cada Unidade Amostral na configuração das diferentes Componentes Principais. 226

Tabela 12. Matriz de pesos propostos para cada variável para cálculo do Índice de Antropização Climática em Favelas. 230

Tabela 13. Valores originais registrados pelas Unidades Amostrais em cada variável do modelo..... 233

Tabela 14. Nova matriz de pesos proposta para as variáveis de cálculo da versão simplificada do Índice de Antropização Climática em Favelas. 246

Tabela 15. Ranqueamento das vilas e comunidades belo-horizontinas com maiores níveis de antropização climática..... 248

LISTA DE QUADROS

Quadro 01: Relação de estudos clássicos estrangeiros sobre ilhas de calor urbanas. 31

Quadro 02. Categorias taxonômicas de organização geográfica do clima urbano nas escalas compatíveis com o fenômeno investigado na pesquisa. 36

Quadro 03. Principais características dos locais de instalação das miniestações meteorológicas nas Unidades Amostrais da pesquisa. 126

Quadro 04. Especificações técnicas do RPA multirotor utilizado pesquisa. .. 130

Quadro 05. Período de realização dos levantamentos aerofotogramétricos nas vilas e comunidades estudadas..... 134

Quadro 06. Recomendações de intervenção no território das vilas e comunidades de Belo Horizonte de acordo com seus níveis de antropização climática. 250

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACP - Análise de Componentes Principais

ANAC - Agência Nacional da Aviação Civil

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

ANOVA - Análise de Variância

APAS - Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul

ASAS - Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais

CMOS - Complementary Metal Oxide Semicondutor

DECEA - Departamento de Controle do Espaço Aéreo

DISME - Distrito de Meteorologia

ESA - European Space Agency

EVA - Espuma Vinílica Acetinada

FPA - Frente Polar Atlântica

GEE - Google Earth Engine

GNSS - Global Navigation Satellite System

GPS - Global Positioning System

GPT - Generative Pre-trained Transformer

IACF - Índice de Antropização do Clima em Favelas

IAUC - International Association for Urban Climate

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICLEI - International Council for Local Environmental Initiatives

IDW - Inverse Distance Weighted

IL - Instabilidade Local

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LI - Linha de Instabilidade

LSD - Least Significant Difference

mTA - Massa Tropical Atlântica

NDBI - Normalized Difference Built-Up Index

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

NIR - Near Infrared

OCR - Optical Character Recognition

ODM - Open Drone Map

PAST - Paleontological Statistics Software Package

PBH - Prefeitura de Belo Horizonte

PRODABEL - Empresa de Informática e Informação de Belo Horizonte

RPA - Remotely Piloted Aircraft

SARPAS - Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas

SCU - Sistema Clima Urbano

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SfM - Structure from Motion

SRTM - Shuttle Radar Topography Mission

SWIR - Short Wave Infrared

TRI - Terrain Ruggedness Index

UBL - Urban Bounday Layer

UCL - Urban Canopy Layer

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais

UMEP - Urban Multiscale Environmental Predictor

USGS - United States Geological Survey

WSDI - Warm Spell Duration Index

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCOU - Zona de Convergência de Umidade

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO 22

HIPÓTESES 28

ESTRUTURA DA PESQUISA 29

CAPÍTULO I – ARCABOUÇO TEÓRICO-CONCEITUAL 30

1.1 O estudo geográfico do clima urbano: escalas e hierarquias 30

1.2 O fenômeno da ilha de calor em áreas urbanas 40

1.3 A formação da metrópole belo-horizontina e o surgimento das primeiras favelas 46

1.4 A derivação antrópica do(s) clima(s) de Belo Horizonte 53

1.5 O uso do sensoriamento remoto e da modelagem quantitativa no estudo geográfico do clima urbano 58

CAPÍTULO II – FATORES GEOECOLÓGICOS DEFINIDORES DO CLIMA BELO-HORIZONTINO E DE SEUS TIPOS DE TEMPO ASSOCIADOS 64

2.1 Fatores de caráter estático 64

2.2 Fatores de caráter dinâmico 69

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS 76

3.1 Aquisição de imagens de satélite e modelagem de produtos termais 78

3.1.1 Tratamento estatístico e análise dos dados termais 84

3.2 Seleção de Unidades Amostrais para a pesquisa 87

3.2.1 Pedreira Prado Lopes 93

3.2.2 Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia) 97

3.2.3 Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra) 100

3.2.4 Vila Sumaré 103

3.2.5 Cabana do Pai Tomás 106

3.3 Realização de trabalhos de campo e instalação de miniestações meteorológicas *in loco* 109

3.3.1 Locais de instalação 116

3.4 Análise dos dados coletados *in loco* 127

3.5 Sobrevoo com Aeronave Remotamente Pilotada para geração de insumos analíticos 129

3.6 Construção do Índice de Antropização Climática em Favelas 138

3.6.1 Implementação da Análise de Componentes Principais 140

3.6.2 Variáveis meteorológicas do modelo 143

3.6.3 Variáveis geográficas do modelo 147

3.6.4 Resumo do modelo 153

CAPÍTULO IV – ANÁLISE DOS RESULTADOS 155

4.1 Distribuição têmporo-espacial da Temperatura de Superfície Terrestre em Belo Horizonte e identificação de núcleos de calor superficiais 155

4.2 Quadro sinótico médio do monitoramento de campo: análise dos dados diários e variação dos tipos de tempo 170

4.2.1 Período seco de 2022 171

4.2.2 Período úmido de 2023 180

4.3 Variação horária dos elementos climáticos e identificação do ritmo climático próprio das favelas 190

4.3.1 Acesso aos produtos derivados do levantamento aerofotogramétrico com RPA 207

4.4 Aplicação do Índice de Antropização Climática em Favelas 210

4.4.1 Resultados da ACP e discussão das variáveis do modelo 210

4.4.2 Síntese e ranqueamento das Unidades Amostrais 228

4.5 Questões socioambientais derivadas e contribuições ao planejamento climático municipal 237

4.5.1 Indo (um pouco) além 243

CONSIDERAÇÕES FINAIS 251

REFERÊNCIAS 253

APÊNDICES 266

ANEXOS 279

INTRODUÇÃO

A construção planejada do município de Belo Horizonte, atual capital do Estado de Minas Gerais, foi realizada no final do século XIX, a partir das influências da filosofia positivista e do pensamento urbanístico moderno da época (ARRAIS, 2010). Sua planta original apresentava como limites territoriais claros a intitulada Avenida do Contorno, que, mais de um século depois, ainda demarca a geometria externa da principal centralidade da cidade, conforme destacado por Fernandes (2017).

A atual extensão territorial da capital mineira, porém, ocupa área aproximada de 331 km² e concentra população de mais de 2,3 milhões de habitantes, o que corresponde a 11,3% de todo o Estado (IBGE, 2022). Segundo dados do mapeamento de áreas urbanizadas da instituição, no ano de 2015, Belo Horizonte possuía 268,7 km² de mancha urbana, o que representava 81,2% do seu território.

Associado à densa ocupação populacional, de quase 7 mil habitantes por km², destaca-se seu representativo tecido urbano, resultante do processo histórico de produção do espaço na metrópole, onde se observou gradativa substituição da paisagem natural por superfícies construídas. Do ponto de vista climático, a introdução de feições e equipamentos eminentemente urbanos desencadeia série de processos físicos capazes de alterar o balanço de energia, sobretudo até as escalas locais, como verificado por autores como Ribeiro (1993), Sant'anna-Neto (1998), Azevedo (2001), Fialho (2009) e Assis (1997; 2001; 2009; 2010), sendo esse último na cidade de Belo Horizonte.

Isso pode resultar em impactos negativos e positivos às populações e ao ambiente urbano, tendo como exemplos básicos, por um lado, a formação de fenômenos que recebem especial atenção nesta pesquisa, como as ilhas de calor e o consequente desconforto térmico associado, conforme destacado por Gartland (2011), e, por outro, o beneficiamento da ventilação natural com a disposição organizada das edificações urbanas, como observado por Campos (2014), em exemplo no município de Curitiba.

Em ambiente intraurbano, contudo, a avaliação das alterações no balanço de energia e dos impactos relacionados encontra dificuldade intrínseca aos

instrumentos e mecanismos utilizados para observação. Cabe destacar, principalmente, a disposição da rede meteorológica nacional oficial[1], que tende a refletir características muito mais voltadas às escalas organizadas entre o clima local e o regional, conforme definidas classicamente por Monteiro (1976), do que às escalas inferiores, onde a influência dos aspectos urbanos é mais fortemente acentuada pela especificidade do tecido antropizado.

Exemplo disso, é o próprio município de Belo Horizonte, que conta com quatro estações meteorológicas oficiais (automáticas e convencionais) do INMET, a estação do Aeroporto da Pampulha, além de pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN. Ainda que relativamente bem abastecida de instrumentação oficial, a disposição da rede, evidentemente, privilegia bairros com ordenamento territorial padrão, que não refletem características das formas agudas de ocupação do espaço.

Se ampliada a consulta à rede de monitoramento meteorológico oficial da Região Metropolitana de Belo Horizonte e de seu respectivo Colar Metropolitano[2], o cenário se mostra ainda mais desafiador, uma vez que estão disponíveis somente três estações meteorológicas oficiais, localizadas nos municípios de Ibirité, Florestal e Sete Lagoas.

Esse cenário dificulta ou mesmo impossibilita, por exemplo, a avaliação quantitativa de fenômenos climáticos urbanos produzidos nas escalas inferiores do clima, como os contrastes térmicos e higrométricos entre hipercentro e periferia, a participação da rugosidade urbana na variação pluviométrica local, a alteração de padrões de advecção de ar e umidade, dentre outros. Isso se deve, principalmente, à descontinuidade espacial dos registros produzidos pelas estações meteorológicas de Belo Horizonte, que estão distantes entre si em pelo menos cinco quilômetros e em contextos paisagísticos distintos.

Além disso, com a malha amostral padrão, nem de longe se torna possível desenvolver pesquisa em espaços urbanos carentes de ordenamento territorial e de

[1] Do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).
[2] Arranjo territorial compreendido pelos municípios do entorno da Região Metropolitana de Belo Horizonte afetados pelo processo de metropolização, com o intuito de integrar o planejamento, a organização e a execução de funções públicas de interesse comum (MINAS GERAIS, 1989).

equipamentos públicos voltados à minimização de impactos ambientais negativos, como é o caso das favelas[3], retratos mais agudos da histórica desigualdade social do Brasil. Segundo dados do MapBiomas (2023), tais formas de ocupação urbana respondem por mais de 106 mil hectares de área no país, sendo que a cada 100 hectares de aumento observado entre 1985 e 2022, 16,5% se deram em áreas de risco.

Em Belo Horizonte, se somadas, são oficialmente 218 vilas, favelas e/ou comunidades urbanas, que ocupam área aproximada de 15,6 km² ou 5% do território municipal, conforme indicado pela base de dados da Prodabel (IDE BHGEO, 2020), muitas das quais localizadas em contextos geomorfológicos e/ou topoclimáticos sensíveis.

Resultado da disposição insuficiente de estações meteorológicas é que ainda permanece pouco estudado o comportamento do(s) clima(s) no interior das favelas, cujo padrão de ocupação e de construção das habitações pode desencadear condições microclimáticas muito específicas, como por exemplo o aprisionamento de calor pela proximidade de estruturas construídas, a obstrução da abóbada celeste pelo adensamento de pavimentos e o sombreamento perene de becos e vielas dispostos de maneira não favorável à iluminação. Nessa seara, destacam-se as contribuições de Silva & Ribeiro (2005) e Machado & Jardim (2014), em trabalhos preliminares realizados em Paraisópolis - São Paulo e no Aglomerado da Serra - Belo Horizonte, além da pesquisa de Kotharkar & Bagarde (2018), conduzida em ambiente bastante heterogêneo no município de Nagpur - Índia.

Também são pouco conhecidos os efeitos adversos resultantes da derivação do clima no interior das favelas da capital mineira na saúde, conforto e/ou bem-estar de sua população. Mesmo após Belo Horizonte registrar, em 2020 e 2023, recordes

[3] Atualmente, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) adota, de maneira oficial, a denominação "Favelas e Comunidades Urbanas", em substituição ao termo "Aglomerados Subnormais". Segundo a instituição, a mudança foi implementada em janeiro de 2024, após ampla discussão com movimentos sociais, comunidade acadêmica e órgãos governamentais, visando refletir abordagem mais condizente com os direitos constitucionais fundamentais da população à cidade, retomando o uso histórico do termo "Favela" pelo IBGE desde 1950 (IBGE, 2024). Para preservar a singularidade cultural e histórica do termo, portanto, a presente pesquisa adotará preferencialmente o termo “favela”, utilizando, também, os termos “vila” ou “comunidade”, quando necessário evitar a repetitividade em trechos do texto.

de temperatura de mais de 110 anos de monitoramento[4], questões sobre como são repercutidos os episódios de ondas de calor nos moradores de vilas e comunidades ou se a intensidade dos episódios nesses espaços é a mesma observada pelas estações oficiais permanecem postas e sem muitas respostas científicas, ratificando a relevância de conduzir pesquisas que explorem essa linha de investigação, capazes de municiar o poder público com diretrizes para tomada de decisão.

Diante do exposto, torna-se desafio complexo desenvolver modelo para investigar a distribuição temporal e espacial dos fatores e elementos climáticos nas favelas de Belo Horizonte, de maneira aderente à escala em que os impactos decorrentes se manifestam. Apropriando-se de Monteiro (1990), como seria possível adentrar às favelas para tomar-lhes a temperatura se a malha de estações meteorológicas oficiais não privilegia esses espaços? Como investigar se a formação de núcleos de calor em Belo Horizonte guarda relação com a localização das favelas? Quais outros impactos estão associados ao clima urbano produzido nesses espaços? Em que escalas e tipos de tempo se manifestam predominantemente?

Diante das diversas questões que a pesquisa propõe tentar responder, a articulação entre escalas climáticas e metodologias de análise surge, sem dúvida, como interessante caminho a ser percorrido. E é aí que entra o papel do geógrafo, ao colocar em diálogo dados meteorológicos da rede oficial para compreensão do quadro local, com produtos derivados de sensores remotos termais e observações de campo contínuas, para avaliar a realidade topo e microclimática específica das favelas belo-horizontinas a partir de estrutura hierárquica, relacionando diferentes escalas espaciais e temporais.

Nessa ótica, o sensoriamento remoto se apresenta, inicialmente, como razoável recurso para superar a descontinuidade espacial dos dados meteorológicos das estações do INMET em Belo Horizonte, ao possibilitar, através do tratamento de séries históricas de imagens termais, a investigação de fenômenos climáticos em múltiplas escalas e extensões territoriais. Imagens de sensores multiespectrais

[4] Temperatura de 38,4°C registrada na estação INMET Belo Horizonte, no dia 07/10/2020, e de 38,6°C medida pela estação INMET Pampulha em 25/09/2023.

embarcados em satélites orbitais, estão disponíveis de maneira gratuita, através de repositórios institucionais em ambiente *web*.

Com a modelagem de alguns desses insumos, cartas referentes à temperatura da superfície terrestre podem ser produzidas para toda a extensão do município de Belo Horizonte e, pontualmente, para suas vilas e favelas, retratando a condição termal superficial dos espaços urbanos e/ou naturais em variados anos, tipos de tempo e estações sazonais, conforme realizado por Barbosa *et al.* (2017) para a mancha urbana de Rennes (França), e por Maciel & Oliveira (2016) e Bezerra *et. al* (2018), nos exemplos brasileiros de Uberlândia (MG) e Belém (PA).

Ao avaliar e correlacionar tais produtos com a dinâmica de sistemas atmosféricos e com a interação entre fatores de superfície locais, como o relevo, a vegetação, o tipo de uso e cobertura da terra e o padrão de ocupação das vilas e comunidades, tem-se o pano de fundo básico necessário para compreender o comportamento dos elementos climáticos nos espaços de estudo da pesquisa, especialmente no que se refere ao canal termodinâmico de percepção do clima urbano, tal como teoriza Monteiro (2003). É somente a partir do entendimento dos processos energéticos e fatores geográficos que influenciam a configuração de padrões e ritmos climáticos próprios das favelas, que a pesquisa finalmente conseguirá responder as questões colocadas.

Além disso, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto, em articulação estatística com dados meteorológicos de campo, abre novas frentes de pesquisa neste nicho, principalmente no que se refere a sua aplicação no estudo geográfico do clima urbano em contextos agudos de ocupação, o que ainda é pouco explorado pela pesquisa brasileira e em ambientes tropicais.

Somada à relevância da pesquisa como fomento ao desenvolvimento de novos estudos climatológicos em vilas e comunidades de outras regiões do país, sua importância se dá, ainda, pela capacidade de provimento de novos métodos e técnicas para mapeamento sistemático de fenômenos climáticos eminentemente urbanos, com potencial de contribuir com a gestão de espaços carentes de infraestrutura urbana e à mitigação de impactos ambientais negativos.

É importante ter em vista, também, que apesar do engajamento socioambiental de grupos e/ou parte dos moradores que habitam esses espaços, cada vez mais organizados e politizados, não necessariamente toda a população possuirá acesso aos meios de divulgação científica que as possibilite conhecer os resultados da pesquisa aqui proposta. Ainda assim, a condução deste estudo se justifica pelo seu potencial de devolução social. Ou seja, enquanto mecanismo proponente de modelo que poderá ser aproveitado por órgãos da administração pública municipal e transformado em ferramenta de planejamento e ação no território, com repercussão direta ou indireta sobre a qualidade de vida das populações.

Ainda é preciso lembrar que as favelas têm sua própria dinâmica de transformação. Investigar como se dá a interação de seus arranjos e formas com a atmosfera não solucionará as lacunas sociais que contribuíram historicamente para o seu surgimento, mas parece ser o caminho para a identificação dos principais problemas e potencialidades geográficas associadas.

Diante do exposto, a pesquisa tem como objetivo geral compreender a dinâmica do canal termodinâmico do clima urbano em favelas de Belo Horizonte, visando a construção de modelo de investigação de seus fenômenos climáticos individuais em escala compatível com os espaços. Tem-se como objetivos específicos:

i. Identificar se há relação espacial entre vilas e comunidades com a formação de núcleos de calor urbanos no município;
ii. Analisar a relação dos fatores geográficos com a variação dos elementos climáticos em escalas compatíveis com as vilas e comunidades de Belo Horizonte;
iii. Desenvolver indicador-sintético para mensurar o grau de antropização climática no interior das favelas avaliadas, a partir da articulação de diferentes métodos e técnicas;
iv. Fomentar o emprego de geotecnologias livres e de métodos quantitativos no estudo geográfico do clima urbano em escalas inferiores.

HIPÓTESES

Consubstanciada pela literatura científica específica e pelos esforços sistemáticos de pesquisadores clássicos e contemporâneos, a serem discutidos com rigor no próximo capítulo, a presente pesquisa parte de premissas e fundamentos básicos que permitiram traçar as hipóteses que nortearão o trabalho. Não se deseja, evidentemente, assumi-las como verdades postas e estabelecidas, mas encará-las como linhas de investigação que poderão ser aceitas ou refutadas a partir dos resultados da pesquisa:

i. A densidade e a proximidade de edificações nas vilas e comunidades reúnem propriedades físicas que favorecem a retenção de calor e criam espaços topo e/ou microclimáticos exclusivos;
ii. Dada a extensiva impermeabilização da superfície, a temperatura do ar no interior das favelas durante o dia será mais elevada do que nos bairros com ordenamento territorial padrão, ao passo que no período noturno, a redução dos valores de temperatura será mais acentuada;
iii. A umidade relativa do ar apresentará comportamento inverso, em que se espera valores inferiores no período diurno no interior das vilas e comunidades, quando comparadas aos bairros de ordenamento padrão;
iv. Em função do mesmo fator destacado, as vilas e comunidades figurarão como potenciais núcleos de calor em Belo Horizonte do ponto de vista superficial, sendo sensíveis aos sistemas sensores remotos;
v. Sob a imposição de sistemas atmosféricos de baixa pressão e tipos de tempo instáveis, porém, espera-se pouca ou nenhuma associação das vilas e comunidades à formação de núcleos de aquecimento;
vi. Vilas e comunidades localizadas no sopé da Serra do Curral estarão sujeitas a mecanismos de circulação específica, tendo o relevo como principal agente controlador do clima, sobrepondo-se à participação das formas urbanas.

ESTRUTURA DA PESQUISA

O presente trabalho está organizado em quatro macro capítulos, contendo subseções nos quais o desenvolvimento da pesquisa será apresentado. Sua estrutura visa garantir a compreensão individualizada e sequencial de cada temática abordada.

No primeiro capítulo é apresentada revisão bibliográfica contendo o arcabouço teórico-conceitual que dará fundamentação à tese e suporte ao leitor. O segundo capítulo trata da caracterização geoecológica do município de Belo Horizonte e seus tipos de tempo associados, permitindo compreender o arranjo geográfico em que se insere a área de estudo.

No terceiro capítulo são apresentados os caminhos metodológicos, insumos e técnicas que foram empregadas para alcance dos resultados e obtenção das respostas às questões elencadas. Por fim, o quarto capítulo apresenta a discussão dos resultados, contendo a descrição analítica de dados e o esforço final de síntese climática da pesquisa.

CAPÍTULO I – ARCABOUÇO TEÓRICO-CONCEITUAL

1.1 O estudo geográfico do clima urbano: escalas e hierarquias

Os primeiros esforços científicos para avaliar as diferenças substanciais observadas entre as temperaturas das áreas urbanas e aquelas mensuradas em áreas rurais se deu na Inglaterra do século XIX, através do químico, farmacêutico e, posteriormente, meteorologista, Luke Howard, que desenvolveu trabalho pioneiro, publicado em edições de 1818, 1820 e 1833, intitulado "*The Climate of London*" (HOWARD, 1833)[5].

Conforme discute Mills (2008), em exercício de revisão, Howard postulou quatro observações gerais a partir das diferenças observadas na temperatura do ar, que mais tarde serviriam como base para a continuidade das investigações por seus sucessores e para a construção do arcabouço teórico-conceitual que daria sustentação ao estudo contemporâneo do clima urbano: i) fontes antropogênicas de calor resultavam no aquecimento da atmosfera, principalmente no inverno; ii) a geometria das superfícies urbanas retinham a radiação e obstruíam sua saída para a atmosfera; iii) o efeito da rugosidade urbana impedia a passagem da luz; e iv) mesmo com a elevada disponibilidade de umidade em todo o país, Londres apresentava evaporação mais veloz do que as demais localidades, mesmo após chuva forte.

Dos ensaios e conclusões iniciais de Howard, inúmeros trabalhos voltados à investigação de fenômenos climáticos específicos das áreas urbanas, como por exemplo as intituladas "ilhas de calor", foram produzidos ao longo dos séculos XIX e XX por pesquisadores de origem, principalmente, europeia, norte-americana e japonesa, conforme revisão bibliográfica sistemática realizada por Stewart (2019), apresentada de maneira traduzida e adaptada no Quadro 01 a seguir.

Apesar de serem tidos como pontapés iniciais do estudo do clima urbano em outros países, é evidente que, em função dos objetivos da presente pesquisa e da indisponibilidade de acesso livre e/ou em idioma inteligível aos trabalhos elencados, este capítulo não se preocupará em abordar todas as contribuições listadas, porém,

[5] Versão da International Association for Urban Climate, escaneada a partir do exemplar original e transcrita para texto através da tecnologia *Optical Character Recognition* – OCR.

caberá destacar aquelas cujo impacto na consolidação do estudo geográfico do clima urbano pela escola brasileira se mostrou mais relevante ou fundamental.

Quadro 01. Relação de estudos clássicos estrangeiros sobre ilhas de calor urbanas.

Autor(es)	Ano de publicação	Idioma de publicação	Cidade ou região estudada
L. Howard	1833	Inglês	Londres (Reino Unido)
É. Renou	1868	Francês	Paris (França)
J. Hann	1885	Alemão	Europa, Índia e EUA
M. Moreno	1899	Espanhol	Cidade do México (México)
W. Hammon & F. Duenckel	1902	Inglês	St. Louis (EUA)
W. Schmidt	1927	Alemão	Viena (Áustria)
A. Treibich	1927	Alemão	Berlin (Alemanha)
A. Peppler	1929	Alemão	Karlsruhe (Alemanha)
C. Brooks	1931	Inglês	Springfield (EUA)
L. Besson	1931	Francês	Paris (França)
K. Sasakura	1931	Japonês	Tóquio (Japão)
A. Budel & J. Wolf	1933	Alemão	Munique (Alemanha)
H. Berg & H. Metzler	1934	Alemão	Hanover (Alemanha)
W. Middleton & F. Millar	1936	Inglês	Toronto (Canadá)
E. Fukui & N. Wada	1941	Japonês	Tóquio, Osaka, Nagoya (Japão)
W. Balchin & N. Pye	1947	Inglês	Bath (Reino Unido)
Å. Sundborg	1951	Inglês	Uppsala (Suécia)
F. Duckworth & J. Sandberg	1954	Inglês	São Francisco (EUA)
E. Einarsson & A. Lowe	1955	Inglês	Winnipeg (Canadá)
H. Shitara	1957	Japonês	Hiroshima (Japão)
M. Takahashi	1959	Japonês	Ogaki, Kumagaya (Japão)
T. Chandler	1960	Inglês	Londres (Reino Unido)
I. Kayane	1960	Japonês	Tóquio (Japão)
T. Sekiguti	1963	Japonês	Ogaki (Japão)
T. Kawamura	1964	Japonês	Kumagaya (Japão)
T. Chandler	1965	Inglês	Londres (Reino Unido)
S. Nieuwolt	1966	Inglês	Singapura
K. Nakamura	1966	Japonês	Nairóbi (Quênia)
E. Fukui	1968	Japonês	Japão
F. Ludwig	1970	Inglês	Dallas (EUA)
Y. Goldreich	1970	Inglês	Joanesburgo (África do Sul)
S. Sham	1972	Inglês	Kuala Lumpur (Malásia)
C. Daniel & K. Krishnamurthy	1973	Inglês	Pune, Mumbai (Índia)
E. Jáuregui	1973	Inglês	Cidade do México (México)
T. Oke	1973	Inglês	St. Lawrence Lowland (Canadá)
T. Oke & G. Maxwell	1975	Inglês	Vancouver, Montreal (Canadá)
T. Oke	1976	Inglês	Vancouver (Canadá)
F. Hannell	1976	Inglês	Quito (Equador)
S. Bowling & C. Benson	1978	Inglês	Fairbanks (EUA)
H. Landsberg	1979	Inglês	Columbia (EUA)

Fonte: Traduzido e adaptado de Stewart (2019).

Nessa ótica, torna-se fundamental discutir o objeto científico de estudo da climatologia geográfica (e não somente do clima urbano), introduzido pelo geógrafo francês Maximilien Sorre, ao romper com a visão estática e separatista do clima estabelecida no início do século XX por expoentes como Köppen (1901) e Hann (1908) *apud* Caracristi (2007).

Até então, os autores citados haviam contribuído para a definição do clima como sendo, em linhas gerais, o "conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera em uma dada porção do espaço". Em análise mais aprofundada, torna-se tarefa simples perceber que o conceito apresentado era desvinculado dos aspectos dinâmicos responsáveis pela gênese dos sistemas atmosféricos e dos tipos de tempo que se desdobram sobre as individualidades de cada porção do espaço, principalmente quando se volta o olhar às especificidades do ambiente urbano.

Foi nesse sentido que Sorre (1951) introduziu a noção de ritmo ao estudo geográfico do clima, como sendo não somente seu objeto, mas seu método de investigação. Isso porque somente com a sucessão habitual dos tipos de tempo sobre uma determinada porção do espaço é que se pode verificar sua relação com a organização espacial dos fatores de superfície em diferentes escalas. É a indução ao ritmo, à continuidade e ao caráter dinâmico e mutável do clima, no tempo e no espaço, em contraste com a visão mais genérica, voltada à identificação dos estados médios da atmosfera.

Partindo da aceitação dos pressupostos teóricos estabelecidos por Sorre, o também francês Pédélaborde (1959) foi outro importante divulgador da concepção de "tipos de tempo" como objeto fundamental do estudo geográfico do clima e influenciador da climatologia dinâmica no Brasil, que estabelecia a definição do fenômeno como sendo produto do conhecimento dos estados atmosféricos organizados em tipos de tempo.

Porém, o modo com que o autor encarava os fundamentos genéticos e dinâmicos do clima, notadamente mais preocupado com a totalidade dos tipos de tempo, diferia-se daquele preconizado pelo primeiro grande expoente brasileiro nessa vertente do conhecimento científico, Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro,

que, segundo Sant'anna-Neto (2001), se interessava mais pelo mecanismo de encadeamento sequencial dos tipos de tempo, ou seja, pelo seu ritmo.

Monteiro (1971) optou por interpretar o clima como produto da interrelação de todos seus elementos componentes, integrados na unidade "tempo" e em sucessão rítmica no mínimo diária, condição dada como necessária à verificação do desenvolvimento e atuação dos sistemas atmosféricos, particularizados em realidades geográficas, a princípio, regionais, e em encadeamento sequencial contínuo. Dessa forma, tornava-se possível identificar não somente os estados médios, padrões ou habituais, mas principalmente as irregularidades rítmicas (ou desvios) do clima, cujo potencial de produção de impactos negativos às populações passaria a ser considerado.

A abordagem rítmica, quando confrontada com as formas agudas de ocupação do espaço das quais trata a presente pesquisa, parece ser o mais seguro caminho teórico-metodológico a seguir, justamente pela capacidade de promoção do conhecimento dos problemas geográficos das vilas e comunidades face ao encadeamento dos mais variados tipos de tempo sobre atuação em Belo Horizonte. Quando desdobrados em dimensões locais, os tipos de tempo seriam justamente respostas dos fatores intervenientes na gênese daquela ordem de grandeza, portanto, geográficos, tais como a morfologia do relevo e as condições de uso e cobertura da terra.

Conforme discute Tavares (1974), expoente contemporâneo de Monteiro, o conceito de "tipo de tempo" está revestido necessariamente de significado geográfico, justamente pela escala em que se configuram os fatores responsáveis pela sua gênese. Entretanto, na análise rítmica do clima não basta unicamente a avaliação dos tipos de tempo, mas a maneira pela qual se dá seu encadeamento e sucessão habitual, em integração escalar. O estudo de tais cadeias de tipos de tempo é que levará à compreensão do ritmo, vista como a essência do estudo geográfico do clima.

A essa altura, está claro que a compreensão do ritmo de sucessão dos tipos de tempo sobre uma determinada localidade está inerentemente associada à dimensão horizontal do espaço geográfico que se propõe investigar. Em outras palavras, a atmosfera enquanto meio fluido e contínuo no espaço, sem limites físicos

claros e rígidos, pode organizar escalas climáticas horizontais, que versam sobre a espacialização da interrelação dos controles atmosféricos com os mais diversos fatores de superfície, inclusive em suas distintas particularidades urbanas.

Além de conceito fundante da ciência geográfica, a escala é intimamente ligada à materialização dos fenômenos climatológicos e a sua associação às categorias de análise do espaço geográfico, principalmente a paisagem, que pode ser compreendida como o núcleo do sistema climático. Para Bertrand (1972), por exemplo, a síntese do conceito de paisagem necessariamente perpassa pelo conceito de escala, que permite compreender os diferentes processos integrados que atuam na transformação dos espaços, em variadas unidades de grandeza. Inclusive cabe provocar: o que seria a paisagem se não o resultado cênico da interação energética de todas as variáveis e processos geoecológicos, incluindo o clima e a sociedade, presentes e atuantes em uma dada porção do espaço?

Para Sotchava (1977), a paisagem (realidade concreta) inclusive deveria ser interpretada como um Geossistema[6], de caráter dinâmico, aberto e hierarquicamente organizado, compreendendo as formações naturais que experimentam os impactos dos ambientes sociais e econômicos. No mesmo ano, Tricart (1977) também postula que o conceito de sistema seria o melhor instrumento lógico para estudo dos problemas do meio ambiente (e por que não do clima?), justamente por ser compatível com a multiplicidade de fatores geográficos em diferentes escalas de organização, que podem desencadear desequilíbrios sistêmicos e/ou impactos ambientais.

Nesse contexto, integra-se efetivamente a participação humana, encarada do ponto de vista climático como variável capaz de derivar ou alterar a organização do clima das escalas inferiores para as superiores, tal como elucidado por Monteiro (2001), ao destacar a relação entre clima e sociedade. Por outro lado, sendo a radiação solar o principal *input* de energia terrestre, responsável pela gênese primária dos mecanismos de circulação atmosférica, em ritmo sequencial de

[6] Categoria de unidade de paisagem proposta por Bertrand (1972), que considera os elementos biogeográficos e antrópicos de transformação do espaço em combinação dinâmica e instável, agindo uns sobre os outros de maneira dialética e indissociável, em perpétua evolução. Mais claramente, Christofoletti (1999) o conceitua (pg. 37) como organizações espaciais resultantes da interação dos elementos físicos e biológicos da natureza, tais como clima, topografia, geologia, águas, vegetação, animais, solos, etc.

interação com os fatores geográficos da superfície, também se torna pertinente concordar com o autor quando elucida (pg. 200) que: "*O comportamento atmosférico, integrado às demais esferas e processos naturais, organiza espaços climáticos a partir das escalas superiores em direção às inferiores*".

Sob toda essa ótica de integração sistêmica, Monteiro (1976) também foi pioneiro na proposição de modelo de organização escalar para o estudo geográfico do clima urbano, a partir de categorias taxonômicas baseadas nas contribuições de Tricart & Cailleux (1956) à sistematização das escalas de trabalho na ciência geomorfológica, além de elementos derivados da Teoria Geral dos Sistemas, Teoria do Caos, Entropia e Matemática das Catástrofes[7]. Desse modo, o expoente brasileiro postulou modelo de organização em que os espaços climáticos das escalas superiores estivessem articulados às condições experimentadas nos níveis mais inferiores, como os microclimas. Para cada escala climática, o autor propôs as estratégias de abordagem mais adequadas, identificando desde o principal fator genético de organização, até os meios de observação e técnicas de análise compatíveis.

Ao analisar os recortes escalares da escola monteriana em que a presente pesquisa se propõe trabalhar, particularmente reunidos no Quadro 02 e detalhados ao longo da tese, fica claro que ao modificar a escala de análise, muda-se necessariamente a instrumentação técnica requerida e o caminho teórico-metodológico de abordagem. É sabido, portanto, que a investigação do quadro térmico e higrométrico do ar e da superfície nas vilas e comunidades de Belo Horizonte dependerá da articulação de diferentes técnicas, mas, principalmente, da realização de trabalhos de campo e observações quali-quantitativas *in loco*, visto sua manifestação preponderantemente associada às escalas micro e topoclimática.

Isso porque a capacidade humana de derivar os espaços e, por consequência, o clima da parcela de ar em interação imediata, será muito mais significativa quanto menor for a abrangência espacial das escalas, tal como

[7] Elementos teóricos mais tarde reunidos na obra "Clima e Excepcionalismo" (MONTEIRO, 1991), que foram utilizados pelo autor para explicar como os sistemas climáticos são caracterizados pela sensibilidade às condições iniciais e como pequenas variações podem desencadear significativas mudanças no comportamento do sistema, em que há de se considerar, também, fatores como desordem e incerteza.

potencialmente ocorre nas áreas de interesse da presente pesquisa. Monteiro (1978) inclusive deixa claro que a ação antrópica tem plena capacidade de “criar” microclimas, bem como de alterar substancialmente os climas locais, que abarcariam, por exemplo, a extensão espacial de grandes cidades e sua influência urbana.

Quadro 02. Categorias taxonômicas de organização geográfica do clima urbano nas escalas compatíveis com o fenômeno investigado na pesquisa.

Escalas cartográficas de tratamento	Espaços climáticos	Espaços urbanos	Estratégias de abordagem		
			Meios de observação	Fatores de organização	Técnicas de análise
1:250.000 1:100.000	Local	Região Metropolitana	Posto meteorológico Posto complementar	Integração geológica Ação antrópica	Análise espacial
1:50.000 1:25.000	Mesoclima	Cidade grande, bairro ou subúrbio de metrópole	Registros móveis (episódios)	Urbanismo	Especiais
1:10.000 1:5.000	Topoclima	Pequena cidade, trechos de bairro	(Detalhe)	Arquitetura	
1:2.000	Microclima	Edificações e habitações	Baterias de instrumentos especiais	Habitação	

Fonte: Adaptado de Monteiro (2003).

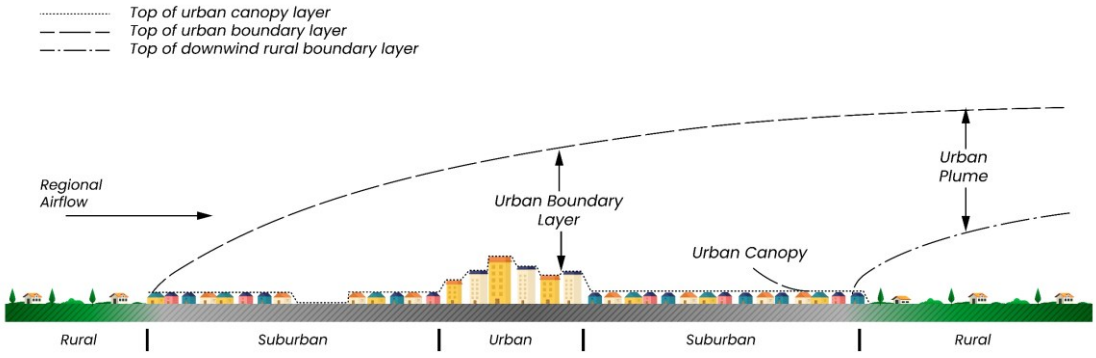
Ao prosseguir com a revisita às obras fundamentais à consolidação do estudo geográfico do clima, principalmente no que se refere ao contexto urbano, também cabe destacar as contribuições trazidas pelo pesquisador canadense Timothy Oke para a construção do conceito de escala vertical. Em esforços sistemáticos desenvolvidos na década de 1970, o autor foi pioneiro ao identificar padrões de organização do clima em ambiente urbano a partir de arranjos verticais, baseados na divisão da influência da superfície sob a atmosfera em camadas com dimensões razoavelmente definidas.

Em linhas gerais, Oke (1976) verificou a ocorrência de plumas de ar em turbulência sobre os tecidos urbanos, que podiam ser separadas em duas camadas de organização vertical. A primeira delas, intitulada *Urban Canopy Layer* (UCL), representa a camada de ar mais próxima à superfície, sob influência direta dos fenômenos físicos responsáveis pelas trocas de calor quando do aquecimento do solo e da irradiação de energia.

No período diurno, em função da elevada disponibilidade de energia advinda da incidência de radiação solar e o consequente aquecimento superficial, a UCL (ou Camada do Dossel Urbano, em português) tende a apresentar razoável expansão vertical, tão maior quanto maiores forem os insumos de energia solar. A partir do aquecimento dos materiais componentes da superfície urbana, a UCL passa a acompanhar o nível médio das rugosidades do tecido, em linearidade vertical compatível com o topo das edificações.

Por outro lado, a *Urban Boundary Layer* (UBL) se manifesta imediatamente acima do dossel urbano e se estende verticalmente até a camada limite planetária[8], podendo ser projetada, a depender das condições de fluxo de ar regional e da sua intensidade, até zonas periurbanas ou mesmo rurais. Segundo Oke (1978), ainda é caracterizada pelo comportamento do ar em turbulência, derivado do aquecimento superficial da rugosidade urbana, mesmo não estando em contato direto com ela. A Figura 01, a seguir, ilustra os conceitos discutidos pelo autor.

Figura 01. Camadas verticais de organização da influência do ambiente urbano na atmosfera.



Fonte: Adaptado de Oke (1976). Vetorizado e colorido por Fabrício Lisboa Vieira Machado.

Ainda na perspectiva vertical de organização escalar da influência humana na atmosfera terrestre, Varejão-Silva (2006) corrobora com o autor canadense ao discutir que, embora não existam limites exatos entre as camadas, que são determinadas de acordo com as propriedades do tecido superficial, há uma transição gradativa entre as parcelas atmosféricas sob efeito da rugosidade. Para além delas,

[8] Também intitulada como “camada de inversão”, compreende a parcela de ar existente entre a troposfera até o limite com a estratosfera, que está diretamente sob influência dos efeitos advindos do contato com a superfície planetária.

na atmosfera livre acima da camada limite planetária, admite-se que o fluxo de escoamento do ar se dá sem atrito ou influência direta das condições de uso e cobertura da terra.

Fica evidente que, pelas características agudas das formas de ocupação eminentemente urbanas que a presente pesquisa busca analisar, em seu diálogo íntimo com a organização de contextos climáticos próprios das vilas e comunidades, a UCL será a escala vertical que melhor abarcará os fenômenos aqui investigados.

Para finalizar, não há como não discutir a principal contribuição de Monteiro (1976) para a construção das bases teórico-metodológicas brasileiras para o estudo geográfico do clima urbano. Consubstanciado pelos fundamentos rítmicos e sistêmicos apresentados, o autor propôs o intitulado Sistema Clima Urbano (S.C.U.), concebido como estrutura singular, aberta, evolutiva, dinâmica, adaptativa e autorreguladora, cuja interpretação e articulação no sistema se dá por meio de três canais de percepção (termodinâmico, físico-químico e hidrometeórico), que representam a hierarquia dos fluxos de energia em ambiente urbano, desde as diferentes fontes de entrada (*inputs*), os mecanismos de transformação e os produtos e efeitos causados sobretudo às populações humanas, encaradas como maiores responsáveis pela apropriação e modificação de tais espaços.

O canal de percepção termodinâmico, que recebe especial atenção no que se refere ao atendimento dos objetivos da presente pesquisa, é tido como constituinte do nível fundamental de resolução climática, para onde convergem e se associam todas as demais componentes. Em outras palavras, o canal termodinâmico atravessa toda a estrutura do S.C.U. por se tratar de seu insumo básico, sendo transformado diretamente pelo balanço energético do ambiente urbano, proporcionado pelas condições morfológicas e de uso da terra agudas e específicas.

Em esquema proposto por Monteiro (2003), a articulação do canal ou subsistema termodinâmico partiria da entrada de radiação solar como fonte primária de energia, que em intercâmbio com a atmosfera antropicamente derivada pelo tecido urbano, sofreria transformações em ritmo de desenvolvimento contínuo e permanente, somente observáveis a partir de técnicas meteorológicas especiais, com tomadas de dados em campo. Sua transformação no sistema produz efeitos negativos e positivos ao ambiente e às populações, dentre os quais a literatura dá

destaque às ilhas de calor e ao desconforto térmico, que serão discutidas na próxima seção. Ainda assim, outros efeitos diretos, tão relevantes quanto, são comumente produzidos no âmbito da transformação da energia no interior do canal termodinâmico, como o aumento da precipitação e a modificação dos padrões de circulação.

Está claro que o foco desta pesquisa se volta ao primeiro fenômeno citado, ao passo que abre mão de explorar questões importantes como as que dialogam com a Geografia da Saúde e a outros efeitos produzidos no âmbito dos canais de percepção físico-químico e hidrometeórico, como a poluição do ar e o desencadeamento de problemas respiratórios, os episódios de enchentes e movimentos de massa associados a eventos extremos de chuva sobre o tecido impermeabilizado das cidades, entre outros observados por variados campos da ciência.

Porém, espera-se que, com a perspectiva de integração entre escalas do clima e com a consideração sistêmica e rítmica dos processos, elementos e fatores intervenientes na configuração do campo térmico e higrométrico das vilas e comunidades de Belo Horizonte, a presente pesquisa alcance resultados que realmente averiguem os diversos efeitos da produção do clima urbano especificamente sobre esses espaços. É adentrar a favela e tomar-lhe a temperatura para compreender seus fenômenos específicos e se realmente podem figurar como ilhas de calor.

1.2 O fenômeno da ilha de calor em áreas urbanas

Como abordado no âmbito dos canais de percepção do clima urbano, o fenômeno da ilha de calor se destaca dentre os principais impactos decorrentes da derivação antrópica do clima nas cidades, fato que aqui recebe especial atenção. Na literatura clássica e contemporânea, sua fundamentação conceitual é subdividida em duas categorias, a saber: a ilha de calor urbana superficial (do inglês, *Surface Urban Heat Island*) e a ilha de calor urbana atmosférica (do inglês, *Atmosferic Urban Heat Island*).

A primeira delas, fortemente amparada pelo desenvolvimento tecnológico experimentado com o advento do sensoriamento remoto e dos sistemas sensores termais, representa a diferença radiativa da temperatura entre superfícies naturais e impermeabilizadas, sendo diretamente influenciada pelas propriedades físicas dos materiais que revestem o solo, tal como destacam autores como Zhou *et al*. (2018) e Hassan *et al*. (2021). É, portanto, avaliada a partir técnicas de processamento digital de imagens de satélite para transformação do fluxo irradiativo superficial em temperatura de brilho.

Como está intimamente ligada ao aporte de radiação solar de maneira direta, a potencial formação de ilhas de calor urbanas superficiais tende a ser mais intensa durante o dia, com magnitudes que variam de maneira sazonal, com ápice predominantemente no verão, sobretudo em ambientes tropicais. Seus esforços iniciais de avaliação no Brasil foram conduzidos por Lombardo (1985), em pesquisa na metrópole de São Paulo.

Por outro lado, as intituladas ilhas de calor urbanas atmosféricas se referem aos efeitos observados na variação da temperatura da parcela de ar no interior da Camada do Dossel Urbano (UCL) e da Camada Limite Urbana (UBL), sendo estritamente associada à geometria urbana e à capacidade das estruturas de absorção e armazenamento de calor, conforme destacam Oke (1988) e Erell & Williamson (2007).

Em perspectiva sistêmica, outros fatores somam-se aos apresentados no que se refere à configuração ou potencialização de episódios de ilhas de calor atmosféricas em ambiente urbano, como a redução de áreas vegetadas nas

cidades, que impactam na diminuição do sombreamento e da evapotranspiração, e o fluxo de calor antropogênico gerado por veículos automotivos, indústrias, atividade metabólica, dentre outras formas humanas de produção do espaço, como observadas por Azevedo (2001), em ritmo semanal, na cidade de São Paulo.

Em linhas gerais, são fatores que reconfiguram o balanço de energia em área urbana, determinando a quantidade de calor sensível a ser dissipado e o saldo energético resultante (ROMERO, 2001). Autores como Oke (1978), Voogt & Oke (1997) e Vide (1999) descrevem o balanço energético (Q^*) de uma parcela de ar em ambiente urbano como sendo produto das seguintes equações:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_S + Q_A \qquad (1)$$

$$Q^* = K\downarrow + K\uparrow + L\downarrow + L\uparrow \qquad (2)$$

Onde:

Q_F = calor produzido pelas atividades humanas;
Q_H = fluxo turbulento de calor sensível;
Q_E = fluxo turbulento de calor latente;
Q_S = energia armazenada pelas superfícies;
Q_A = transporte horizontal de calor por advecção;
$K\downarrow$ = fluxo radiativo de ondas curtas (descendente);
$K\uparrow$ = fluxo radiativo de ondas curtas (ascendente);
$L\downarrow$ = fluxo radiativo de ondas longas (descendente);
$L\uparrow$ = fluxo radiativo de ondas longas (ascendente).

Na seara das propriedades físicas dos materiais e estruturas urbanas que afetam diretamente o balanço energético descrito, cabe destacar o papel do albedo (propriedade de reflectância da luz solar incidida sobre determinado corpo), do calor específico (quantidade de energia, por unidade de massa, necessária para elevar em um grau a temperatura de um dado material) e a condutividade térmica (relacionada à transmissividade e ao armazenamento da energia recebida no interior de um corpo). Isso porque as estruturas de revestimento comumente encontradas na maioria das áreas urbanas brasileiras, como pavimento asfáltico, telha cerâmica ou coberturas metálicas, contribuem negativamente para o aumento do saldo de calor sensível[9] no interior do dossel urbano, justamente por reunirem características

[9] Definido como o tipo de calor que resulta na mudança de temperatura de uma substância sem alterar seu estado físico.

das propriedades físicas destacadas que não são interessantes à dissipação de calor.

Como destacam Vianna & Romero (2018), ao discutir a relação entre os materiais de superfície, a temperatura e a geometria urbana na formação de episódios de ilhas de calor, a depender da disposição das estruturas, condições ainda menos satisfatórias à dissipação de calor podem ser formadas, como os cânions urbanos[10] e a obstrução da abóbada celeste por prédios e edificações com altura expressiva (observada e quantificada a partir de técnicas especiais de fotografia e definição de Fator de Visão do Céu[11]), que podem criar ambientes propícios para o aprisionamento da energia térmica.

Os mecanismos de formação de episódios de ilhas de calor estão intimamente relacionados, portanto, às condições da morfologia e do uso e cobertura da terra em ambiente intraurbano e de suas capacidades de alterar o balanço energético em determinadas escalas, cujo potencial de desencadeamento de problemas socioambientais é reconhecido pela literatura (BRANDÃO, 1996). Porém, poucas são as produções científicas que se preocuparam em avaliar, sistematicamente, os fatores genéticos atmosféricos, portanto, de ordem escalar regional ou zonal, que favorecem ou não a formação das ilhas de calor.

Mais que isso, os leitores mais atentos perceberão que a presente pesquisa vem adotando, fielmente, a terminologia “episódios de ilhas de calor”, justamente porque, a depender do sistema sinótico atuante sobre uma determinada cidade tropical, todo e qualquer processo de desencadeamento de diferenças significativas de temperaturas intraurbanas, que levariam à potencial formação de ilha de calor, pode vir a ser suprimido. Esse fato encontra respaldo na literatura científica, inclusive em trabalho desenvolvido na maior metrópole do país, ocasião em que Tarifa & Armani (2001) observaram a (quase) completa eliminação das características do clima urbano de São Paulo a partir da imposição de uma frente

[10] Espaços moldados a partir da disposição, altura e largura das vias e edificações urbanas, que impedem a incidência da luz solar de maneira direta sobre a superfície na maior parte do ano, podendo potencializar ou arrefecer os efeitos de aquecimento a depender da geometria urbana. Ver exemplo aplicado em Nakata-Osaki *et al.* (2016).

[11] Medida da fração do céu visível em um ponto de observação no espaço urbano, isto é, o grau de obstrução gerado pelo entorno. Quanto maior o Fator de Visão do Céu de uma superfície urbana, maior sua capacidade de resfriamento por ventilação.

fria. E, evidentemente, não se tratou de uma observação episódica, mas de um conjunto de registros rítmicos da frequência de atuação desse sistema de baixa pressão e da resposta da superfície frente à imposição do mecanismo atmosférico.

Em outras palavras, a presente pesquisa quer provocar: qualquer fenômeno de contraste termal intraurbano ou periurbano pode ser considerado como ilha de calor? Seriam elas rígidas e imutáveis no espaço e, principalmente, no tempo? A revisão bibliográfica tem apontado que diversos foram os trabalhos nacionais e internacionais que se debruçaram sobre observações pontuais para a identificação de ilhas de calor urbanas, sobretudo quando empregadas técnicas de sensoriamento remoto, em que assumem a diferença termal episódica como sendo a caracterização do fenômeno supracitado, vide exemplos em Bias *et al*. (2003), Nascimento & Barros (2009), Prina & Trentin (2016), Santiago & Gomes (2016), Tsou *et al*. (2017), Kaplan *et al*. (2018) e Barboza *et al*. (2020).

Análises unicamente pontuais se referem, exclusivamente, à resposta da superfície urbana e/ou da parcela de ar junto ao solo sob influência de determinado sistema atmosférico atuante e tipo de tempo associado. Principalmente quando se trabalha com a interpretação das imagens orbitais termais, trata-se de reflexos da condição do tempo na temperatura naquele exato dia e horário da passagem do satélite sobre a região imageada. Não parece, a este autor, serem elementos suficientes para caracterizar a existência de ilhas de calor e sua capacidade de desencadear processos físicos que alteram a dinâmica de aquecimento e ventilação dos espaços urbanos.

O próprio professor Monteiro (2015), em uma das suas últimas contribuições científicas, destacou que:

> “A geração da ilha de calor é suficiente para desencadear uma ventilação urbana, que se alterna com aquela local do quadro geoecológico e aquela mais ampla da circulação regional. Só esse fato justificaria a necessidade de uma observação meteorológica específica, reveladora daquilo que a observação padronizada procura evitar. A pesquisa do clima da cidade implica, obrigatoriamente, em observação complementar fixa permanente, bem como trabalho de campo(...)” (MONTEIRO, 2015, p. 114).

O que se propõe aqui é que, independentemente do método e técnica de análise utilizados para identificação de ilhas de calor urbanas, a serem discutidas com profundidade no capítulo metodológico da pesquisa, a comunidade científica

brasileira volte o olhar à questão do ritmo, da escala e da integração sistêmica entre controles atmosféricos e fatores intervenientes de superfície. Prender-se ao que ocorre no interior da UCL, sem a cuidadosa relação com o encadeamento dos tipos de tempo que podem favorecer, ou não, a formação de ilhas de calor é assumir situações episódicas como verdades. É se preocupar simplesmente em apresentar resultados a partir de um modelo matemático ou da simples representação cartográfica e se afastar da profundidade científica requerida.

Há de se falar, ainda, até em *glamourização* da temática, que é vista muitas vezes como agenda política em instituições governamentais, mas que não necessariamente se traduz em políticas públicas ou ações diretas no território para mitigação ou minimização de efeitos negativos das ilhas de calor sobre as populações e o ambiente urbano.

Por fim, e de maneira ilustrativa à questão colocada, foi realizado breve exercício de análise bibliométrica sobre produções científicas nacionais e internacionais em periódicos de alto impacto, atualizadas até o mês de setembro de 2022. Pesquisou-se pelos termos "*urban heat island*" e/ou "ilha de calor" nas plataformas Scopus, Web of Science e Scielo, com o objetivo de quantificar o volume de trabalhos que se preocuparam, em alguma medida, em avaliar os processos físicos de formação do fenômeno, sua conceituação ou que desenvolveram pesquisas aplicadas localidades diversas.

Como revela a Tabela 01, se somadas as diferentes plataformas de hospedagem de produções acadêmicas, os termos associados aos fenômenos das ilhas de calor urbanas somam mais de 20 mil resultados, com concentração majoritária nos bancos de dados internacionais (Scopus e Web of Science), com mais de 98% dos trabalhos.

Em pesquisa menos refinada, através da plataforma Google Acadêmico, são listados mais de 110 mil resultados, mas é preciso ter cautela quanto a este número, uma vez que, apesar de direcionar a busca para repositórios de natureza científica, os resultados podem trazer contribuições de menor expressão, como resumos e artigos rasos contendo resultados preliminares, geralmente apresentados em congressos e simpósios. Também vale ressaltar que a partir da nonagésima nona página de resultados é apresentado erro interno de requisição aos servidores do

Google Acadêmico, não sendo possível atestar a fidelidade semântica de todos os trabalhos listados com os termos iniciais de busca. Ainda, por não se tratar de uma plataforma de hospedagem científica completa, recurso importante como listar os trabalhos pelo número de citações em outras produções, não está disponível.

Tabela 01. Frequência de resultados encontrados na pesquisa dos termos "*urban heat island*" e/ou "ilha de calor" em plataformas de hospedagem de periódicos científicos.

Portal de periódicos	Nº de publicações	%
Scielo Brasil	71	0,34
Scopus	10151	48,89
Web of Science	10540	50,77

Fontes: Scielo Brasil, Scopus e Web of Science. Acesso em setembro/2022.

Indiscutivelmente, os trabalhos mais citados são as contribuições iniciais de Oke (1982) ao estudo das bases energéticas do fenômeno das ilhas de calor nas áreas urbanas, em especial no interior da camada do dossel, e de Arnfield (2003), com seu artigo de revisão após duas décadas de desenvolvimento desse nicho específico da ciência climatológica e do advento de novas tecnologias.

Porém, diante dos números expressivos observados pela breve análise bibliométrica apresentada, da constatação de Zhou *et al*. (2018) sobre o aumento significativo de artigos em periódicos internacionais envolvendo a temática das ilhas de calor urbanas a partir do ano de 2005 (em especial as de caráter superficial), e da observação da generalização do conceito em parte das produções literárias, procura-se, aqui, evitar o emprego desmedido do termo. Portanto, optar-se-á muito mais por identificar e interpretar os potenciais "núcleos de aquecimento" existentes em Belo Horizonte e sua correlação com as vilas e comunidades pesquisadas.

Será com base na problemática apresentada, ancorada pelo arcabouço teórico-metodológico das matrizes "monterianas", que a presente pesquisa prosseguirá, integrando resultados remotamente obtidos e observações empíricas à análise rítmica do clima em escalas compatíveis com as áreas de estudo e seus fenômenos investigados. Para isso, inicialmente, cabe compreender o processo histórico de formação da cidade de Belo Horizonte e o conjunto de fatores, de ordem social, política e/ou ambiental, que culminaram no surgimento e estabelecimento das favelas na capital mineira, *locus* de estudo primordial deste trabalho.

1.3 A formação da metrópole belo-horizontina e o surgimento das primeiras favelas

Da planta original projetada por Aarão Reis no século XIX à conformação do expressivo tecido urbano atual, Belo Horizonte se desenvolveu a partir de centralidades, notadamente tendo o interior da Avenida do Contorno como principal ponto de partida. No local, havia pequeno arraial intitulado “Curral del Rei”, que deu lugar ao projeto urbanístico que promoveu a construção planejada de Belo Horizonte como nova capital do Estado de Minas Gerais, em substituição ao município de Ouro Preto.

Como discorrem Arreguy & Ribeiro (2008a; 2008b), em exercício de memória da história dos bairros de Belo Horizonte, o plano da nova capital previa a divisão da cidade em três áreas, sendo uma central, denominada urbana, uma outra intitulada suburbana, no entorno dela, e uma terceira denominada como rural. A população à época em que a nova capital foi inaugurada, em 1897, era basicamente composta pelos antigos habitantes do Curral del Rei, por funcionários públicos transferidos de Ouro Preto e por trabalhadores que foram empregados nas atividades de construção civil.

A cidade se expandiu a partir da área urbana inicial, que recebera atenção especial no que se refere ao aporte de infraestrutura e equipamentos públicos, como meios de transporte, fornecimento de serviços de energia e saneamento, comércio, escolas e hospitais. Por outro lado, as áreas suburbanas experimentaram crescimento de forma mais desordenada, não necessariamente seguindo padrão de arruamento ou desenho urbano. As primeiras favelas, como ressaltam os autores, inclusive surgiram já no início do século XX, como reflexo da desigualdade social entre o interior da área central de Belo Horizonte e o ambiente externo à Avenida do Contorno, e da visão de planejamento urbano que não incluiu os operários.

O registro oficial da primeira vila de Belo Horizonte, e, também, da primeira utilização da palavra “favela”, está atribuído à “Favella Alto da Estação”, que esteve localizada no que hoje é uma consolidada zona boêmia da capital: a rua Sapucaí, no bairro Floresta. Pela sua localização imediatamente vizinha à principal estação de trem da cidade, a vila reuniu os trabalhadores da construção civil e populações em êxodo rural que tinham acesso facilitado ao meio de transporte.

Foi, portanto, o primeiro exemplo de que a ocupação real do espaço belo-horizontino seria diferente do idealmente projetado pela equipe técnica e política envolvida, mesmo com as tentativas do poder público municipal de evitar que a população desrespeitasse o planejamento original da cidade.

Mesmo com a remoção de 300 moradias irregulares de baixa renda da Favella Alto da Estação, em 1902, e transferência para o que hoje são os bairros Santa Efigênia e São Lucas, a prefeitura não conseguiu evitar a instalação de novas habitações populares, mais tarde, às margens do Ribeirão Arrudas (principal curso d'água e nível de base local de Belo Horizonte). Aos barracões e casebres populares da época, comumente construídos a partir de madeira, barro e alvenaria básica, dava-se o nome de "cafua", vide exemplo ilustrado da Figura 02 a seguir.

Figura 02. Habitação popular de baixa renda típica de Belo Horizonte, em 1920, popularmente conhecida como "cafua".

Fonte: Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte (2008).

Nas duas primeiras décadas do século XX, no interior da área central urbana, as moradias mais pobres se estabeleceram sobretudo às margens dos Córregos Leitão e Barroca, de onde as famílias retiravam água, localizados em áreas que hoje sediam os bairros Lourdes, Santo Agostinho e Barro Preto. Esse último bairro, inclusive, foi construído pela prefeitura em 1909 com a alcunha inicial de "Bairro Operário", para onde eram enviadas as famílias despejadas das margens dos córregos citados.

Com canalização dos córregos e a valorização dos novos imóveis construídos na região central, nas décadas de 1930 a 1970, as famílias de baixa renda acabaram por se deslocar para bairros mais longes do centro. Exemplo disso está no surgimento do que hoje é a maior comunidade de Belo Horizonte, o Aglomerado da Serra, no sopé da Serra do Curral. Sua formação remonta ao processo de remoção de moradias irregulares do interior e/ou das margens da área urbana central e da chegada de populações do interior do Estado, na esperança da oferta de emprego pela capital.

Ao contrário do que já se observava em alguns bairros mais próximos, o Aglomerado da Serra não contava, até o início dos anos 1980, com serviços básicos como energia elétrica, água e esgoto encanado. Segundo o próprio Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte, grande parte das conquistas obtidas pelas vilas componentes foram fruto do esforço e pleito de seus moradores (ARREGUY & RIBEIRO, 2008c).

O padrão de moradia das favelas a partir da segunda metade do século XX já se diferia em relação às cafuas do início dos anos 1920, como pode ser observado no exemplo de ocupação irregular da Figura 03, mas ainda refletiam a situação social completamente marginalizada face à área urbana central de Belo Horizonte, certamente com implicações no bem-estar das populações.

Figura 03. Extinta favela “Pindura Saia”, associada à abertura da Avenida Afonso Pena, em Belo Horizonte, 1960.

Fonte: Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte (2008).

Com a expansão de Belo Horizonte em direção às zonas suburbanas e rurais a partir das décadas de 1940 e 1950, motivada pela quase inexistência de terrenos livres no interior da Avenida do Contorno e pela necessidade de instalação de novas indústrias, experimentou-se a conexão entre centralidades. Foram construídas as avenidas Antônio Carlos e Pedro II, que conectavam a área urbana central, com as regiões mais afastadas da cidade, como o complexo modernista da Pampulha e o antigo povoado de Venda Nova.

Sobre esse último, trata-se do foco de ocupação mais antigo documentado nos limites do que hoje é Belo Horizonte, remontando ao início da formação do Curral del Rei no século XVIII. Surgiu como ponto de parada e descanso dos tropeiros responsáveis pelo abastecimento das regiões de mineração de ouro e diamante do Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, que tinham como rota os cursos dos rios São Francisco e das Velhas. Em analogia à estrutura territorial atual, os bairros Minas Caixa, Letícia e São João Batista são os que possuem núcleo de povoamento inicial mais antigo do que a própria cidade, sendo originalmente administrados pelo município de Sabará.

Com a construção da área central urbana de Belo Horizonte e a desapropriação dos antigos moradores do Curral del Rei, a região de Venda Nova experimentou crescimento populacional gradativo, associado ao fato de que os valores remunerados pelo poder público em função da desapropriação não eram suficientes para aquisição de um imóvel na nova capital, o que forçou as antigas populações a buscarem locais mais afastados.

Mais tarde, diante da industrialização belo-horizontina e o crescimento vertiginoso em direção ao vetor norte da capital, as décadas de 1950 e 1970, trouxeram as primeiras ocupações irregulares nessa porção do território. A mais famosa delas foi a Vila Apolônia, associada à migração de famílias vindas do interior de Minas Gerais e do Estado da Bahia (ARREGUY & RIBEIRO, 2008c).

A segunda metade do século XX foi representada pelo aumento substancial da população de Belo Horizonte e pela reprodução das desigualdades nas relações de classe no espaço urbano, conforme discute Oliveira (2022). Ao trabalhar com dados censitários históricos, que a partir do ano de 1955 passaram a considerar as populações residentes em favelas, o autor destaca o crescimento, de quase quatro

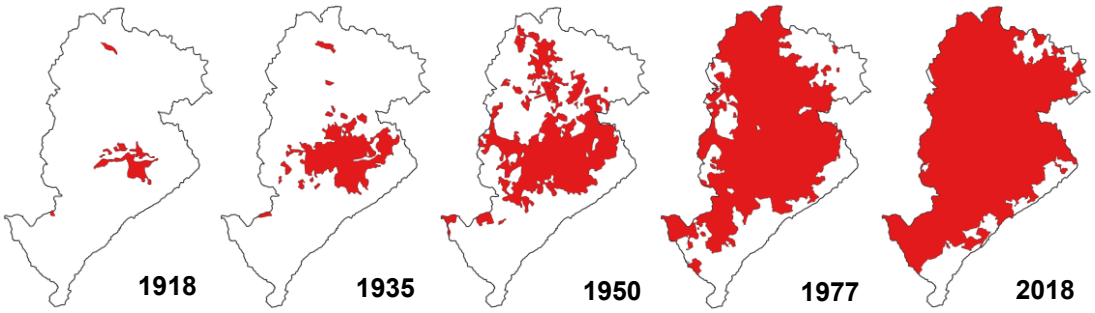
vezes, do número de habitantes de vilas e comunidades na capital em apenas dez anos, variando de 36.432, em 1955, para 119.799 em 1965.

Esse fato alertou as autoridades da época para a questão da pobreza humana como problema a ser enfrentado, muito em função, porém, da imagem ruim que a questão gerava para a então intitulada terceira capital brasileira. Foi nessa seara que, segundo o último autor, políticas urbanas de “desfavelamento”, com foco na construção de habitações populares padronizadas e assistência social, encontram seu berço.

Nos dias atuais, com a estrutura do seu território consolidada[12], Belo Horizonte tem distribuição espacial relativamente homogênea de suas favelas, vilas e comunidades, com condições de construção e acesso a serviços públicos, ainda que precárias, razoavelmente melhores do que os observados ao longo do resgate histórico da capital. É fato que acompanharam a expansão urbana da cidade e a desigualdade social entre o planejado e o executado, estando especialmente concentradas, atualmente, nas regionais administrativas Centro-Sul, Leste e Norte e, em menor proporção, na Pampulha, Noroeste e Venda Nova.

O esquema de evolução da mancha urbana de Belo Horizonte ao longo dos séculos XX e XXI, conforme Figura 04, ilustra o processo de transformação da cidade, enquanto a Figura 05, apresentada na sequência, revela o atual arranjo espacial das favelas no interior de seu território político-administrativo.

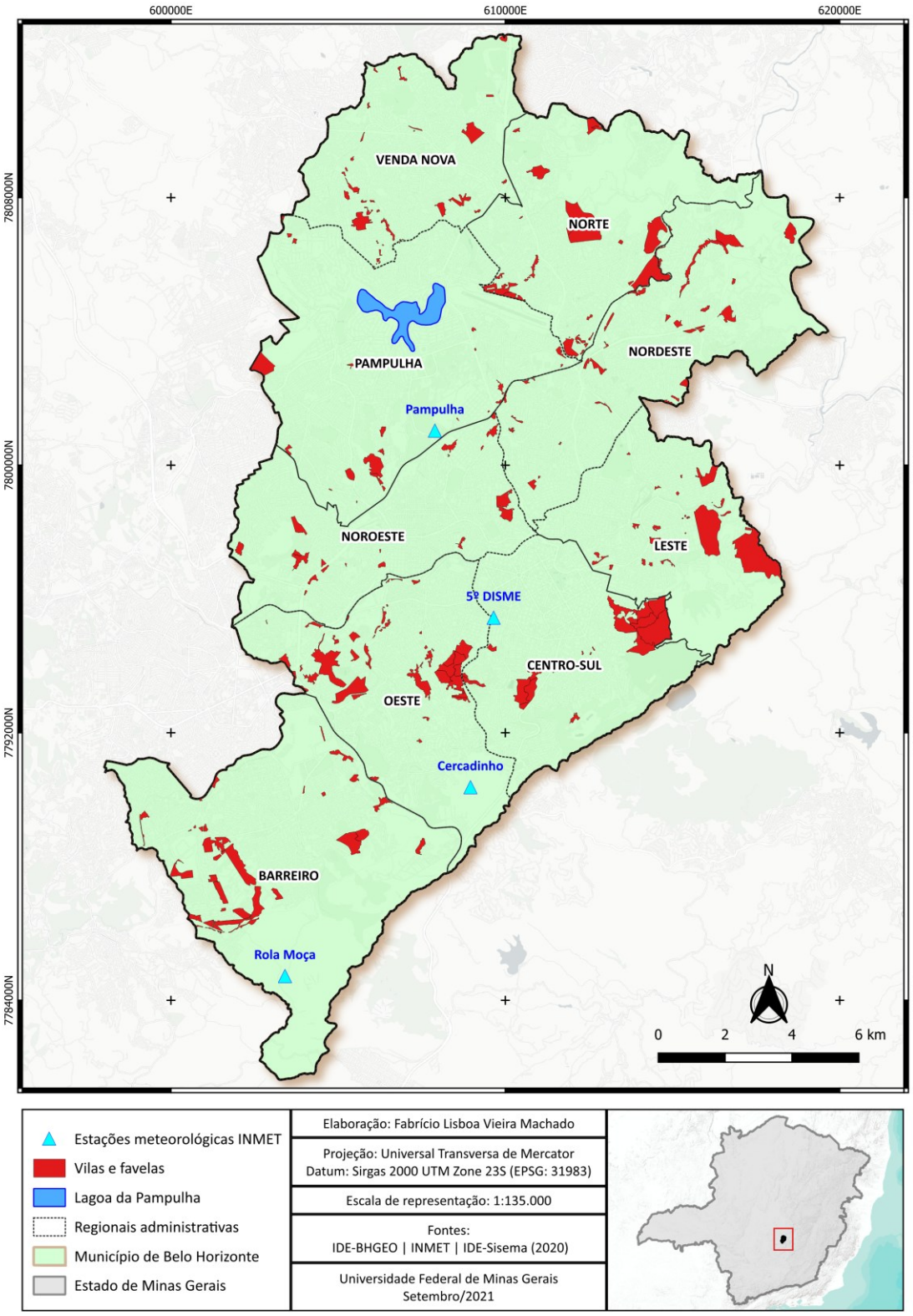
Figura 04. Evolução da mancha urbana de Belo Horizonte entre 1918 e 2018.



Fonte: IDE BH-GEO.

[12] Conforme determinam as normas fundamentais de ordenamento asseguradas pelo Plano Diretor Municipal (BELO HORIZONTE, 2019).

Figura 05. Localização das favelas e estações meteorológicas oficiais do INMET em Belo Horizonte - MG.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Não há dúvidas de que as regionais administrativas Oeste, Noroeste e Centro-Sul, onde se encontram conjuntos de favelas tradicionais, como a Cabana do Pai Tomás, Pedreira Prado Lopes e o Aglomerado da Serra, estão marcadas na história da formação e expansão da cidade de Belo Horizonte. E, em função do conjunto de características-chave que possuem, do ponto de vista geoecológico, merecem especial atenção na presente pesquisa, sobretudo no que se refere aos seus aspectos climáticos.

Nesta seção, porém, procurou-se discutir o processo de surgimento das vilas e comunidades da capital mineira em abordagem mais historiográfica, reservando o capítulo metodológico posterior para apresentação dos fundamentos técnicos que conduzirão à seleção de favelas-modelo para estudo geográfico de seus fenômenos climáticos urbanos.

Antes disso, cabe discutir o processo de modificação do balanço de energia e reorganização das unidades climáticas experimentado por Belo Horizonte, que acompanhou a modificação do tecido urbano e transformações na paisagem ao longo de um século de monitoramento meteorológico.

1.4 A derivação antrópica do(s) clima(s) de Belo Horizonte

O processo de transformação da paisagem belo-horizontina, sobretudo no que se refere à substituição das superfícies naturais por elementos construídos, desencadeou série de alterações no balanço energético dos espaços, em níveis de organização escalares que variam dos microclimas ao clima local.

Em três décadas de avaliação sistemática, diversos autores se debruçaram sobre o exercício de identificar e quantificar a natureza das transformações do(s) clima(s) da capital mineira e a consolidação de um potencial sistema clima urbano próprio. Neste aspecto, destacam-se as contribuições mais incisivas associadas à Assis (1997; 2001) e, especialmente, Assis (2010), que em sua tese de doutorado, avaliou a derivação antrópica do clima em Belo Horizonte em perspectiva têmporo-espacial.

O autor lançou mão de variado conjunto de métodos e técnicas, incluindo análise de séries históricas de dados meteorológicos, trabalhos de campo para registros fixos e móveis de elementos climáticos, aplicação de modelos geoestatísticos e análise espacial de fatores geográficos, para definir unidades climáticas naturais e urbanas em Belo Horizonte.

Embora alvo de profundas transformações nas condições de uso e cobertura da terra ao longo de mais de um século de formação, constatou-se, primeiramente, que a capital mineira ainda possuía conjunto de características físico-ambientais, associadas sobretudo ao relevo e aos controles atmosféricos predominantes, que caracterizavam tipos climáticos naturais, cuja configuração espacial guardava relação com as unidades climáticas urbanas locais.

Nesse nível de organização escalar, o autor identificou duas grandes unidades naturais, intituladas como “Clima Tropical de Altitude da Depressão de Belo Horizonte” e “Clima Tropical de Altitude das Serras do Quadrilátero Ferrífero”, com subdivisões que definiam respectivos mesoclimas e topoclimas, particularizados fundamentalmente pela interação dos parâmetros meteorológicos sobre aspectos geomorfológicos do tecido natural de Belo Horizonte, como a altitude e a topografia.

Em linhas gerais, a unidade climática natural local associada à depressão belo-horizontina ocupava justamente a área onde surgiram os primeiros

assentamentos urbanos, como o interior da Avenida do Contorno e os núcleos de povoamento originais de Venda Nova. Era, também, a unidade natural que compreendia o local de instalação atual da maior parte das vilas e comunidades de Belo Horizonte, com relevo suavemente ondulado e patamares altimétricos entre 675 a 1000 metros.

Já a unidade climática natural local associada às serras do Quadrilátero Ferrífero era aquela cujo fator relevo se impunha como principal mecanismo de controle nas escalas citadas de organização do clima, com altitudes que alcançavam mais de 1500 metros, vertentes declivosas e vales encaixados, fatores que acentuam padrões de circulação do ar catabáticos e anabáticos e favorecem a formação de nebulosidade local.

Por outro lado, as transformações experimentadas pela produção antrópica do espaço em Belo Horizonte ao longo do século XX promoveram a reorganização dos aspectos naturais do clima nas escalas inferiores, bem como sua derivação especialmente nos níveis topo e mesoclimático. Com isso, observou-se a conformação de novas unidades climáticas, eminentemente urbanas, cujos mecanismos de individualização escalar se tornaram muito mais associados às condições de impermeabilização e verticalização do tecido urbano, do que estritamente associados ao modelado do relevo. No nível local, as unidades climáticas citadas deram lugar a novos arranjos homônimos, mas agora representativos da manifestação do sistema clima urbano da cidade.

Ao analisar série temporal de quase um século de dados meteorológicos, além de realizar baterias de trabalhos de campo para observação via transectos, o autor citado dá destaque aos efeitos da produção antrópica do espaço principalmente sobre o aumento da temperatura mínima do ar em Belo Horizonte. Isso porque, ainda que observadas flutuações e tendências positivas de aumento nas temperaturas médias e máximas ao longo do século XX, houve períodos em que o comportamento dos elementos registrou décadas de diminuição gradativa e sequencial, mesmo a partir dos anos 1990 e consolidação do expressivo tecido urbano da capital, fato que esteve majoritariamente associado à imposição de

mecanismos de controle cíclicos, de ordem macroescalar, capazes de modificar o transporte e a distribuição de calor de maneira sistemática[13].

Isso não ocorreu, porém, em relação às temperaturas mínimas, em que foram observadas muito mais evidências da participação da produção antrópica do tecido belo-horizontino no aumento de seus valores anuais e na derivação de suas características naturais, tendo sido o elemento que registrou maior elevação média entre 1911 e 2009 (da ordem de 2,7°C), especialmente entre 1986 e 2009. Isso é justificado pelo fato de que a temperatura mínima é muito sensível à alteração das condições de uso e cobertura da terra e, por consequência, do balanço energético das escalas inferiores, com variações que podem ser observadas e mensuradas em curto prazo.

Autores como Jardim & Silva (2017) corroboraram com o acima evidenciado, ao realizarem estudo comparativo dos episódios de extremos de temperatura do ar entre os municípios de Belo Horizonte e Ibirité. Neste exercício, a tendência de aquecimento das mínimas do ar na capital mineira entre 1961 e 2014 foi positiva, com correlação entre tempo (anos) e valores de temperatura de quase 60%.

Contudo, os autores chamam atenção para o fato de que, apesar da participação crescente das fontes de calor de origem antropogênica e desenvolvimento do clima urbano de Belo Horizonte ser importante, não se deve perder de vista o quadro ambiental em que se inserem, uma vez que a capital mineira está em região de clima tropical, com saldo de calor excedente na maior parte do ano, fato que pode potencializar os extremos observados nas temperaturas e os impactos negativos associados.

As transformações humanas sobre os climas locais da capital mineira também foram observadas na variação da umidade relativa do ar, que no mesmo século de observação de dados, registrou redução de 7%, com menor média anual justamente associada aos anos de 1980 a 2005, onde a expansão da mancha urbana foi significativa e as áreas verdes, que são indutoras de vapor d'água na baixa troposfera via processos evapotranspirativos, observaram cada vez mais retração.

[13] Tais como o El Niño Oscilação Sul (ENOS), sobretudo em sua fase positiva, intitulada La Ninã, e a influência que exercem sobre a temperatura da superfície marítima.

Sobre a influência da derivação antrópica do clima na variabilidade dos totais pluviométricos anuais ao longo do território belo-horizontino, a literatura encontra respaldo, principalmente, no que se refere à ação da rugosidade urbana na acentuação de processos convectivos. Nesse contexto, Assis (2009) observou os efeitos da ascensão mecânica do ar provocados pela morfologia urbana e pela densidade de área construída nos bairros Buritis e Estoril, que são notadamente caracterizados pela acentuada verticalização de suas edificações. Na ocasião, foram observados indícios de aumento induzido no volume de precipitação anual, o que pode desencadear impactos hidrológicos negativos quando o planejamento urbano não está orientado à variabilidade dos fenômenos climáticos.

Nesse contexto, vale destacar que um dos subprodutos do canal de percepção do clima urbano associado aos aspectos hidrometeóricos e à baixa capacidade de suporte do território é a ocorrência de eventos como enchentes, alagamentos e deslizamento de encostas. Dessa forma, quando se discute a derivação antrópica do clima em metrópoles como Belo Horizonte, há de se destacar, também, a participação humana na potencialização de impactos negativos, não com a capacidade direta de alterar os mecanismos genéticos dos sistemas causadores de chuvas, mas com plena propriedade para alterar as condições de revestimento da superfície de modo a melhor absorver, ou não, os impactos de um determinado evento de precipitação extrema. Nesse sentido, Lucas (2015) destaca:

> “Apesar das chuvas serem o agente deflagrador dos impactos hidrológicos, particularmente a sua intensidade, elas não são o principal fator que determina a localização geográfica dos mesmos. Esta distribuição e densidade espacial são dadas pelas características físicas da paisagem, como a interação entre a geologia, morfologia do terreno, forma da bacia e uso e ocupação do solo” (LUCAS, 2015, p. 270).

Em síntese, as unidades climáticas urbanas de Belo Horizonte são de fato reflexos das suas condições de edificação, impermeabilização, fluxo de pessoas, veículos e atividades relacionadas, mas ainda sob influência dos controles naturais, de ordem atmosférica e fisiográfica, que são capazes de mitigar ou acentuar diferentes formas de manifestação do clima urbano.

Nas pesquisas citadas, os aspectos topoclimáticos das vilas e comunidades da capital mineira não foram o cerne da discussão, mas é importante ressaltar que,

ainda assim, parte dos núcleos de aquecimento do ar identificados pelos autores resguardam relação espacial com áreas de ocupação irregular e de alto adensamento populacional, principalmente nas zonas periféricas do núcleo urbano central. E não foram exatamente nessas regiões que a história revelou o surgimento das primeiras favelas? Caberá, agora, articular métodos e técnicas que o progresso científico e tecnológico recente permitem empregar, para preencher as lacunas deixadas e buscar responder as questões da presente pesquisa.

1.5 O uso do sensoriamento remoto e da modelagem quantitativa no estudo geográfico do clima urbano

A despeito das limitações intrínsecas ao uso de produtos orbitais para estudos climáticos, como a baixa resolução espacial[14] de alguns sistemas sensores ou a elevada cobertura atmosférica por nebulosidade durante tipos de tempo instáveis, o emprego do sensoriamento remoto agrega expressiva escalabilidade e poder de síntese às pesquisas em áreas urbanas. Isso porque possibilita o aproveitamento de séries temporais de imagens e a modelagem de produtos termais para identificação, entre outras coisas, de núcleos de calor.

A crítica a sua aplicação de maneira desprendida da abordagem geográfica do estudo do clima já foi apresentada em seções anteriores, mas, por se constituir como elemento metodológico complementar, mas muito importante, da presente pesquisa, cabe destacar os princípios físicos por trás de seu funcionamento e as principais produções acadêmicas com afinidade temática aos objetivos gerais aqui buscados.

Em primeiro lugar, torna-se importante resgatar que todo corpo com temperatura acima de 0K (ou -273,15°C) emite radiação eletromagnética, conforme postulado pela Lei de Planck. Trata-se do nível de agitação molecular e da produção de energia cinética do corpo, transformada em resposta térmica.

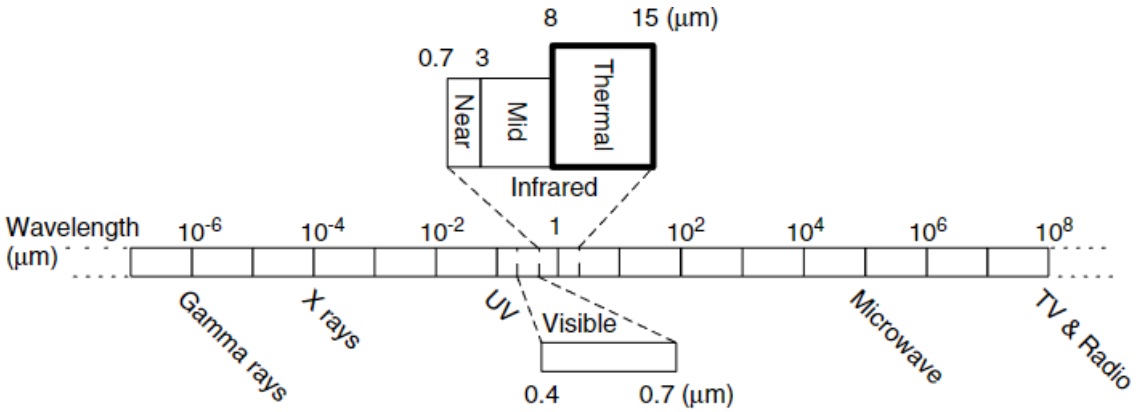
Essa radiação possui comprimento de onda que é inversamente proporcional à temperatura do corpo emissor, variando em faixas ou canais do espectro eletromagnético. De tal modo, corpos com emissão significativa possuirão comprimentos de onda menores, associados aos espectros de radiação gama, raio-x e, como é o caso da energia solar, ultravioleta.

Por outro lado, os comprimentos de ondas longas, como é o exemplo da luz visível, do infravermelho e das micro-ondas, recebem especial atenção no campo do sensoriamento remoto por possibilitarem identificar diferentes respostas espectrais de alvos em superfície a partir da radiância dos distintos materiais de cobertura. São geralmente os comprimentos de onda passíveis de leitura pelos principais sistemas

[14] Menor feição ou objeto em superfície passível de detecção pelo instrumento sensor (NOVO, 2010). Em outras palavras, o tamanho do pixel de uma imagem de satélite.

sensores remotos orbitais. A Figura 06, a seguir, ilustra o espectro eletromagnético, com destaque à faixa termal do canal infravermelho, comprimento de onda que receberá maior destaque nesta seção e no desenvolvimento da pesquisa.

Figura 06. Espectro eletromagnético organizado por comprimentos de onda. Destaque ao infravermelho termal dado pelos autores.



Fonte: Tomlinson et al. (2011).

Toda radiação solar de ondas curtas incidida sobre o planeta está sujeita aos processos físicos de reflexão, absorção e espalhamento, quando da interação com a atmosfera. Aquela parcela que alcança a superfície terrestre é então novamente absorvida ou refletida, com base nas propriedades físicas dos materiais de revestimento, como principalmente o albedo. No período noturno, por outro lado, não há aporte de radiação de ondas curtas e a superfície perde calor prioritariamente por ondas longas, na faixa espectral do infravermelho.

Como discutido por Novo (2010), o tratamento da radiação envolvida na porção entre 3 μm e 20 μm do espectro eletromagnético, compatível com a faixa mais ampla do infravermelho termal, exige abordagem distinta daquela adotada no canal visível. Isso porque a radiação, neste caso, é proveniente de função da temperatura do corpo e de sua emissividade (Ɛ), sendo que essa última propriedade depende do estado da superfície e tipo de cobertura. Em exemplo dado pela autora, destaca-se que a presença de uma fina camada de água no solo já seria condição suficiente para alterar drasticamente sua emissividade, tendo em vista que a radiação termal emitida por um objeto terrestre tem origem logo nos primeiros milímetros mais superficiais.

Diante disso, o que o sensoriamento remoto termal busca medir é a energia radiante de um corpo superficial, sendo que quanto maior for a energia detectada pelo sensor, também maior será a temperatura do objeto imageado em superfície. Como o satélite e seus sistemas sensores medem, portanto, a radiância espectral e o que se espera como produto aplicado ao estudo do clima urbano são cartas de temperatura, aplicam-se funções de transformação baseadas na inversa da Lei de Planck, cujo conjunto completo de equações e etapas de cálculo será apresentado no capítulo metodológico do trabalho, de maneira didática e adaptada ao satélite empregado na pesquisa.

Postos os fundamentos físicos básicos para o emprego do sensoriamento remoto termal no âmbito da ciência climatológica, cabe ressaltar trabalhos de expoentes que contribuíram para a consolidação do conjunto de métodos e técnicas associadas. Nesse sentido, Oke *et al*. (2017) realizaram considerável exercício de síntese da pesquisa científica moderna e aplicada sobre climas urbanos, delineando o que constitui um ecossistema urbano a partir da classificação de escala e superfície como conceitos-chave.

Os autores explicam os princípios físicos que governam a configuração de climas urbanos distintos, como o fluxo de ar ao redor de edifícios, a formação de núcleos de calor, alteração no regime da precipitação e poluição do ar, trazendo à tona como os dados derivados de sensoriamento remoto podem ser integrados com outros métodos de coleta de dados, como medições *in loco* e modelagem climática, para oferecer visão mais completa dos processos climáticos urbanos.

Nesse campo, destacam-se as contribuições de Bechtel (2015), que realizou esforço pioneiro de estimativa da climatologia global da temperatura de superfície a partir de observações diárias dos sensores MODIS/Terra, e de Amorim (2019), que conduziu estudo de revisão que sintetiza mais de 20 anos de pesquisa dedicada à compreensão do fenômeno das “ilhas de calor” urbanas em cidades de pequeno e médio porte, através do diálogo entre técnicas de observação remota e medidas em campo a partir de postos fixos e redes móveis.

Partindo da perspectiva rítmica e de integração escalar das matrizes “monterianas” e das contribuições da influência urbana sobre as camadas de ar de Oke (1976; 1978), a última autora investiu no delineamento de um conjunto de

procedimentos metodológicos para não somente registrar e diagnosticar potenciais “ilhas de calor” (ou núcleos de aquecimento urbanos), mas também apresentar resultados do ponto de vista têmporo-espacial, com foco na evolução diária do fenômeno, sob influência de variados tipos de tempo.

Sobre a questão da espacialização do fenômeno, em diálogo com Foissard (2015), destaca-se a dificuldade recorrente de representar a extensão de um campo térmico contínuo, a partir de observações pontuais ou lineares (geralmente associadas às estações meteorológicas oficiais do INMET, a postos complementares adquiridos ou produzidos por pesquisadores e universidades e às técnicas de transectos móveis[15]). Isso porque obriga a adoção de técnicas geoestatísticas para interpolar as tomadas pontuais e gerar resultados rasterizados contínuos, em esforço de abstração da realidade, que se deteriora na medida em que o resultado do modelo se distancia de um dado ponto com valor conhecido.

Por outro lado, a literatura tem optado, aos poucos, por trabalhar com os métodos de análise multicritério nos estudos climatológicos, que, segundo Moura & Jankowski (2016), tem como função principal facilitar a integração de variáveis espaciais, sob a forma de mapas temáticos, a fim de encontrar locais prioritários para um dado fenômeno ou atividade. Permitem, portanto, a interação matemática de diferentes variáveis de entrada, ponderadas ou não, em um modelo equacional que expressará, geralmente, um indicador para determinado fenômeno e sua distribuição espacial.

Como é fortemente assistido por Sistemas de Informação Geográfica e *softwares* de geoprocessamento, os métodos de análise multicritério possibilitam a inclusão das cartas de temperatura de superfície como variáveis de entrada dos modelos propostos. Nessa solução equacional, intitulada álgebra de mapas, a temperatura de superfície é trabalhada em interação com fatores geográficos componentes da paisagem, como a rugosidade do relevo, as classes de uso e cobertura da terra, os índices espectrais da vegetação, dentre outros fatores que interferem na sua distribuição espacial.

[15] Rede móvel de monitoramento de elementos climáticos, como temperatura e umidade relativa do ar, especialmente utilizada quando os dados meteorológicos das estações fixas oficiais são limitados para uma determinada área de estudo ou quando as estações disponíveis são muito esparsas entre si. Ver exemplo em Silva *et al*. (2018).

A análise multicritério é tida, portanto, como um dos métodos mais adequados para o estudo do clima, justamente pelo seu caráter sistêmico e integrativo, capaz de reunir observações remotas de elementos climáticos com características da superfície das cidades, tal como evidenciado por Amorim *et al*. (2017), em exemplo aplicado no município de Presidente Prudente (SP). Nesse contexto metodológico, ainda se inserem os modelos estatísticos multivariados, que receberão especial atenção na presente pesquisa pela capacidade de sintetizarem representativos conjuntos de dados e revelar características latentes aos mesmos.

Todos os métodos e técnicas descritos contribuem, sem dúvida, à modelagem de sistemas ambientais complexos, como é por natureza o Sistema Clima Urbano. Porém, é preciso compreender que um modelo de investigação nada mais é do que uma representação simplificada da realidade, que permite entender e/ou simular, muitas vezes parcialmente, o comportamento de um determinado fenômeno ou sistema a partir de variáveis definidas. Conforme discute Christofoletti (1999), o modelo é uma abstração da realidade que busca representar os processos e interações que ocorrem no ambiente, ou em outras palavras:

> "Uma representação do real, que se apresenta de maneira física, analógica, simbólica ou matemática e que permite a análise de processos e interações no espaço e no tempo, com a finalidade de obter informações, prever situações futuras e subsidiar o planejamento e a tomada de decisões" (CHRISTOFOLETTI, 1999, p. 5).

Essa definição ressalta que os modelos podem ser representados de diversas formas, como através de equações matemáticas, simulações computacionais, espacialmente explícitos, entre outras. Seu principal objetivo é fornecer *insights* sobre o sistema investigado, possibilitando diagnósticos, previsões e auxiliando na tomada de decisões relacionadas ao ambiente. De tal modo, o desenvolvimento de um modelo de investigação assume papel importante em pesquisas como a aqui conduzida, que almeja a construção de indicadores capazes de mensurar aspectos do clima urbano em ambientes complexos e diversificados como as favelas belo-horizontinas.

Por mais complexos que sejam, a validade dos modelos é sempre relativa. Podem ajudar a entender questões latentes aos dados e variáveis utilizadas, através de indicadores, mas não necessariamente permitem a compreensão de um sistema

na totalidade, tendo em vista sua natureza representativa da realidade concreta. Nessa ótica, cabe destacar que um indicador pode ser aqui entendido como uma medida sintética, uma forma de se reduzirem informações do modelo, preservando-se, no entanto, a variabilidade dos dados originais, tal como elucidado por Miranda-Ribeiro & Garcia (2005), conceito a partir do qual a proposta da pesquisa se estrutura.

Por fim, ainda vale lembrar que no bojo dos métodos e técnicas baseadas em modelagem matemática, sensoriamento remoto e/ou estatística aplicada ao estudo do clima urbano, ainda se inserem aqueles mais voltados às escalas de trabalho dos profissionais da arquitetura e urbanismo, sobretudo no que se refere à avaliação do conformo térmico em habitações e ao desenho urbano orientado ao clima, tais como observados no esforço de revisão realizado por Assis (2005) e, em contexto específico para favelas de São Paulo, por Utimura (2010).

A condução da presente pesquisa, porém, não busca construir bagagem teórico-metodológica significativa nessa temática, visto que diante dos objetivos propostos, muito mais voltados à abordagem geográfica do clima nas vilas e comunidades de Belo Horizonte em escala especialmente topoclimática, será abordada de maneira indireta.

CAPÍTULO II – FATORES GEOECOLÓGICOS DEFINIDORES DO CLIMA BELO-HORIZONTINO E DE SEUS TIPOS DE TEMPO ASSOCIADOS

O município de Belo Horizonte, sítio urbano onde se inserem os fenômenos passíveis de investigação na presente pesquisa, está localizado na porção central do Estado de Minas Gerais, região Sudeste do Brasil. Dadas as características litológicas, geomorfológicas, fitofisionômicas e de uso e cobertura da terra específicas, sua variabilidade climática local é reconhecidamente influenciada por fatores de ordem estática e dinâmica, cuja gênese se dá justamente na interação superfície-atmosfera.

Compreender os principais fatores geoecológicos definidores do clima local da capital mineira e de seus principais tipos de tempo associados, à luz da produção bibliográfica e dos recursos cartográficos disponíveis, é tarefa fundamental para dar sequência à estruturação metodológica da pesquisa.

2.1 Fatores de caráter estático

Inicialmente, há de se observar os fatores de superfície intervenientes na configuração dos principais de tipos de tempo em Belo Horizonte. O principal deles, tido como fundamental regulador climático de mesoescala, é o papel do relevo belo-horizontino.

A altitude do município varia entre 684 metros nos fundos de vale que drenam para o seu nível de base regional (Rio das Velhas), na porção Norte da capital mineira, a pouco mais de 1500 metros no alinhamento da Serra do Curral e conjunto de serras do Quadrilátero Ferrífero, no limite sudoeste-sudeste. Em outras palavras, Belo Horizonte experimenta diferença hipsométrica de mais de 800 metros no interior do seu próprio limite político-administrativo, o que reflete não só no gradiente térmico teórico de até 4,8°C[16], potencialmente observado na diferença entre as maiores e menores cotas altimétricas do município, mas na configuração de unidades climáticas locais distintas e seus desdobramentos em topoclimas diversos, como visto em seções anteriores.

[16] Segundo Ayoade (1996), pode-se considerar taxa média de 0,6ºC de diminuição de temperatura a cada variação de 100 metros da altitude.

O município de Belo Horizonte exibe dois grandes domínios litológicos que se expressam superficialmente em duas unidades geomorfológicas. A primeira, e maior delas, a Depressão Sanfransiscana, localmente denominada Depressão de Belo Horizonte, ocupa cerca de 70 % do território e acomoda-se sob as rochas arqueanas do Complexo de Belo Horizonte, composto por gnaisses, granitóides intrusivos e rochas básicas e ultramáficas. O modelado se manifesta a partir de colinas de topo plano e arqueado e encostas côncavo-convexas, muitas vezes com transições marcadas por anfiteatros com fluxos convergentes, alcançando entre 600 e 900 m de altitude (SILVA, 1994).

As demais áreas restantes, localizadas ao sul do município, são constituídas pelas sequências metassedimentares do Supergrupo Minas, envolvendo sucessão de camadas de rochas representadas por itabiritos, dolomitos, quartzitos, filitos e xistos diversos, ocorrendo ao longo de faixas de espessuras variadas com direção preferencial SW-NE e mergulho com forte vergência para sul-sudeste. Geomorfologicamente, integra a unidade Quadrilátero Ferrífero, caracterizada pela fisiografia serrana representativa da Serra do Curral, alcançando as cotas altimétricas citadas e compondo extenso alinhamento de cristas e subcristas com superfícies de cimeira planas, sustentadas, em suas cotas mais elevadas, pelos itabiritos e formações superficiais laterizadas (SILVA, 1994).

A Serra do Curral, do ponto de vista climatológico, inclusive funciona como barreira orográfica ao município de Belo Horizonte que, a depender dos vetores de origem e direção preferencial dos ventos em cada época do ano, condiciona a existência de vertentes de barlavento e sotavento com disponibilidade de umidade distintas.

Assentadas e fortemente controladas pelos domínios litológicos e geomorfológicos citados, tem-se as duas principais bacias hidrográficas do município, cujos distintos padrões de drenagem característicos refletem as especificidades morfoestruturais da superfície em que se acomodam e contribuem para o transporte horizontal de ar na capital mineira.

Localizada integralmente nas colinas côncavo-convexas da Depressão de Belo Horizonte, a Bacia do Ribeirão Onça, juntamente dos demais fatores geoecológicos aqui discutidos, é formada pela confluência do Córrego da

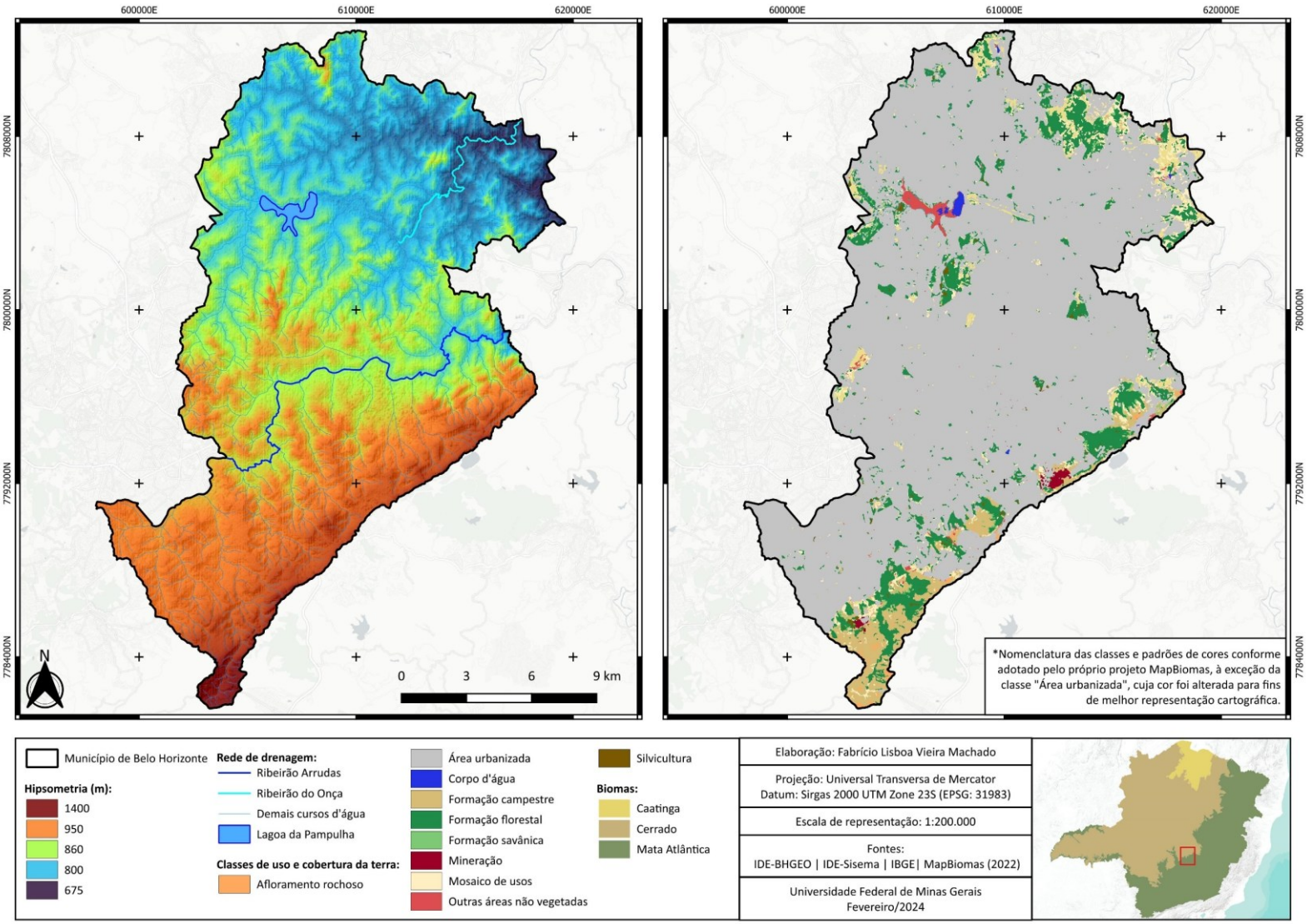
Cachoeirinha e do Ribeirão Pampulha, com fluxo vertendo no sentido nordeste. Possui padrão de drenagem dendrítico, com sub-bacias em formatos circulares e ramificadas, em modelado com vertentes pouco inclinadas, formadas pela dissecção fluvial (BAUMGRATZ, 1988).

O Ribeirão Arrudas, por sua vez, exerce papel de delimitador entre as duas unidades geomorfológicas. A margem sul da Bacia do Ribeirão Arrudas é alimentada principalmente pela confluência dos Córregos do Jatobá e do Barreiro, cujas nascentes se originam na Serra do Rola Moça. A bacia possui padrão assimétrico, com afluentes concentrados na margem sul e drenagens do tipo paralela, apresentando sub-bacias alongadas, com vales mais encaixados na cabeceira e assentados sob influência das elevadas altitudes, declividades e de orientação preferencial SW-NE da Serra do Curral (PARIZZI, 2021). A margem norte, esculpida sob os gnaisses do Complexo Belo Horizonte, retoma o padrão dendrítico típico da Bacia do Ribeirão Onça.

Somado ao relevo, tem-se como importantes fatores estáticos influenciadores do clima local o papel da continuidade do tecido urbano de Belo Horizonte e da sua fragmentação vegetacional intraurbana. O município está em região de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, contendo enclaves de fitofisionomias e espécies vegetais associadas a ambos. Entretanto, a parcela de cobertura natural atual está muito mais associada às áreas de patamar altimétrico elevado do alinhamento da Serra do Curral, às regiões periféricas da capital ou às dispersas Unidades de Conservação municipais existentes, do que bem distribuídas ao longo do território.

O mapa da Figura 07 sintetiza as características dos fatores geoecológicos estáticos, destacando sobretudo o modelado do relevo belo-horizontino e as condições de uso e cobertura da terra. Importante destacar que a nomenclatura das classes representadas, bem como a semiologia gráfica, seguiram o padrão da instituição responsável pela informação.

Figura 07. Principais aspectos do relevo, rede de drenagem e de uso e cobertura da terra no município de Belo Horizonte - MG.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Do ponto de vista da relação com os aspectos climáticos, apesar dos controles sinóticos, discutidos na seção a seguir, serem mecanismos de grandeza escalar superior, capazes de desorganizar os climas urbanos de um município a depender do sistema atmosférico atuante, tal como visto por Tarifa & Armani (2001) em São Paulo, as condições de uso e cobertura da terra intraurbanas e, principalmente, a influência do modelado do relevo, contribuem para o rearranjo dos tipos de tempo face às particularidades de cada espaço, o que em Belo Horizonte foi amplamente referenciado em pesquisas como a de Assis (2010), definidora de unidades climáticas locais.

Isso merece destaque pelo fato de que a presente pesquisa está lidando com formas agudas de manifestação urbana dentro do território de Belo Horizonte, cujas produções científicas climatológicas brasileiras, assim como as internacionais, ainda foram relativamente tímidas ao avaliar, especialmente em abordagem geográfica. A seguir, serão discutidos os fatores responsáveis pela gênese dinâmica (atmosférica) dos tipos de tempo em Belo Horizonte.

2.2 Fatores de caráter dinâmico

Dadas as características edafoclimáticas associadas à transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, além do regime pluviométrico acumulado anual de 1578,3 mm e da temperatura média compensada anual de 22,1°C[17], a capital mineira atualmente está enquadrada na classificação climática estática de Köppen-Geiger como sendo do tipo Aw: clima tropical, com inverno seco.

Contudo, por se tratar de modelo de classificação empírica ou genérico, do início do século XX, baseado unicamente na observação de elementos como temperatura e precipitação, além de parâmetros edafoclimáticos gerais, não leva em consideração a participação dos sistemas atmosféricos predominantes sobre uma dada porção do espaço. Mais do que isso, não se preocupa com a abordagem rítmica do estudo geográfico do clima, baseada na sucessão habitual dos tipos de tempo, tal como teorizado por Sorre (1951), em interrelação com os fatores intervenientes de superfície que contribuem para a organização do clima em distintas escalas.

Em outras palavras, a simples classificação climática de caráter estático está longe de se adequar aos propósitos da presente pesquisa no que se refere à avaliação dos tipos de tempo mais recorrentes sobre Belo Horizonte e, principalmente, a sua repercussão espacial nas suas vilas e comunidades, como já discutido em seções anteriores.

Ao buscar avaliar os aspectos genéticos que configuram o quadro sinótico de Belo Horizonte, cabe destacar, inicialmente, sua posição geográfica no país. A capital mineira está situada em zona de transição de massas de ar e, portanto, razoavelmente susceptível à atuação de sistemas frontais. A Massa Tropical Atlântica (mTa), regulada pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), condiciona contextos de baixa nebulosidade e em consequência, menores valores históricos de umidade e precipitação, justificados pela atuação da célula de alta pressão, que promove a descida vertical do ar da atmosfera para a superfície.

[17] Dados oficiais obtidos pelas Normais Climatológicas do Brasil de 1991-2020 (INMET, 2022).

Sobretudo no período de inverno, quando a atuação do ASAS é recorrente, verifica-se considerável amplitude térmica diária na capital mineira, em razão da maior disponibilidade de radiação solar direta, possibilitada pelo céu desobstruído, e o consequente aquecimento da superfície durante o dia. Contudo, a mesma energia absorvida é facilmente dissipada em ondas longas (infravermelho) no período noturno, com base em mecanismos intrínsecos ao balanço de energia, também potencializados pela ausência de nebulosidade. Resultado disso é o registro das menores temperaturas do dia no período anterior ao nascer do Sol, sobretudo no trimestre de inverno.

Os sistemas frontais, apesar de atuantes na faixa latitudinal onde se localiza Belo Horizonte durante todo o ano, também possuem ação mais significativa nos meses de inverno, em que os gradientes térmicos e barométricos existentes entre a linha do Equador e as latitudes mais altas permitem o seu deslocamento para o interior dos Trópicos, tal como observado por Abreu (1998).

Popularmente intitulados como frentes-frias, esses sistemas de baixa pressão são constituídos por linhas de descontinuidade térmica, originários do contato entre a Massa Polar Atlântica (mPa), regulada pelo Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul, e a Massa Tropical Atlântica (NIMER, 1966). Ao encontrar uma massa de ar quente, o ar frio originário das regiões subpolares, que é fisicamente mais denso, força a ascendência do ar quente estagnado e provoca sua condensação. Como resultado, tem-se a formação de instabilidade temporal ao longo da frente-fria, com potencial registro de precipitação.

No caso de Belo Horizonte, porém, não são registrados episódios recorrentes de precipitação no período seco, justamente pela perda de força do sistema frontal nesta latitude[18], devido à imposição da célula de alta pressão (ASAS), e pela consequente ausência de umidade sobre a capital mineira.

No período úmido, contudo, Belo Horizonte está sujeita a mecanismos de atuação conjunta, em que os sistemas frontais de sul e a umidade proveniente da Amazônia, quando interligados, formam canal de convergência de ar, que se estende pelo país em alinhamento noroeste-sudeste. Os sistemas resultantes,

[18] Processo de dissipação de sistemas frontais, conhecido como frontólise.

intitulados Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), ou quando mais duradouros, Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), são caracterizados por uma extensa faixa de baixa pressão com formação de nuvens de grande desenvolvimento vertical (*cumulonimbus*), causadoras de instabilidade temporal e precipitação contínua e acentuada.

Conforme dados das Normais Climatológicas do Brasil de 1991-2020[19], a capital mineira registra 847,7 mm concentrados somente no trimestre de verão, em virtude da atuação recorrente da ZCAS sobre a região. Este último é reforçado ainda pelo deslocamento do ASAS para o oceano Atlântico e pela migração da Massa Equatorial Continental (mEc), formada nas zonas depressionárias da Amazônia (*doldruns*), para latitudes mais altas.

Além dos sistemas atmosféricos descritos, há outros mecanismos de ordem dinâmica que também atuam ativamente na gênese e definição dos tipos de tempo na região onde está localizada a cidade de Belo Horizonte, tais como apresentados por Cavalcanti *et al.* (2009).

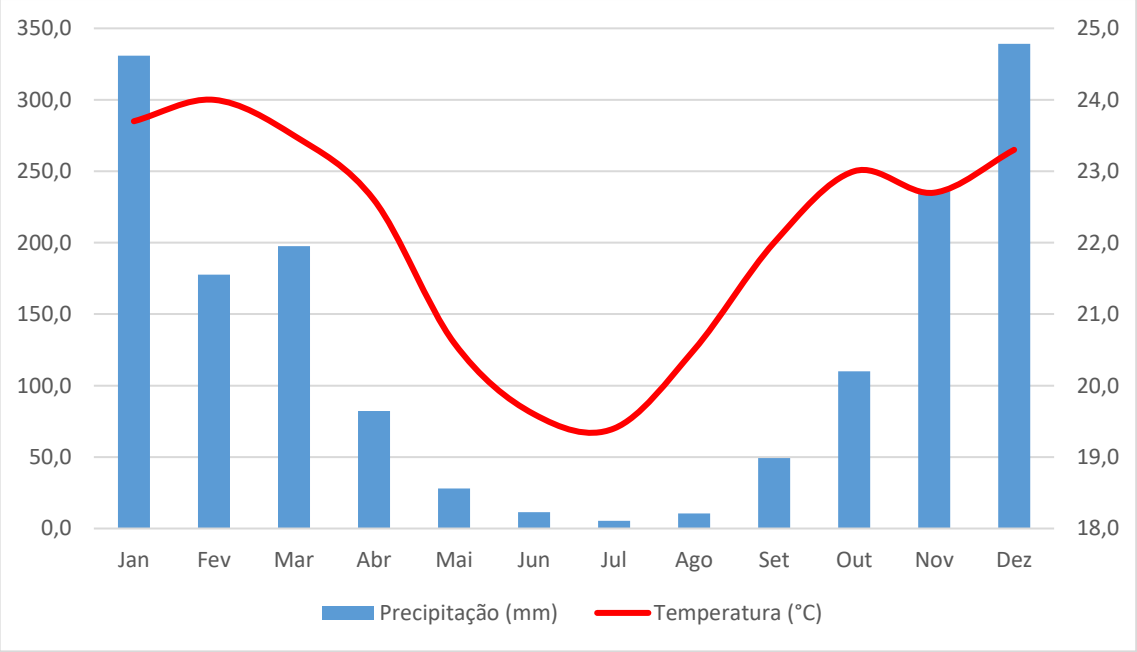
Dentre eles, destacam-se as Linhas de Instabilidade (LI) – sistemas convectivos de larga escala, compostos pelo alinhamento de áreas de baixa pressão atmosférica, responsáveis pelo aumento da nebulosidade e da precipitação; as Instabilidades Locais (IL) – condições meteorológicas instáveis que são influenciadas por fatores locais, como topografia, relevo e urbanização, responsáveis por episódios de precipitação localizada, especialmente no verão, quando a atividade convectiva é mais intensa; e as Frentes Estacionárias (FE) – sistemas frontais de baixa pressão que não conseguem quebrar situações de bloqueio atmosférico e permanecem estacionadas sobre extensa faixa latitudinal, ocasionando precipitação contínua e quedas nas temperaturas.

Belo Horizonte é, portanto, município cuja configuração dos sistemas atmosféricos predominantes estabelece estações sazonais bem definidas, com invernos habitualmente secos e relativamente frios, e verões quentes e úmidos,

[19] Disponíveis em https://portal.inmet.gov.br/normais. Conforme INMET (2021), as Normais Climatológicas do Brasil foram obtidas pelo cálculo das médias de parâmetros meteorológicos, obedecendo a critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM).

como pode ser observado a partir dos dados médios históricos mensais de temperatura e precipitação apresentados no climograma da Figura 08.

Figura 08. Distribuição da temperatura média compensada do ar e precipitação mensal acumulada em Belo Horizonte, segundo as Normais Climatológicas do Brasil (1991-2020).

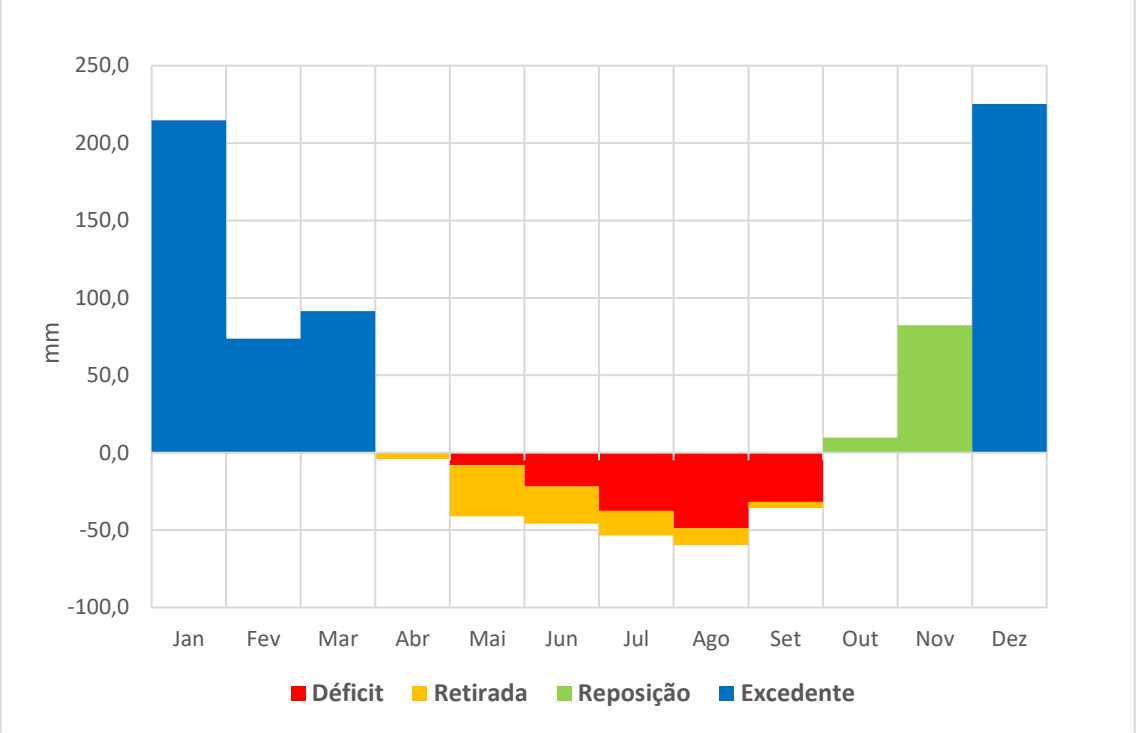


Fonte: Autoria própria, 2022.

Ainda nessa seara, de modo a identificar os meses de maior déficit e excedente de água em subsuperfície em Belo Horizonte, calculou-se o balanço hídrico climático do município, com base em modelo proposto por Thornthwaite em 1948 e aperfeiçoado por Mather em 1955, conforme apresentado por Tubelis & Nascimento (1984).

De maneira geral, o modelo teve como entrada os valores de precipitação média mensal histórica retirados das Normais Climatológicas do Brasil de 1991-2020, a partir dos quais, e da capacidade teórica de armazenamento da água no solo, baseada em parâmetros latitudinais e em características fisiográficas da região, foram calculadas a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETR). Trata-se de insumos que permitem a identificação dos períodos de deficiência, retirada, reposição e excedente hídrico do solo, conforme apresentados na Figura 09 a seguir.

Figura 09. Balanço hídrico climático calculado para o município de Belo Horizonte (MG) segundo as Normais Climatológicas do Brasil (1991 a 2020).



Fonte: Autoria própria, 2022.

Como pode ser observado, os meses de julho e agosto, na estação sazonal do inverno, são notadamente os mais secos do ponto de vista hidrológico, em que o déficit de água no solo calculado para a capital mineira registrou marca de até -48,7 mm. Por outro lado, na estação do verão, os meses de dezembro e janeiro se destacaram como os de maior excedente hídrico, cujo conteúdo de água no solo alcançou valor calculado de 225,3 mm.

Há de se destacar, ainda, os mecanismos de escala zonal e global que contribuem para o estabelecimento do padrão climático local observado para Belo Horizonte. O de maior relevância se trata do El Niño Oscilação Sul (ENOS), definido por Barry & Chorley (2013) como uma variação atmosférica irregular, que envolve mecanismos de troca de ar entre a célula subtropical de alta pressão, habitualmente localizada sobre a porção oriental do Oceano Pacífico Sul, com as regiões ocidentais sob atuação de núcleos de baixa pressão.

O mecanismo ENOS apresenta periodicidade irregular de atuação definida entre 2 e 10 anos e, apesar da ausência de consenso científico, sua gênese está provavelmente associada ao papel do Oceano Pacífico como relevante fonte de

energia térmica, de modo que as anomalias registradas na Temperatura Superficial do Mar (TSM) atuem de maneira semelhante a um pêndulo, capazes de movimentar o sistema de circulação de que trata o ENOS.

Isso se deve ao fato de que na região do Pacífico equatorial ocidental está acumulada parcela de massa d'água que concentra as temperaturas mais elevadas do planeta, associadas à incidência habitual de radiação solar direta (atuação do Anticiclone Subtropical do Pacífico Sul), à baixa perda de calor por evaporação (em função do padrão moderado de velocidade dos ventos na região) e pelo empilhamento, conforme explicitam os referidos autores, de água superficial forçada a oeste pela atuação dos Ventos Alísios de leste.

Essa parcela de massa d'água aquecida se dissipa na periodicidade mencionada, em função de mudanças ocorridas no padrão de circulação das correntes oceânicas e pela constante troca de calor oceano-atmosfera. Quando ocorre, os centros de baixa pressão anteriormente posicionados na porção equatorial oriental do Pacífico Sul (sob ENOS), deslocam-se para a Ásia e Oceania, definindo sistema complexo de teleconexão em escala global.

Tal sistema é reconhecido como a manifestação da fase positiva da circulação da Célula de Walker, que conforme discute Bjerknes (1969) *apud* Alves *et al.* (2005), funciona como uma "gangorra" de pressão em superfície, em que o ar ascendente do setor oeste do Pacífico (responsável totais pluviométricos elevados nesta região), descende sobre a borda ocidental e resulta na diminuição da TSM em até 3°C.

A ocorrência da fase positiva da célula de Walker é intitulada La Niña e seus efeitos mais diretos sobre a região Sudeste do Brasil estão associados ao aumento da frequência da chegada de sistemas frontais às latitudes menores e consequentemente ao registro de temperaturas abaixo da média histórica durante o inverno, conforme verificaram Marengo & Oliveira (1998) e Machado (2016), esse último em pesquisa no município mineiro de Teófilo Otoni. Em contrapartida, nos anos sob efeito do El Niño são registradas reduções históricas nos valores médios de umidade relativa do ar e na precipitação total na região Sudeste, além do aumento na temperatura.

Ao avaliar os impactos do ENOS nas anomalias térmicas e pluviométricas do Brasil, Oliveira & Satyamurty (1998) verificaram o inverno de 1997 da região Sudeste até 4°C mais quente se comparado à média histórica até então. Assis (2010), especificamente para o município de Belo Horizonte, verificou a existência de oscilações decadais consideráveis na variabilidade da temperatura máxima ao longo do último século, associadas aos mecanismos de atuação do El Niño e La Niña.

Sobre o estabelecimento de padrões decadais de variabilidade do comportamento dos elementos climáticos em Belo Horizonte, cabe ainda destacar a influência da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP), identificada por Mantua *et al.* (1997) como uma variabilidade natural da temperatura das águas do Pacífico Norte, associada à forte atuação de sistemas de baixa pressão. Em periodicidade aproximada de trinta anos, a oscilação entre as fases frias e quentes da ODP é capaz de acentuar ou atenuar os padrões impostos pelos mecanismos do ENOS, reforçando aspectos que inclusive contribuem para o desencadeamento de impactos sobre as áreas urbanas, como ondas de calor, episódios de veranicos ou eventos extremos de chuva.

Potencializados pela variabilidade dos sistemas oceânico-atmosféricos apresentados e pela atuação predominante dos sistemas sinóticos destacados, especialmente os de natureza mais energética, Belo Horizonte também experimenta eventos de natureza considerada extrema, cujo potencial de desencadear impactos negativos às populações é proporcionalmente maior. Apesar de não ser o foco da pesquisa, especialmente os eventos associados ao canal termodinâmico do estudo do clima urbano receberão maior atenção aqui, tendo em vista sua relação com o objeto de estudo e a particularidade das formas e geometrias urbanas sob investigação.

O capítulo a seguir apresentará o conjunto de materiais e métodos a partir dos quais pretende-se buscar responder as questões colocadas, levando em consideração o arcabouço teórico-metodológico construído e os fatores geoecológicos estáticos e dinâmicos definidores do tempo e clima local de Belo Horizonte apresentados nesta seção.

CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcance dos objetivos propostos e resposta às questões elencadas, a presente pesquisa parte das premissas de integração entre escalas e de articulação de diferentes métodos e técnicas, que serão pressupostos aqui assumidos como fundamentais ao estudo geográfico do clima urbano e ao bom desenvolvimento da tese.

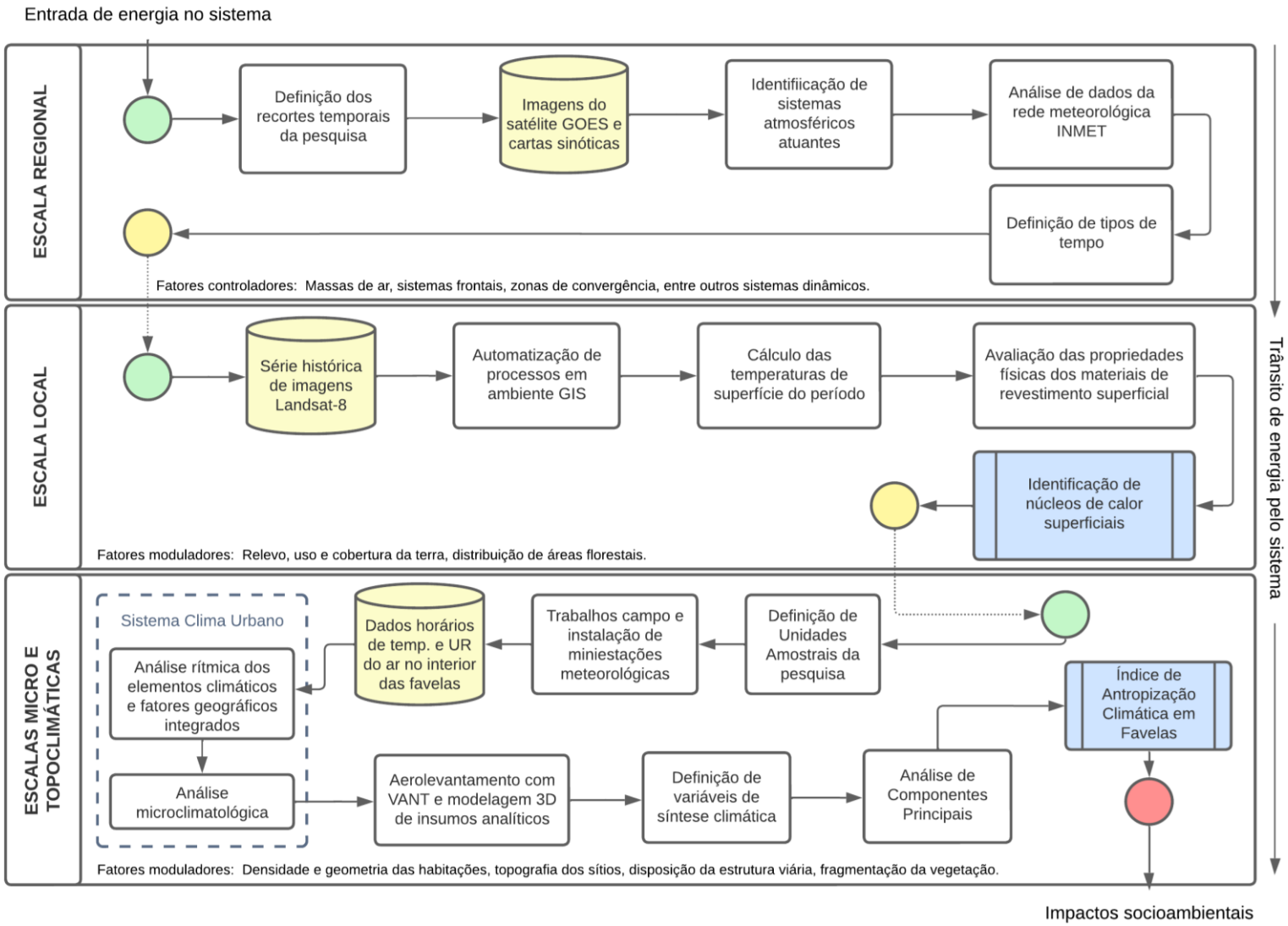
Dessa forma, a partir do resgate teórico apresentado na seção anterior, referente aos mecanismos intervenientes das escalas climáticas superiores, responsáveis pela gênese dos tipos de tempo em Belo Horizonte, parte-se, agora, para a verticalização da pesquisa, no sentido de construir roteiro metodológico compatível com a escala do fenômeno estudado.

Dessa forma, para avaliação das especificidades do funcionamento do campo térmico e higrométrico nas vilas e comunidades da capital mineira e diagnóstico dos fatores envolvidos na ocorrência potencial de episódios de ilhas de calor, o foco da pesquisa foi direcionado principalmente ao diálogo entre as escalas micro e topoclimáticas. Foram empregadas técnicas combinadas de sensoriamento remoto termal, modelagem tridimensional de edificações e coleta de dados meteorológicos em campo para munir o pesquisador de insumos analíticos essenciais à investigação do fenômeno e resposta às questões de pesquisa, à luz da participação dos sistemas atmosféricos predominantes que agem sobre a gênese dos tipos de tempo.

Por fim, como esforço de síntese, foi desenvolvido e implementado indicador sintético para avaliar o nível de antropização do clima no interior das favelas estudadas, a partir do qual foram discutidos os problemas socioambientais decorrentes da relação entre a densidade de ocupação e o comportamento das variáveis climáticas avaliadas na pesquisa.

As etapas de desenvolvimento da pesquisa, bem como a articulação dos conjuntos de métodos e técnicas empregadas para avaliação do clima urbano nas distintas escalas de trabalho, estão sintetizadas no fluxograma da Figura 10, sendo detalhadas individualmente ao longo das seções do capítulo.

Figura 10. Roteiro metodológico para desenvolvimento da pesquisa em perspectiva de integração escalar.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.1 Aquisição de imagens de satélite e modelagem de produtos termais

Esta etapa inicial buscou investigar a distribuição têmporo-espacial dos núcleos de calor superficiais em Belo Horizonte, de modo a avaliar sua suposta relação com a disposição das vilas e comunidades no município.

Para tanto, foram adquiridas todas as imagens gratuitas do sistema sensor Landsat-8 entre fevereiro de 2013 (início da operação) e dezembro de 2020, com índice de cobertura de nuvens inferior a 10% para a área de estudo, o que totalizou conjunto de 29 cenas. O satélite foi escolhido em virtude das características específicas dos sensores embarcados, sobretudo dos canais termais de operação (bandas 10 e 11), que são comparativamente superiores a outros satélites disponíveis em repositórios abertos. A Tabela 02 resume as especificações técnicas dos produtos gerados pelo Landsat-8.

Tabela 02. Principais características das bandas espectrais dos sensores OLI e TIRS a bordo do satélite Landsat-8.

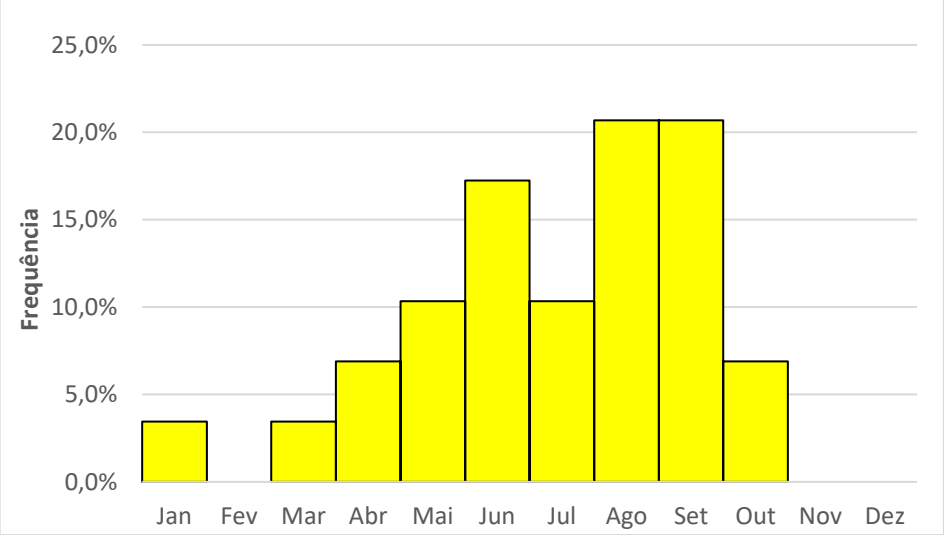
Sensor	Bandas espectrais	Resolução espacial (m)	Resolução espectral (µm)	Resolução radiométrica
Operational Land Imager (OLI)	B1 (Costeiro/Aerossol)	30	0,43 - 0,45	16 bits
	B2 (Azul)	30	0,45 - 0,51	
	B3 (Verde)	30	0,53 - 0,59	
	B4 (Vermelho)	30	0,64 - 0,67	
	B5 (Infravermelho próximo)	30	0,85 - 0,88	
	B6 (Infravermelho de ondas curtas)	30	1,57 - 1,65	
	B7 (Infravermelho de ondas curtas)	30	2,11 - 2,29	
	B8 (Pancromática)	15	0,50 - 0,68	
	B9 (Cirros)	30	1,36 - 1,38	
Thermal Infrared Sensor (TIRS)	B10 (Infravermelho termal)	100	10,6 - 11,19	
	B11 (Infravermelho termal)	100	11,5 - 12,51	

Fonte: Adaptado de United States Geological Survey (USGS).

A passagem e imageamento do satélite Landsat-8 sobre a faixa latitudinal e longitudinal onde se encontra Belo Horizonte é às 10h (horário local), período do dia em que o Sol se encontra em ângulo razoavelmente perpendicular em relação à superfície terrestre, especialmente no trimestre de verão. Os meses em que foi adquirido maior número de imagens sem cobertura de nuvens para emprego direto na pesquisa foram agosto e setembro, que juntos responderam por mais de 41% da amostra, conforme gráfico da Figura 11. Isso está associado aos sistemas atmosféricos de alta pressão recorrentes na região neste período do ano, que,

conforme discutido na seção anterior, favorecem a inibição da formação de nebulosidade de elevado desenvolvimento vertical.

Figura 11. Frequência de distribuição mensal das imagens termais do satélite Landsat-8 (B10) para Belo Horizonte entre 2013 e 2020 empregadas na pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2020.

De posse desses insumos, foi realizada extensa etapa de álgebra de mapas em ambiente GIS, de modo a processar digitalmente as imagens adquiridas e calcular a temperatura de superfície terrestre, roteiro metodológico que foi integralmente implementado através do *software* livre e de código-aberto QGIS versão 3.22 Bialowieza[20].

O primeiro passo envolveu a reprojeção do sistema de referência de coordenadas das imagens adquiridas para o datum Sirgas 2000, instituído pela Resolução IBGE nº 01/2015 como referência oficial do Sistema Geodésico Brasileiro e Cartográfico Nacional. Além disso, optou-se pela adoção da projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), em fuso 23S, para possibilitar cálculo mais assertivo de medidas geométricas. Demais produtos cartográficos dessa pesquisa também utilizarão o mesmo datum e sistemas de projeção elencados.

[20] Cabe destacar que a presente pesquisa buscou fazer uso prioritário de tecnologias não-proprietárias, de modo a engajar a comunidade científica quanto à utilização de *softwares* livres e de código-aberto em áreas como o geoprocessamento e o sensoriamento remoto. Dessa forma, optou-se pelo emprego de ferramentas gratuitas sempre que disponíveis e consolidadas pela comunidade de usuários.

Em seguida, as cenas da banda termal B10 do satélite Landsat-8 foram recortadas em função de máscara vetorial representativa do limite territorial de Belo Horizonte. A partir dos rasters finalmente reprojetados e recortados é que foram desenvolvidas as etapas seguintes de cálculo e elaboração das cartas de temperatura de superfície.

O processo sequencial de cálculo se iniciou pela conversão dos números digitais (níveis de cinza) da banda B10 (sensor termal) das imagens para radiância no topo da atmosfera, através de equação (1) do *United States Geological Survey* (USGS), baseada em Artis & Carnahan (1982):

$$L\lambda = M_L Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Onde:

Lλ = valor da radiância espectral no topo da atmosfera (TOA), medida em Watts/m² * srad * μm;
ML = fator multiplicativo escalonado específico constante no arquivo de metadado que acompanha as imagens do satélite;
Qcal = produto padrão quantificado e calibrado por valores de pixel (DN);
AL = fator aditivo escalonado específico constante no mesmo arquivo de metadado.

Uma vez calculada, a radiância espectral foi convertida para temperatura de brilho, expressa em graus Kelvin, a partir de equação (2) fornecida pelos mesmos autores. Para realizar a conversão para graus Celsius, foi aplicada adicionalmente a equação (3) apresentada a seguir.

$$T_K = K_2 / \ln\left(\frac{k_1}{L_\lambda} + 1\right) \quad (2)$$

Onde:

Tk = temperatura de brilho aparente em graus Kelvin (K);
Lλ = reflectância no topo da atmosfera (Watts/(m² * srad* μm));
k1 = constante de conversão K1 específica para cada banda, também denominada de constante térmica, disponível no arquivo de metadado;
K2 = constante de conversão K2 específica para cada banda, também denominada de constante térmica, disponível no arquivo de metadado.

$$T_C = T_K - 273 \quad (3)$$

Onde:

Tc = temperatura de brilho aparente em graus Celsius (°C).

Com isso, foram gerados produtos calibrados cujos valores dos pixels componentes de cada um dos 29 rasters produzidos correspondem à temperatura de superfície em graus Celsius registrada pelo sensor em Belo Horizonte na dimensão 30 x 30 metros, limitada, portanto, à resolução espacial nativa das imagens.

Não foram empregados métodos mais refinados para correção atmosférica dos produtos, como por exemplo o *Single Channel Generalized Method* (SCGM), proposto por Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) e aperfeiçoado mais tarde pelos mesmos autores (2009; 2014). Contudo, o método, que é baseado na equação de transferência radiativa, parte da premissa de que a emissividade[21] dos corpos imageados em superfície é conhecida, sendo mais aplicado em estudos de cunho hidrológico, em que se pode considerar valor constante para a emissividade da lâmina d'água. Exemplo pode ser visto em Vieira *et* al. (2019), em pesquisa aplicada ao reservatório hídrico de Serra Azul, na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

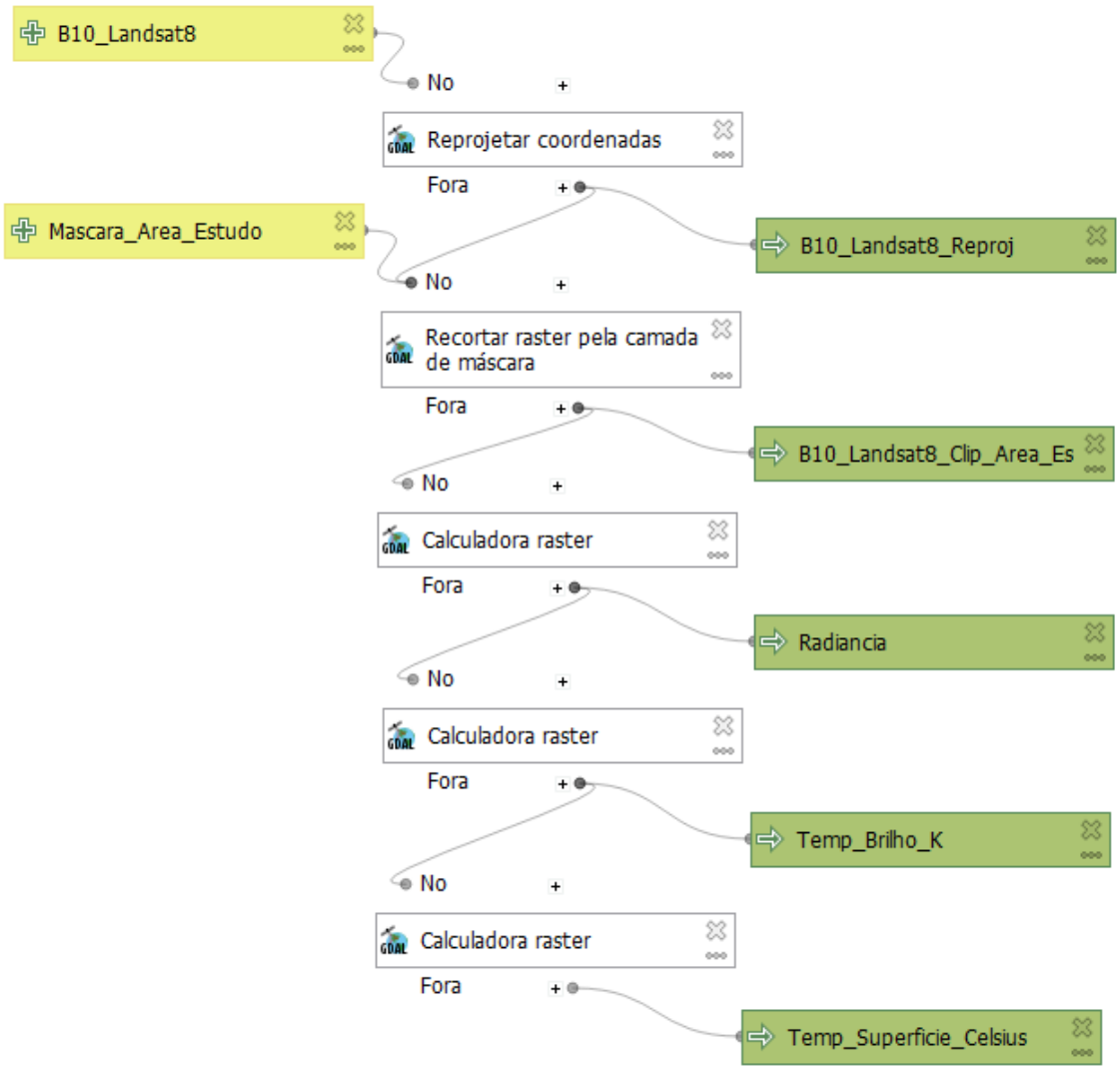
Em grandes centros urbanos, porém, onde há variedade de formas de uso e cobertura da terra, com suas propriedades físicas particulares, torna-se consideravelmente difícil calcular a emissividade dos corpos de superfície de maneira assertiva. Nesta seara, Grondona & Rolim (2016) realizaram significativo esforço de revisão literária sobre os diferentes métodos de extração da emissividade de materiais de superfície a partir de técnicas de sensoriamento remoto, mas não caberá nesta pesquisa a exploração deles.

Também vale ressaltar que o modelo SCGM tem etapa de cálculo assentada sobre valores teóricos de coeficientes relacionados ao conteúdo de vapor d'água atmosférico na região de interesse, que, por sua vez, foram estimados pelos autores a partir de técnicas de regressão polinomial derivadas de modelo global com poucas observações em território brasileiro. Em Minas Gerais, por exemplo, não houve referências empíricas, o que ratifica a decisão de não empregar o modelo de correção atmosférica sobre as cartas de temperatura de superfície geradas na presente pesquisa.

[21] Propriedade que descreve a eficiência de um objeto em irradiar energia, comparada com um corpo negro à mesma temperatura (KÄFFER *et* al. 2018).

Todo o processo de conversão dos sistemas de projeção, extração de máscara e cálculo das temperaturas de superfície acima descrito foi transformado em um *script* gráfico através do *software* QGIS, de modo a facilitar e acelerar o emprego do método para as 29 cenas do satélite Landsat-8 utilizadas na pesquisa. Com o uso do *script*, o processo poderia ser realizado em lote para tantas cenas quantas fossem necessárias, bem como poderá ser replicado pela comunidade acadêmica através de *softwares* livres e de código-aberto, tendo em vista que seu formato é interoperável. O *script,* apresentado na Figura 12 a seguir, poderá ser disponibilizado gratuitamente pelo pesquisador à comunidade acadêmica após conclusão da pesquisa.

Figura 12. *Script* gráfico modelado em ambiente GIS para cálculo automático de temperatura de superfície sobre imagens termais para uma dada área de estudo.



Fonte: Autoria própria, 2020.

Ainda que ágil e facilitadora, a técnica apresentada cada vez mais tem sido superada por métodos de computação em nuvem para acesso e processamento de grandes volumes de dados de sensoriamento remoto na pesquisa científica. Isso se deve à popularização das linguagens de programação e, principalmente, da plataforma Google Earth Engine. O GEE, como pode ser abreviado, é um ambiente de processamento de dados espaciais baseado na estrutura de servidores Google Cloud, que permite visualizar e analisar dados de distintas coleções de imagens de sensoriamento remoto, derivadas de sistemas sensores como Landsat, Sentinel, Planet, Modis, SRTM, dentre outros.

A plataforma GEE contém recursos de análise espacial em escala planetária e armazena *petabytes* de dados matriciais na estrutura de servidores da instituição, tornando desnecessária a aquisição de imagens via *download* e o tradicional armazenamento em disco local, como feito parcialmente na presente pesquisa. Isso porque o GEE fornece ao usuário um terminal para implementação de linhas de comando em linguagem de programação Javascript, para processamento em lote das coleções de imagens disponíveis, o que possibilita a realização de análises baseadas em imagens de sensoriamento remoto de maneira *online*.

Além disso, o GEE contém interface gráfica onde é possível visualizar os resultados obtidos pela implementação do código em tempo real, bem como integrá-los a *softwares* GIS desktop, como o QGIS. Também é interoperável com a linguagem Python através de API específica.

Sendo voltado a pesquisadores e profissionais das geociências, o Google Earth Engine tem se tornado ferramenta indispensável, na medida em que a análise de grandes volumes e séries temporais de dados de sensoriamento remoto se torna cada vez mais importante para a pesquisa científica e para a tomada de decisão.

Seu uso acadêmico é gratuito, mediante cadastro, e tem sustentado diversas aplicações, como análises temporais de mudanças de uso e cobertura da terra, monitoramento de desastres naturais, planejamento urbano e quantificação de fenômenos geográficos na superfície terrestre. Em artigo de revisão, Zhao *et al*. (2021) demonstraram o crescimento exponencial do Google Earth Engine como importante ferramenta para a pesquisa acadêmica, tendo sido empregado, até o ano de 2020, em 530 publicações em revistas e periódicos científicos de alto impacto.

Na presente pesquisa, o GEE se tornou conhecido e dominado em maior profundidade pelo pesquisador somente após desenvolvimento dos processos pelo QGIS. Sendo assim, foi utilizado de maneira complementar, para permitir o processamento em lote e a geração de estatísticas descritivas do conjunto de dados não somente para cartas de temperatura de superfície das comunidades de Belo Horizonte, mas para outros índices espectrais derivados de imagens de sensoriamento remoto, permitindo seu emprego na composição de variáveis do indicador sintético da pesquisa, que será apresentado e discutido em tópicos posteriores.

Todos os códigos desenvolvidos pelo pesquisador e implementados no Google Earth Engine estão integralmente disponíveis à comunidade acadêmica, na seção de Anexos deste trabalho.

3.1.1 Tratamento estatístico e análise dos dados termais

Uma vez geradas as cartas de temperatura de superfície para as 29 cenas utilizadas na pesquisa, foi realizada etapa de cálculo de estatísticas zonais no QGIS, em que se obteve medidas descritivas como média, mediana, valores mínimos e máximos, dentre outras, para a extensão completa do município de Belo Horizonte e, especialmente, para as vilas e comunidades da capital mineira, permitindo realizar comparações entre as áreas e identificar padrões têmporo-espaciais de ocorrência dos núcleos de calor.

Para cada cena modelada, foram avaliados fatores geográficos do tecido urbano, além de mecanismos atmosféricos, que pudessem responder pela gênese dos núcleos de calor superficiais e sua potencial relação espacial com as vilas e comunidades, tais como sistemas sinóticos atuantes no dia e horário do imageamento, condições do relevo em que as áreas com maiores e menores valores de temperatura estiveram localizadas, bem como propriedades físicas dos materiais que revestem a superfície belo-horizontina, como o calor específico, a capacidade calorífica e o albedo dos mesmos.

Para buscar a validação da etapa de cálculo empregada na pesquisa a partir de observações empíricas, implementou-se modelo de regressão linear simples, correlacionando dados de temperatura do ar mensurados pelas estações

meteorológicas oficiais do INMET Pampulha, Rola Moça e Cercadinho nos mesmos dias e horários das cenas Landsat-8 utilizadas (variável dependente), com os dados de temperatura de superfície remotamente estimados no mesmo pixel onde se localizam as estações meteorológicas citadas (variável explicativa).

Diferentemente do realizado por Pinto et al. (2017), que avaliou a correlação das variáveis “temperatura de superfície” e “temperatura do ar” de Belo Horizonte a partir de observação pontual (único dia) e posterior interpolação de dados, optou-se aqui pelo cálculo da regressão linear para o conjunto completo de 29 observações, de modo a identificar se a eventual linearidade existente se manteve, temporalmente, durante o período de estudo.

Vale dizer que a estação INMET Belo Horizonte (5º Distrito de Meteorologia) não foi utilizada por se tratar de modalidade convencional, cujos dados não são registrados em unidade horária, o que impossibilitaria sua comparação com os dados de temperatura de superfície no horário local de passagem do satélite Landsat-8 (10h). É importante destacar que os dados correlacionados no modelo de regressão são oriundos de processos físicos distintos, mas, assumindo que a camada de ar junto ao solo aquece por irradiação de calor superficial, espera-se linearidade entre as variáveis.

Para os resíduos da regressão, em especial os mais significativos, buscou-se em cartas sinóticas e imagens de satélites meteorológicos das datas em que ocorreram, compreender as condições atmosféricas em que a temperatura da superfície não foi suficiente para explicar estatisticamente o comportamento da temperatura do ar. Os resultados serão apresentados na forma de gráficos de dispersão, cuja análises quantitativas foram produzidas a partir de *software* livre para geoestatística, intitulado GeoDa.

Como esforço final nesta escala de análise climática, foi realizada nova etapa de álgebra de mapas em ambiente QGIS envolvendo todos os 29 rasters modelados nesta pesquisa, com o objetivo de calcular a distribuição média da temperatura de superfície em Belo Horizonte durante o período de análise e identificar os estados habituais dos núcleos de calor potencialmente formados nas vilas e comunidades.

Por fim, cabe destacar que a modelagem dos produtos termais aqui descritos, cujos resultados foram preliminarmente enviados pelo autor, no ano de 2020, para publicação na Revista Cadernos do Leste[22], também encontra respaldo nas contribuições da pesquisa de doutorado de Ferreira (2021). Ambos os esforços compartilham de métodos, técnicas e resultados semelhantes entre si, mas devido à parcial contemporaneidade entre as pesquisas e/ou ao distanciamento entre as escolas da climatologia geográfica e da arquitetura, os estudos foram conduzidos de maneira independente.

Na ocasião, Ferreira (2021) desenvolveu interessante proposta metodológica para avaliar como parâmetros geométricos que descrevem a superfície urbana, tais como altura, comprimento e o espaçamento entre os elementos estruturais das edificações, se relacionam com a temperatura de superfície derivada de satélite. Apesar da área de estudo também se tratar da cidade de Belo Horizonte, a autora orientou sua análise às escalas e métodos de trabalho da arquitetura, as quais a pesquisa atual não irá transpor.

[22] Volume 20 (2020), disponível para acesso somente a partir de 15/06/2021 em razão dos desafios da pandemia de Covid-19. Ver Machado (2021).

3.2 Seleção de Unidades Amostrais para a pesquisa

É evidente que na medida em que se transita das escalas superiores do clima em direção às inferiores, onde se manifestam as principais particularidades do canal termodinâmico das favelas, torna-se inviável utilizar meios remotos de investigação como o apresentado na seção anterior, sendo agora necessário coletar dados *in loco* para avaliar a dinâmica topo e microclimática desses espaços.

Por outro lado, também se torna operacionalmente inviável trabalhar com todas as 218 vilas e comunidades de Belo Horizonte, em função da indisponibilidade de equipamentos para coleta de dados meteorológicos em campo, limitações de acessibilidade aos espaços, segurança dos instrumentos e do próprio pesquisador, dentre outros. Além disso, muitos dos dados gerados poderiam ser redundantes e/ou desnecessários à pesquisa, haja vista a disposição de vilas muito próximas entre si, ou em contextos climáticos, geomorfológicos e de cobertura da terra semelhantes e previamente conhecidos.

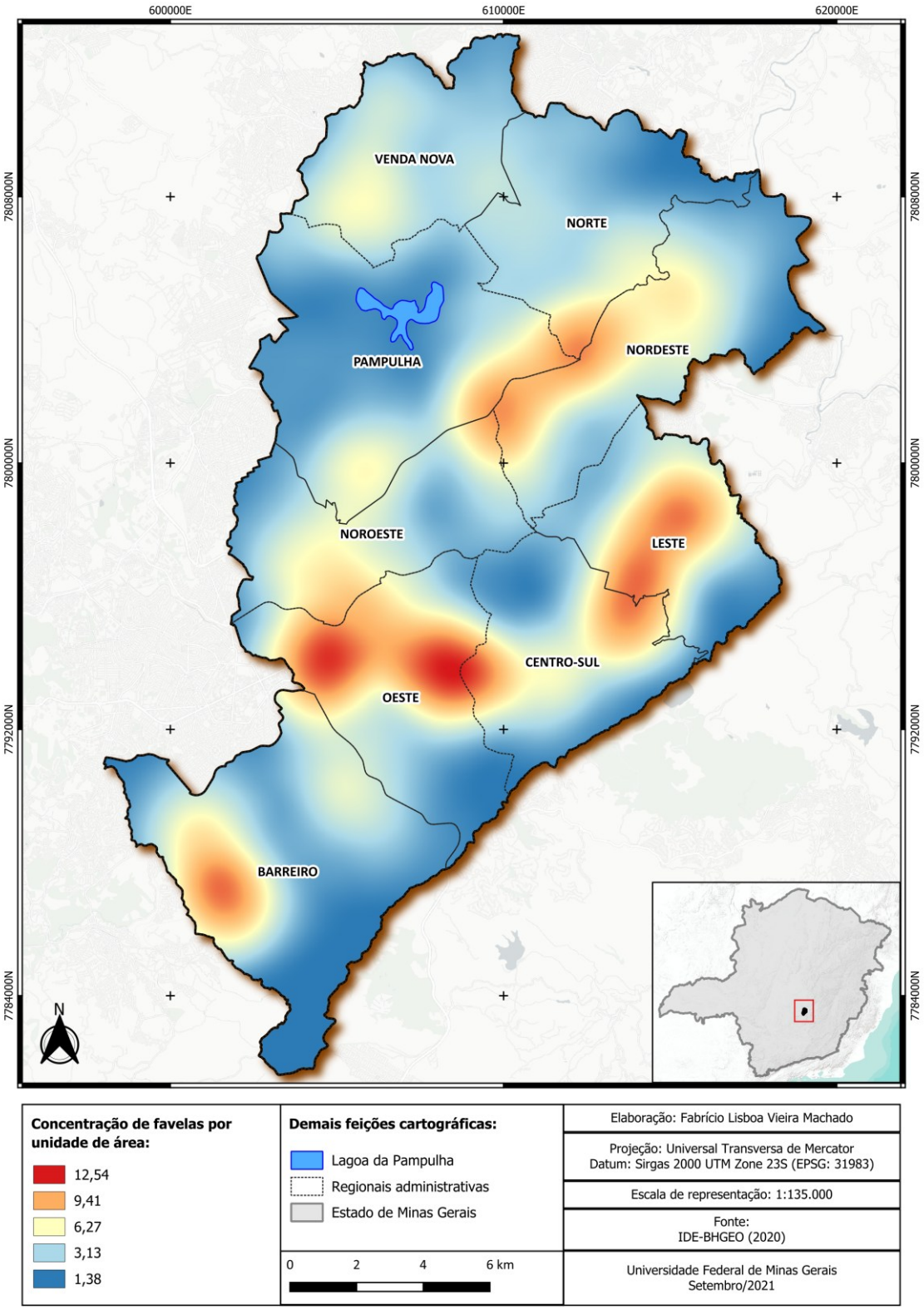
Por estas razões, tomou-se decisão de trabalhar com Unidades Amostrais, em que foram pré-selecionadas, a partir de critérios técnicos e logísticos a serem detalhados a seguir, favelas com características sociodemográficas e em contextos paisagísticos razoavelmente distintos entre si. Apenas elas é que serão alvos de coleta de dados meteorológicos em campo e dos métodos e técnicas específicos de investigação climática compatíveis com a escala em que se manifestam.

O primeiro critério adotado para seleção foi o de concentração espacial das vilas e comunidades na capital mineira, em que se privilegiou escolher Unidades Amostrais que estivessem em áreas densamente ocupadas por elas. Para avaliar a concentração espacial do ponto de vista geoestatístico, empregou-se técnica de análise conhecida como Densidade de Kernel, que, segundo Bergamaschi (2010), objetiva quantificar a distribuição probabilística de pontos por unidade de área com base em determinado raio de influência, o que culmina em modelo de representação contínuo (rasterizado) do fenômeno.

A implementação da Densidade de Kernel nesta pesquisa se deu, em primeiro lugar, a partir do cálculo dos centroides dos polígonos de cada uma das 218 vilas e comunidades de Belo Horizonte, através de ferramentas nativas do QGIS, o

que resultou em camada vetorial do tipo ponto. Em seguida, executou-se o modelo tendo como *input* os pontos gerados na etapa anterior e considerando raio de influência de um ponto sobre outro de cinco quilômetros, dado o padrão de espacialização favelas no município. A Figura 13, apresentada a seguir, ilustra o panorama observado, revelando a intensidade de concentração das favelas em Belo Horizonte a partir da Densidade de Kernel.

Figura 13. Concentração espacial de vilas e comunidades em Belo Horizonte estimada por Modelo Densidade de Kernel.



Fonte: Autoria própria, 2021.

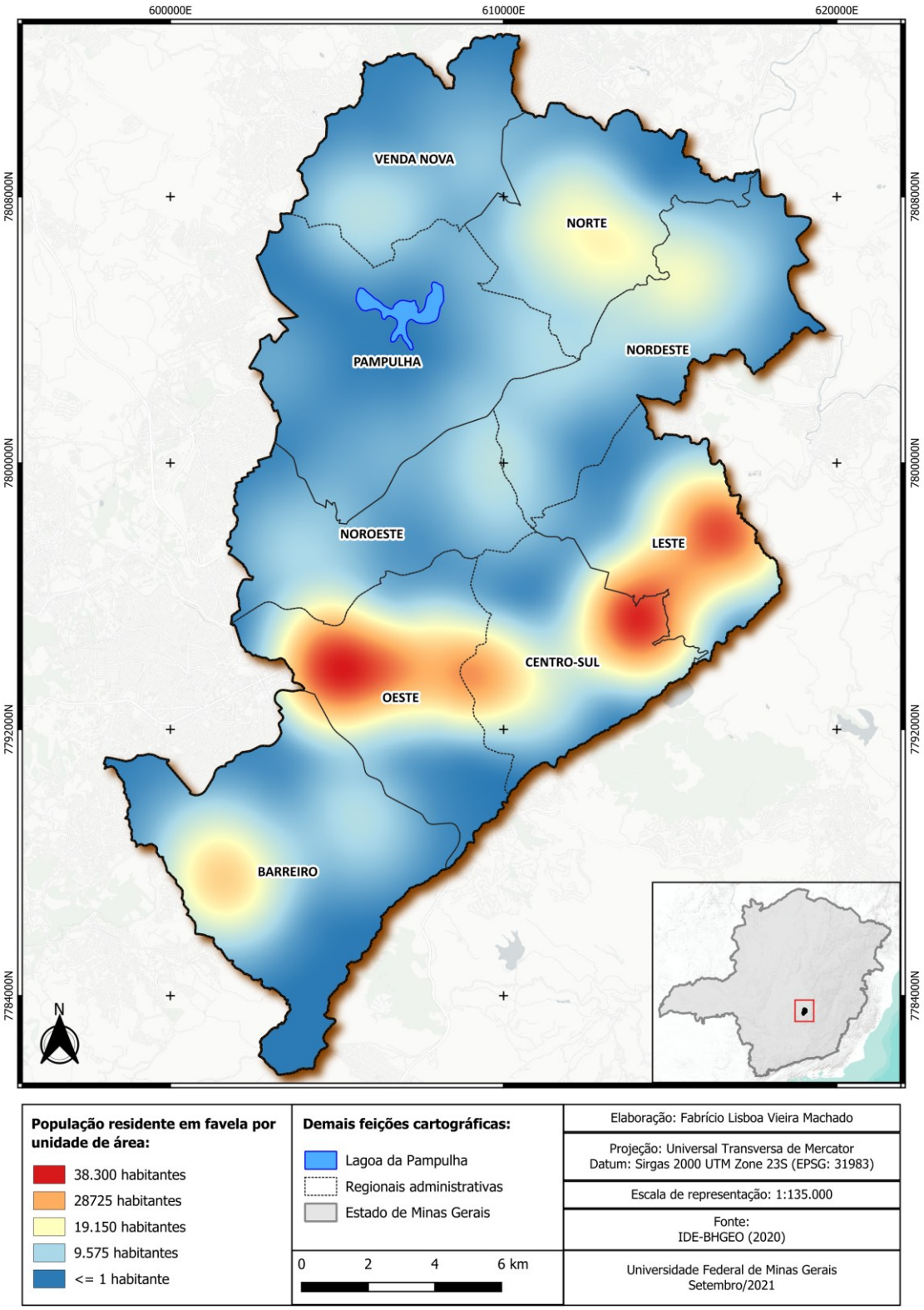
Nota-se que a regional administrativa Oeste é, sem dúvida, aquela que concentra o maior número de vilas e comunidades em Belo Horizonte, contabilizando até 12 registros por unidade de área. De maneira semelhante, encontram-se porções das Regionais Centro-Sul e Leste, onde a quantidade de favelas em raio de até 5 quilômetros de distância gira entre 9 e 12 registros.

Porções territoriais da Regional Barreiro e da divisa entre Pampulha e Nordeste contabilizaram entre 6 e 9 vilas e comunidades por unidade de área, enquanto as Regionais Norte, Venda Nova e grande parte da própria Pampulha se mostraram como os maiores vazios de concentração. Outros destaques interessantes, no que se refere à ausência de favelas estão na porção do espaço referente ao hipercentro de Belo Horizonte (interior da Avenida do Contorno) e no alinhamento da Serra do Curral, dada sua característica geomorfológica e à existência de instrumentos legais de conservação do patrimônio natural.

Porém, muitas das vilas e comunidades concentradas nos espaços adensados revelados pelo mapa de Kernel possuem extensão territorial pequena e população pouco significativa. E, do ponto de vista sociodemográfico, a quantidade populacional será uma variável interessante para a seleção de Unidades Amostrais, visto que contribuem para o aumento do fluxo de calor metabólico nestes espaços e, também, espera-se que nas áreas com maior número de habitantes haja maior alteração das condições naturais da paisagem.

Para tanto, elaborou-se novo Modelo Densidade de Kernel, porém, de maneira ponderada pela população de cada favela – informação constante na tabela de atributos da camada de informação geográfica oficial utilizada. O resultado, observado na Figura 14, volta novamente a atenção para as Regionais Oeste, Centro-Sul e Leste, onde o montante populacional oscilou entre 28.725 e 38.300 habitantes dentro de raio de 5 quilômetros. A transição entre as Regionais Nordeste e Pampulha, por sua vez, aparecem agora como grandes vazios demográficos, indicando menor necessidade de estabelecimento de Unidades Amostrais nestes espaços se comparados às Regionais já citadas.

Figura 14. Concentração populacional em vilas e comunidades de Belo Horizonte estimada por Modelo Densidade de Kernel.



Fonte: Autoria própria, 2021.

É importante relembrar, como discutido na revisão bibliográfica da pesquisa, que as vilas e comunidades localizadas principalmente nas Regionais Centro-Sul e Leste estão inseridas em zona de abrangência de climas “naturais” de Belo Horizonte, que são diferentes das demais favelas. Trata-se do clima local “Tropical de Altitude das Serras do Quadrilátero Ferrífero”, onde é esperado forte controle do relevo e de mecanismos de maior escala na variação dos elementos climáticos, tal como proposto e verificado por Assis (2010) a partir de observações sistemáticas de dados meteorológicos históricos das décadas de 1910 e 1920.

Por outro lado, as demais concentrações espaciais e populacionais de vilas e comunidades em Belo Horizonte se encontram associadas ao clima local “Tropical de Altitude da Depressão de Belo Horizonte”, cujo patamar altimétrico é inferior e a densidade de urbanização adjacente é consideravelmente maior. É inclusive nas proximidades do Bairro Lagoinha, localizado imediatamente à norte da Regional Centro-Sul, que o mesmo autor citado registrou as maiores temperaturas médias do ar e menores valores de umidade relativa em série histórica centenária, caracterizando essa porção do espaço, que possui expressivas favelas no entorno, como pertencente ao conjunto de topoclimas do Núcleo Urbano Central de Belo Horizonte. Isso destaca a região como de interesse para a investigação do seu canal termodinâmico e a elenca como Unidade Amostral da pesquisa.

Diante dos aspectos mencionados, também foi importante observar a proximidade das vilas e comunidades a serem selecionadas como Unidades Amostrais da pesquisa em relação às estações meteorológicas oficiais do INMET, que serão utilizadas como controle. Dessa forma, procurou-se também escolher favelas que estivessem distantes em até cinco quilômetros das estações INMET Pampulha e 5º DISME, cujas características do ambiente envoltório (mais próximo ao natural e ao urbanizado, respectivamente) serão interessantes para comparação com as condições mensuradas nas vilas.

Por fim, para seleção das Unidades Amostrais, somaram-se ainda critérios referentes à acessibilidade do pesquisador às áreas de estudo, visto a logística necessária para transporte, acomodação e vigilância dos equipamentos que serão utilizados em campo. Dessa forma, em todas as vilas e comunidades selecionadas, o pesquisador construiu rede de contato com moradores que fazem parte do seu

ciclo afetivo e/ou que figuram como lideranças populares no âmbito das áreas de estudo, tendo todos eles concordado em participar da pesquisa e ceder espaço seguro para acomodação dos equipamentos, conforme será descrito na seção 2.3 do estudo. Os colaboradores serão devidamente lembrados na seção de agradecimentos desta tese.

Em resumo, portanto, foram selecionadas cinco Unidades Amostrais representativas das vilas e comunidades distribuídas por Belo Horizonte com base nos critérios gerais de: i) densidade espacial e populacional de favelas em cada regional administrativa do município; ii) inserção em contextos geomorfológicos e climáticos locais distintos; iii) proximidade com estações meteorológicas oficiais do INMET; e iv) pré-existência de pontos focais de apoio ao pesquisador. A caracterização geral de cada Unidade Amostral será apresentada a seguir.

3.2.1 Pedreira Prado Lopes

A primeira Unidade Amostral da pesquisa está localizada na divisa entre as Regionais Administrativas Noroeste e Nordeste de Belo Horizonte, sendo na verdade composta por duas comunidades circunvizinhas. Juntas, a “Pedreira Prado Lopes” e a “Vila Senhor dos Passos” (popularmente conhecida como “Buraco Quente”) somam população de 7.259 habitantes, dos quais 60,7% estão concentrados na primeira comunidade citada. Territorialmente, estão distribuídas em área de 25,79 hectares, sendo a Pedreira Prado Lopes mais representativa, com 14,05 hectares.

As comunidades estão localizadas em área de topo de morro, à altitude média de 900 metros, sendo, portanto, mais elevadas do que os bairros com arruamento padrão existentes no entorno. Nas áreas limítrofes a oeste, nota-se presença de conjuntos habitacionais populares e espaços públicos para lazer, como poderá ser observado na Figura 15 apresentada a seguir.

São duas das comunidades mais antigas de Belo Horizonte, que se formaram a partir da construção da antiga Avenida Pampulha (atualmente, Antônio Carlos), nos Anos 1940. Especialmente no caso da Pedreira Prado Lopes, há caso curioso envolvendo a criação de um condomínio habitacional ainda na década citada, sob

gestão do então prefeito Juscelino Kubitscheck, como um dos grandes símbolos da arquitetura moderna e da ousadia estética na capital mineira (VIDIGAL, 2011).

Por outro lado, a disposição do intitulado Conjunto IAPI também teve como finalidade ideológica velada esconder a vista das comunidades carentes ali existentes de quem trafegava pela via arterial, à época, moderna e recém-inaugurada, tal como discute Nery (2005). Atualmente tombado pelo Conselho Deliberativo do Patrimônio Cultural de Belo Horizonte, o Conjunto IAPI resguarda pequeno fragmento florestal de porte arbóreo, o que contrasta com as comunidades limítrofes, onde são observados apenas indivíduos isolados.

A Vila Senhor dos Passos se encontra em situação limítrofe, a sul, com a unidade climática urbana diagnosticada por Assis (2010) e ressaltada na seção anterior da presente pesquisa. Dadas as características da região apresentadas por aquele autor, somadas às condições de adensamento de edificações observadas em ambas as comunidades, tanto a Pedreira Prado Lopes, quanto a Vila Senhor dos Passos se tornam excelentes laboratórios para investigação da dinâmica climática em escala inferior, sobretudo no que se refere aos aspectos da temperatura e umidade relativa do ar e às propriedades caloríficas dos materiais de revestimento das habitações, elementos que são objetivados pela presente pesquisa.

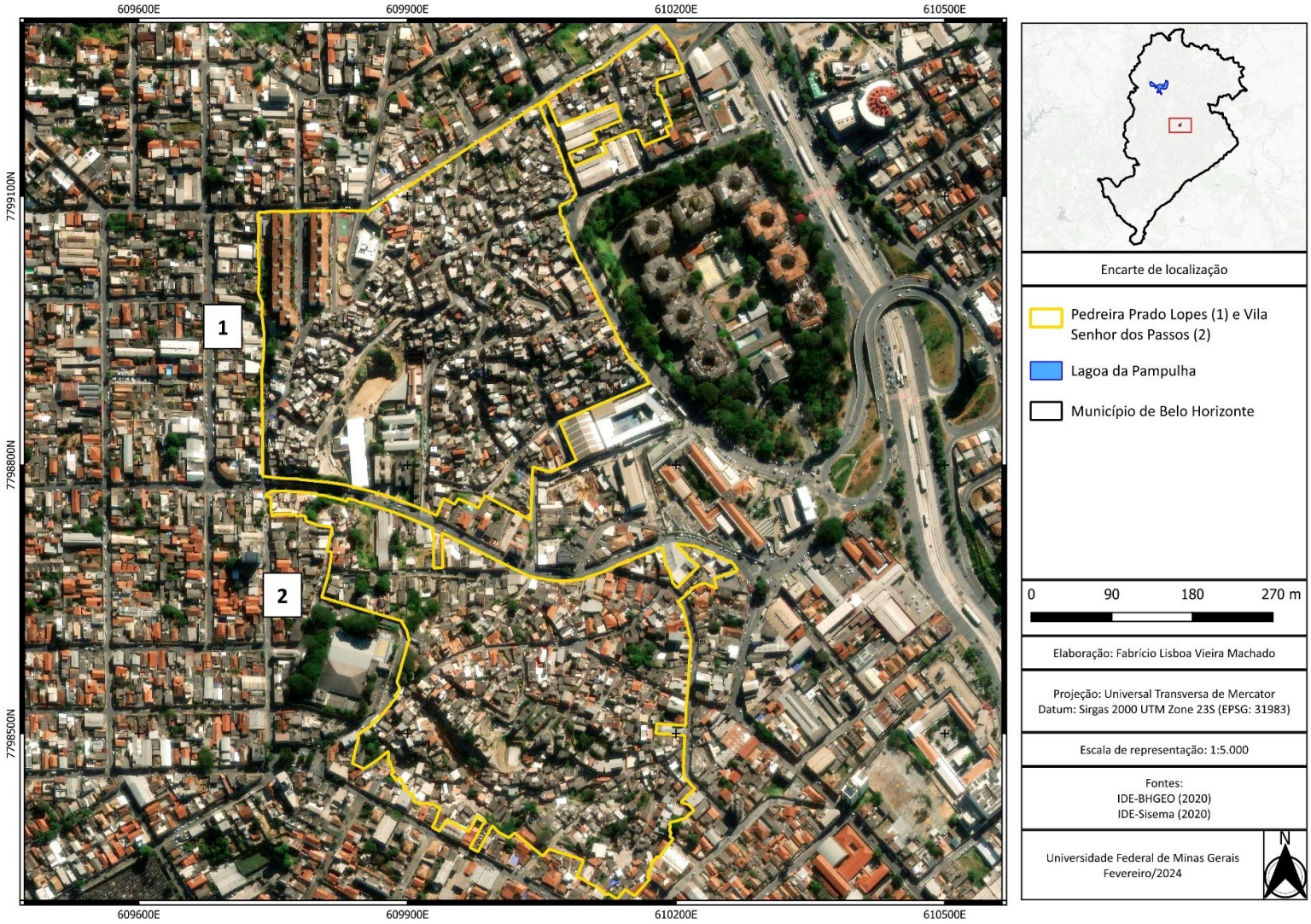
Apesar de também não terem sido alvos de produções literárias específicas no âmbito da climatologia geográfica, as Unidades Amostrais aqui discutidas, em especial a Pedreira Prado Lopes, são citadas em trabalhos que discutem a eficiência de mecanismos que visam à ecoeficiência, qualidade de vida e conforto térmico em habitações no âmbito do programa municipal Vila Viva[23], como observado em Martins (2012).

As comunidades também foram alvos recentes de programas municipais de abertura e pavimentação de vias, que melhoraram as condições de mobilidade

[23] Conforme sítio eletrônico da Prefeitura de Belo Horizonte, trata-se de programa de intervenção estruturante com ações baseadas em três eixos: urbanístico, social e jurídico. Visa realização de obras de saneamento, remoção de famílias, construção de unidades habitacionais, erradicação de áreas de risco, reestruturação de sistema viário, urbanização de becos, além de implantação de parques e equipamentos para a prática de esportes e lazer. O eixo social engloba ações de desenvolvimento comunitário, educação sanitária e ambiental e criação de alternativas de geração de trabalho e renda. Já o eixo jurídico é implementado após o término da urbanização do local, para que a área possa ser legalizada e emitidas as escrituras dos lotes aos ocupantes.

urbana para as populações e, potencialmente, possibilitaram maior circulação de ar entre as edificações. Vale destacar, neste sentido, que a Vila Senhor dos Passos conta atualmente com arruamento ordenado em quase sua totalidade, o que pode descaracterizá-la face aos objetivos da pesquisa. Por essa razão, o foco para coleta e análise de dados de campo será dado à Pedreira Prado Lopes.

Figura 15. Localização da Unidade Amostral Pedreira Prado Lopes e da comunidade vizinha Vila Senhor dos Passos.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.2 Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia)

Com população somada de 15.724 habitantes, distribuída em quase 48 hectares de extensão, a Unidade Amostral composta pelo Morro do Papagaio, Vila Santa Lúcia (ou Barragem), Vila São Bento e Vila Estrela é uma das mais densas e continuamente edificadas de Belo Horizonte, sendo oficialmente intituladas como Aglomerado Santa Lúcia.

À exceção da presença de fragmentos florestais limítrofes a sul, entre outros indivíduos vegetacionais isolados, as comunidades funcionam juntas quase como um grande bloco maciço pavimentado, em que a taxa de impermeabilização do solo é bastante significativa, inclusive se comparada às demais Unidades Amostrais da pesquisa.

Seu contexto geomorfológico também é interessante, visto que estão localizadas em áreas com considerável declividade, ocupando porção do espaço que varia desde o topo de morro (cujas cotas altimétricas chegam a mais de 1040 metros), até o fundo de vale da sub-bacia do Córrego do Leitão, afluente do Ribeirão Arrudas, com cotas altimétricas próximas dos 900 metros. Tais características podem criar padrões catabáticos e anabáticos específicos de circulação ar, que requerem investigação científica no que concerne à influência dos mesmos sobre as condições de temperatura e umidade nas vilas citadas.

No fundo de vale, cabe também destacar a existência da Barragem Santa Lúcia, bacia de detenção artificial construída no ano de 1953 com o objetivo de controlar as cheias do curso d'água principal durante o período chuvoso, que impactava bairros nobres localizados à jusante, como Lourdes, Santo Antônio e Cidade Jardim (SOARES, 2001).

Contudo, com a veloz urbanização da área de entorno e a disposição inadequada de resíduos sólidos, esgoto doméstico e o próprio transporte de sedimentos para a bacia de detenção, sua eficácia foi comprometida e qualidade da água impactada, o que levou à construção de parque urbano às margens da barragem no final da década de 1980 e ao posterior estabelecimento de normas de uso e ocupação do solo pelo Plano Diretor Urbanístico da capital.

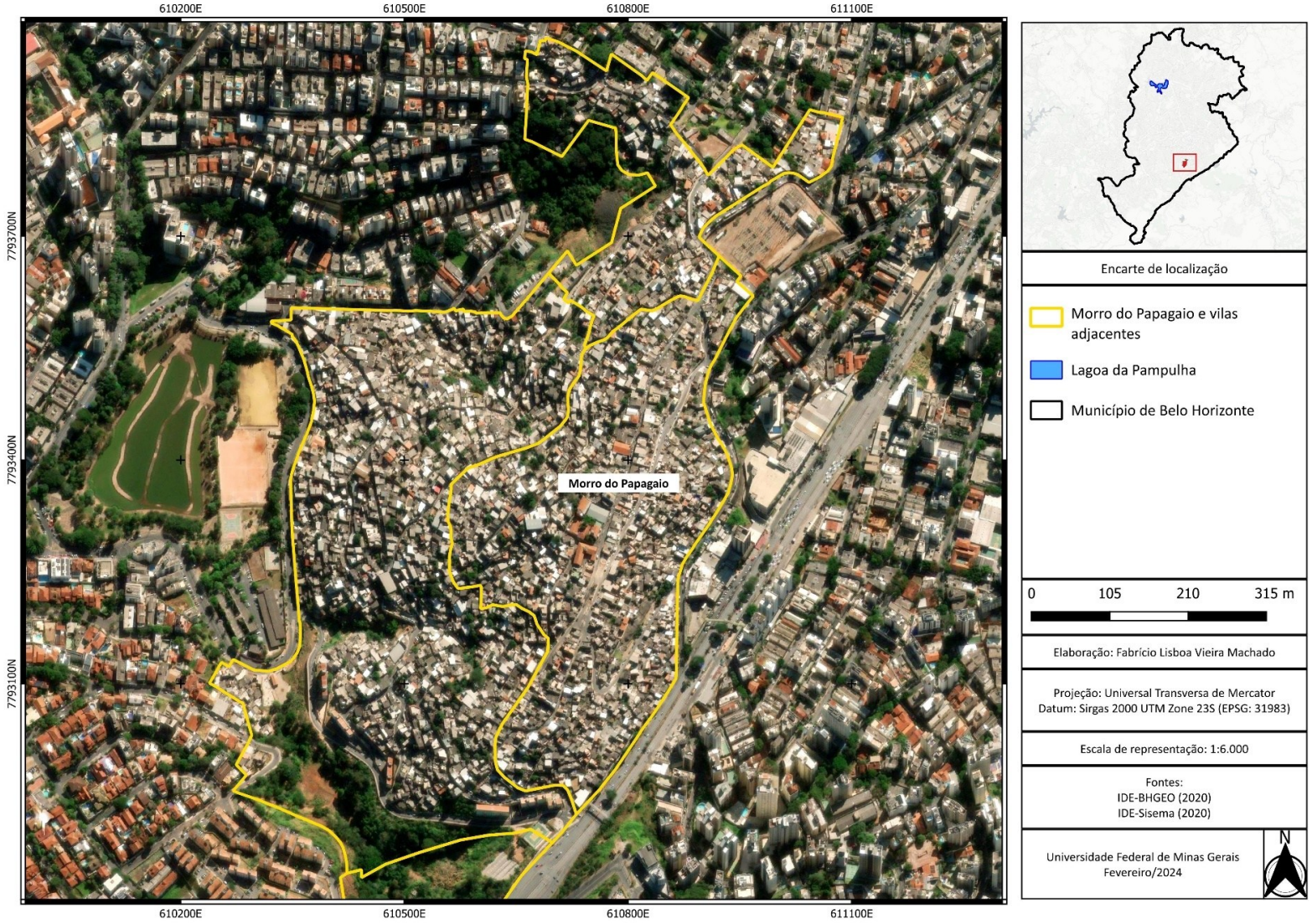
Autores como Perché & Amaral (2017) inclusive realizaram recente estudo de simulação hidrológica na Barragem Santa Lúcia, em que foi constatada a possibilidade de redução de riscos de inundação na bacia a partir da introdução de estruturas de controle hidráulico.

Do ponto de vista climatológico, além de atuar como fator que minimiza efeitos negativos derivados da relação entre maiores volumes pluviométricos e ocupação desordenada do espaço, a Barragem Santa Lúcia também pode figurar como mecanismo de arrefecimento de temperaturas e aumento do saldo de umidade relativa do ar nas comunidades, em função da evaporação do seu extenso espelho da água (da ordem 3 hectares, aproximadamente).

Também é relevante destacar que, diferentemente das demais Unidades Amostrais já apresentadas, o Morro do Papagaio e as demais vilas adjacentes são circundadas por bairros de alto padrão aquisitivo, como pode ser visto na Figura 16. Nota-se a existência de prédios com mais de 15 pavimentos, vias planejadas e com arborização urbana, loteamentos ainda não impermeabilizados e unidades de conservação municipais[24], características que fazem das comunidades citadas relevantes alvos de investigação para os propósitos da pesquisa.

[24] Parque Municipal Altamira Costa Nogueira, Parque Municipal Mata das Borboletas e Zona de Amortecimento da Estação Ecológica do Cercadinho.

Figura 16. Localização da Unidade Amostral Morro do Papagaio e vilas adjacentes, no Aglomerado Santa Lúcia.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.3 Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra)

Localizado no sopé da escarpa da Serra do Curral, divisa entre as Regionais Administrativas Centro-Sul e Leste, o Aglomerado da Serra é o maior e mais populoso conjunto de comunidades da capita mineira. Segundo dados da IDE-BHGEO, é composto por um total de nove vilas, sendo: Nossa Senhora Aparecida, Nossa Senhora da Conceição, Teodomiro Cruz, Pomar do Cafezal (ou Sustenido), Santana do Cafezal, Novo São Lucas, Fazendinha, Nossa Senhora de Fátima (a maior delas, com 60 hectares de área) e Marçola. Juntas, as comunidades totalizam 175,81 hectares, com população de quase 40 mil habitantes, o que torna o Aglomerado da Serra uma das mais relevantes Unidades Amostrais da pesquisa simplesmente pelos aspectos demográficos.

Não obstante os aspectos mencionados, cabe também destacar o relevante contexto geomorfológico em que está inserido. Com altitudes que variam de aproximadamente 875 a 1160 metros, o conjunto de vilas do Aglomerado da Serra é o que apresenta a maior amplitude altimétrica dentre todas as demais Unidades Amostrais da pesquisa e, também, o que possui maior continuidade de áreas edificadas em cotas elevadas.

Essa diferença de quase 300 metros entre topo de morro e fundo de vale cria padrões de circulação catabáticos e anabáticos que podem atenuar condições de aquecimento do ar provocadas pelas propriedades físicas das edificações, tal como visto por Machado (2013), em pesquisa específica sobre o campo térmico e higrométrico do Aglomerado da Serra. Na ocasião, o autor verificou que a participação do relevo foi evidente para o estabelecimento de topoclimas distintos na Vila Nossa Senhora de Fátima, localizada nas vertentes mais elevadas e próximas à Serra do Curral, em que a temperatura e umidade relativa do ar foram, em média, 1,5°C mais baixa e 3% mais elevada, respectivamente, do que nas demais vilas analisadas naquela pesquisa.

Por outro lado, na Vila Santana do Cafezal, localizada em porção mais central do Aglomerado da Serra e em altitude inferior, o mesmo autor verificou indícios da formação de núcleos de aquecimento do ar, com diferenças térmicas horárias de até 8,1°C em relação às demais vilas analisadas, principalmente sobre tipo de tempo estável.

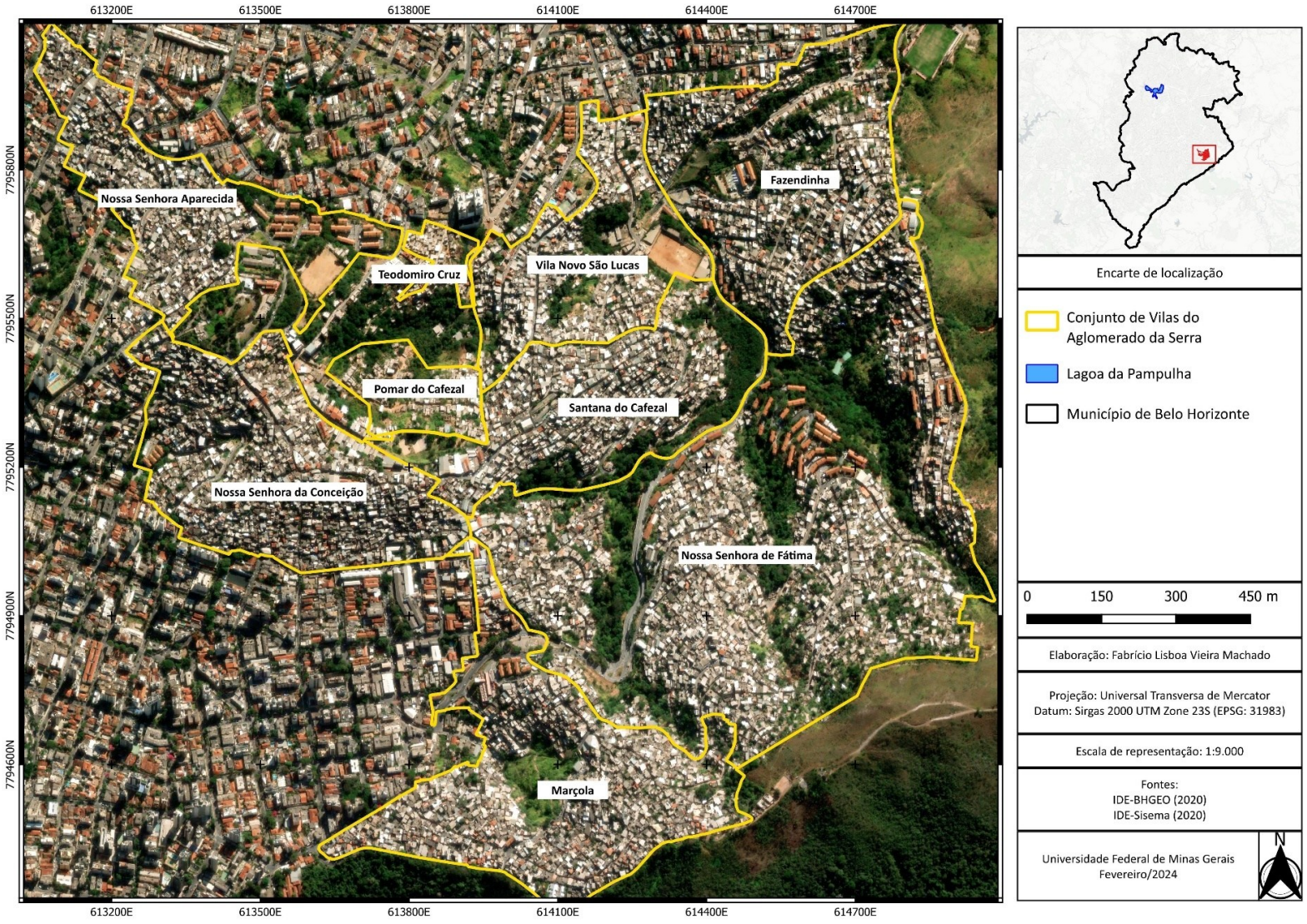
Do ponto de vista da cobertura vegetal, o Aglomerado da Serra também se destaca em comparação às demais Unidades Amostrais selecionadas para a presente pesquisa, visto que ainda preserva seus fundos de vale vegetados e com espécies de porte arbóreo. Obras desenvolvidas na última década no âmbito do Programa Vila Viva foram responsáveis pela abertura de vias arteriais pavimentadas e cercadas, que por margearem as áreas de leito fluvial, contribuíram para a manutenção dos fragmentos vegetacionais. Além disso, os fundos de vale do Aglomerado da Serra também são enquadrados como Áreas de Preservação Permanente de curso d'água e de declividade pelo município, que são instrumentos protetivos legalmente instituídos.

A contribuição da vegetação para o aumento da umidade relativa e diminuição da temperatura do ar, principalmente por processos de evapotranspiração, foi observada por Machado & Jardim (2014), que em esforço de síntese do trabalho anteriormente citado, identificaram unidade topoclimática específica associada aos fundos de vale vegetados do Aglomerado da Serra, em contraste com unidades densamente edificadas ou em condições de relevo diferenciadas.

É evidente que, pela limitação da disponibilidade de equipamentos utilizados para coleta de dados *in loco* na pesquisa, não foi possível instalar miniestações meteorológicas em todas as vilas do Aglomerado da Serra, tendo sido privilegiada a Vila Novo São Lucas (vulgo "Favelinha"), cujas condições de uso e ocupação da terra são favoráveis à formação de episódios de ilhas de calor ou núcleos de aquecimento, tais como discutidas ao longo da revisão literária da pesquisa. O local exato de instalação e as características técnicas dos equipamentos serão detalhadas em seção posterior.

Por fim, cabe mencionar que parte das vilas do Aglomerado da Serra estão inseridas na Área de Proteção Ambiental (APA) Sul RMBH, que, conforme Lei nº 9.985/2000, tem como objetivos básicos proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos naturais. O mapa da Figura 17 foi produzido em escala menor em relação às demais Unidades Amostrais da pesquisa, para que pudesse representar todas as vilas do Aglomerado da Serra simultaneamente.

Figura 17. Localização das vilas e comunidades componentes do Aglomerado da Serra, onde se insere a Unidade Amostral Vila Novo São Lucas.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.4 Vila Sumaré

Localizada na divisa entre as Regionais Administrativas Noroeste e Pampulha, às margens do Anel Rodoviário de Belo Horizonte e da Avenida Presidente Carlos Luz, a Vila Sumaré ocupa área de 6,62 hectares, com população total de 2.768 habitantes[25] e se encontra à altitude média de 850 m.

Apesar de não possuir extensão espacial muito significativa, a vila, que também é popularmente conhecida como “Inferninho”, apresenta característica de localização muito peculiar, que a elege como uma das Unidades Amostrais da pesquisa. Ela está literalmente cercada por grandes construções do tipo galpão, como o Shopping Del Rey, a fábrica da Coca-Cola e a estrutura de antiga rede de motéis de luxo, que foram responsáveis por demarcar os limites de expansão da comunidade, forçando a ocupação a se dar preferencialmente em porção rebaixada do relevo. Com isso, a área de estudo se encontra, do ponto de vista geomorfológico, em uma espécie de depressão relativa se comparada à área de entorno, característica que é acentuada pelas estruturas de galpões que a cercam e que podem contribuir para situações de confinamento de calor.

Além disso, há dois representativos corredores de ar localizados a noroeste e sudoeste da favela, representados pela rodovia e pela via arterial citadas anteriormente. Pela tipologia das estruturas viárias, os automóveis trafegam comumente a mais de 60 ou 80 km/h nestes trechos, o que pode criar situações específicas de advecção de ar, calor e umidade.

Também cabe destacar que a presença de vegetação no interior da favela é praticamente nula, restringindo-se a menos de uma dezena de indivíduos nitidamente visíveis em imagens de satélite. Somente na porção vizinha a nordeste é que se observa contínuo fragmento vegetacional, associado a bosque mantido até então pela recém extinta rede de motéis *Forest Hills*.

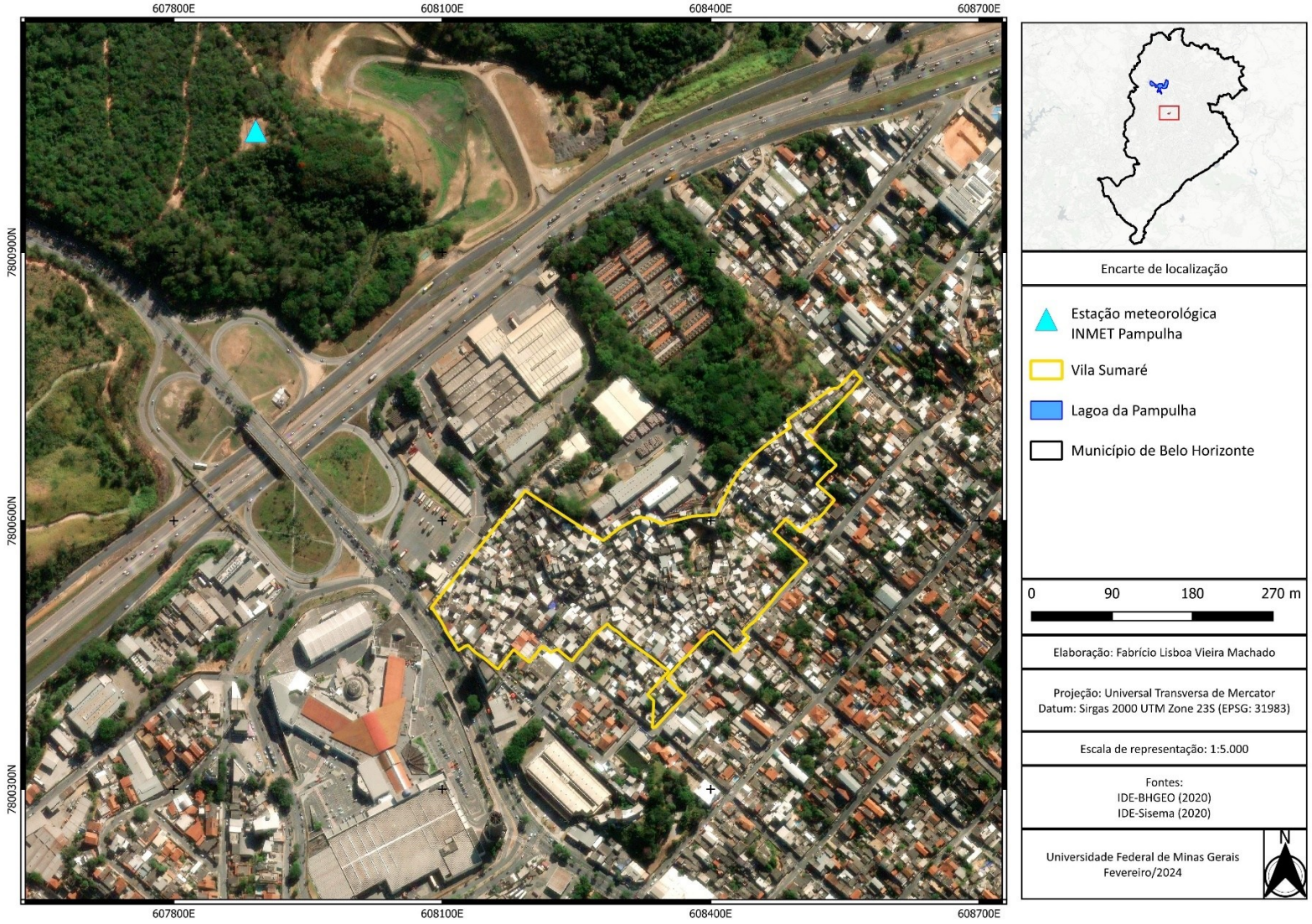
Não fossem suficientes as características acima apresentadas, a Vila Sumaré também se encontrada localizada a aproximadamente 500 metros de distância da estação meteorológica oficial do INMET Pampulha, sediada em área de mata da

[25] Dados extraídos de camada de informação geográfica da Infraestrutura de Dados Espaciais da Prefeitura de Belo Horizonte (IDE-BHGEO).

Estação Ecológica da Universidade Federal de Minas Gerais. Isso favorece a realização da pesquisa nesta área ao garantir um posto de controle para obtenção de dados climáticos externos ao ambiente da comunidade, que serão utilizados para comparação com aqueles mensurados no interior da Vila Sumaré nas etapas de campo da pesquisa.

A área de estudo está localizada na sub-bacia hidrográfica do Córrego Engenho Nogueira, sendo citada em pesquisa envolvendo os impactos do desenvolvimento urbano na rede de drenagem da região (FERNANDES, 2010). Também foi diagnosticada, em estudo de Tolentino & Diniz (2014), como um dos *hotspots* do tráfico de drogas na capital mineira. A revisão bibliográfica, porém, não encontrou produções específicas que ressaltassem aspectos climáticos da comunidade. A Figura 18 ilustra a localização da Unidade Amostral e as características da paisagem de entorno.

Figura 18. Localização da Unidade Amostral Vila Sumaré.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.2.5 Cabana do Pai Tomás

A quinta e última Unidade Amostral da pesquisa está localizada na regional administrativa Oeste de Belo Horizonte, em área próxima ao limite com o município vizinho de Contagem. É a segunda comunidade mais populosa da capital mineira, com quase 18 mil habitantes, distribuídos em 49 hectares. Em população bruta, a intitulada Cabana do Pai Tomás só perde para a Vila Alto Vera Cruz, localizada na Regional Leste, que não foi selecionada como Unidade Amostral nesta pesquisa em virtude do seu padrão simétrico e ordenado de arruamento e de disposição de quadras, que se assemelha muito mais à ocupação com parâmetros urbanísticos e construtivos definidos pelos órgãos públicos do que ao padrão de edificações aglomeradas observado nas demais vilas e comunidades investigadas.

Em relação a este último aspecto, torna-se interessante destacar que a Cabana do Pai Tomás visualmente apresenta muito mais becos e vielas do que estrutura viária com faixas alargadas, o que faz com que suas edificações estejam muito próximas umas às outras e potencialmente contribuam para o aquecimento do ar por armazenamento e irradiação de calor. Essa condição pode ainda ser potencializada pela quase ausência de fragmentos vegetacionais no interior da comunidade, que conta com apenas dois fragmentos desconexos entre si, além de indivíduos isolados.

À leste da comunidade, encontra-se localizado o cemitério Parque da Colina, extensa área gramada de aproximadamente 27 hectares, que conta ainda com alguns bosques com espécies arbóreas e um lago artificial. Sua posição exatamente limítrofe com a comunidade pode culminar em distintos padrões de circulação do ar e de transporte horizontal de temperatura e umidade, visto que o balanço de radiação entre os dois espaços será distinto, dadas as condições opostas de uso e cobertura da terra.

Conforme discute Cunha (2003), em trabalho de resgate da história e da memória da Cabana do Pai Tomás, a comunidade começou a surgir e a se expandir na década de 1960, a partir da derrubada de eucaliptais presentes naquele espaço e que, supostamente, pertenciam à figura política da época. A velocidade de alteração das condições da paisagem e sua substituição por massa edificada foi tamanha, que a população na comunidade chegou a alcançar o patamar de 70 mil habitantes,

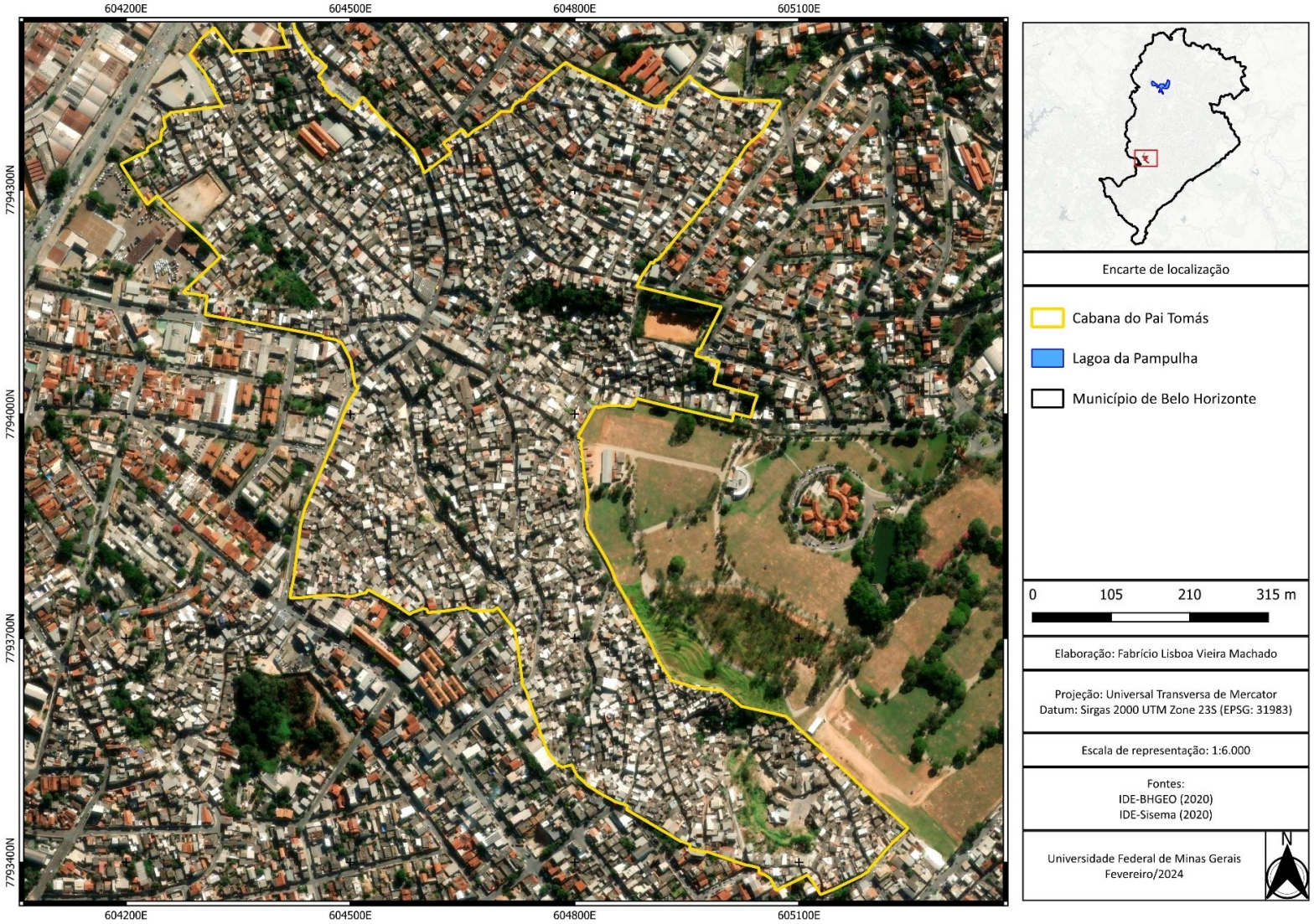
sendo inclusive manchete do Jornal Folha de São Paulo, que em 1994 a rotulava como “a favela mais apertada” ou o “local mais populoso do Brasil”[26]. A densidade demográfica da comunidade à época, segundo dados do IBGE inseridos na própria matéria, era 32,6 vezes superior à Região Metropolitana de Belo Horizonte.

Somado aos aspectos demográficos únicos da Cabana do Pai Tomás, vale destacar sua localização próxima a trecho da Avenida Amazonas com presença de inúmeros galpões com cobertura de zinco e/ou demais revestimentos metálicos, cujo baixíssimo calor específico pode resultar em rápido e intenso aquecimento dos telhados e, por consequência, da camada de ar mais próxima à superfície. Tal condição precisará ser investigada, mas pode ser vista como potencial contribuidor para a formação de núcleos térmicos na região da comunidade.

Por fim, cabe destacar que a Cabana do Pai Tomás não apresenta variações expressivas em suas cotas altimétricas, oscilando aproximadamente entre 890 e pouco mais de 940 metros de altitude. A Figura 19 ilustra a localização e as dimensões da Unidade Amostral.

[26] Disponível em: https://www1.folha.uol.com.br/fsp/1994/5/29/cotidiano/19.html.

Figura 19. Localização da Unidade Amostral Cabana do Pai Tomás.



Fonte: Autoria própria, 2024.

3.3 Realização de trabalhos de campo e instalação de miniestações meteorológicas *in loco*

De modo a adequar os insumos de análise à escala do fenômeno geográfico investigado na pesquisa, foi necessário coletar dados meteorológicos em intervalo horário no interior das Unidades Amostrais apresentadas na seção anterior. Os dados meteorológicos derivados das estações oficiais do INMET, apesar de importantes, estão localizados em contextos paisagísticos que não se assemelham às características encontradas nas vilas e comunidades, sendo aqui empregados apenas como referência padrão para comparação com as condições observadas nas áreas de estudo.

Para operacionalizar a coleta dos dados *in loco*, portanto, foram instaladas miniestações meteorológicas em edificações de moradores que previamente consentiram em participar da pesquisa como pontos de apoio em campo. Buscou-se selecionar locais em suas residências que se aproximassem, sempre que possível, dos critérios técnicos definidos por Geiger (1961) para pesquisas em escalas microclimáticas, como disposição dos equipamentos em locais abertos e arejados, com distância mínima de 1,5 metros do solo, ausentes de obstruções laterais (como paredes e muros), além de privilegiar a afixação da miniestação sobre superfícies gramadas, de modo a diminuir a irradiação de calor superficial ao equipamento.

Contudo, vale lembrar que a pesquisa trata de contextos agudos de ocupação do espaço urbano e imaginar encontrar condições tecnicamente ótimas para a instalação das miniestações meteorológicas em todas as Unidades Amostrais seria, no mínimo, ingênuo ou omisso. Desse modo, procurou-se observar as recomendações técnicas da literatura para disposição dos equipamentos em campo, mas nem sempre puderam ser atendidas na íntegra, tal como será apresentado em seção seguinte.

Cada miniestação meteorológica é composta por um abrigo impermeável e um sensor afixado em seu interior. O abrigo foi idealizado e desenvolvido pelo professor do Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, Carlos Henrique Jardim, com o apoio de bolsistas de graduação e pós-graduação, tendo sido inicialmente empregado em pesquisa de Lopes & Jardim (2012) em

municípios da RMBH e avaliado segundo seu desempenho pelo trabalho de Jardim (2018). Consiste em par de estruturas tubulares de material PVC, acopladas umas às outras, com tampa de cobertura revestida internamente por material isolante do tipo EVA. Ambos os tubos possuem 22 centímetros de altura, sendo que o externo possui diâmetro de 15 centímetros e o interno de 10 centímetros.

De modo a promover a ventilação da estrutura, possuem aberturas na parte superior e inferior, além três orifícios laterais de 2 centímetros de diâmetro posicionados a cada 45°, totalizando 12 orifícios no tubo externo e outros 12 no interno. Os orifícios externos e internos foram posicionados de maneira intercalada, de modo que a radiação solar não incida diretamente sobre o sensor, que fica afixado no interior da estrutura. A superfície do tubo externo também é revestida por pintura à base de esmalte sintético brilhante na coloração branca, de modo a aumentar a reflectância superficial do material face à radiação solar incidente (albedo) e, por consequência, diminuir o aquecimento interno do equipamento e a potencial interferência na fidelidade dos dados mensurados pelo sensor.

Em relação aos aparelhos sensores, trata-se de termo-higrômetro registrador automático (do tipo *datalogger*), modelo Instrutherm HT-500, de patrimônio da instituição anteriormente citada. São capazes de coletar e armazenar dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e ponto de orvalho em intervalos que variam de dois segundos a 24 horas. Os dados gerados pelos sensores podem ser facilmente descarregados em computadores a partir de conexão do tipo USB constante no aparelho.

Para os propósitos da presente pesquisa e, principalmente, para sustentar a análise rítmica dos elementos climáticos mensurados no interior das vilas e comunidades, os sensores foram configurados para coletar dados de temperatura e umidade relativa do ar em intervalo horário. Esse mesmo intervalo de coleta permitiu, por exemplo, que Machado (2016) verificasse a evolução e o ritmo de variação do comportamento atmosférico em relação às características da superfície em pesquisa de mestrado realizada com equipamentos semelhantes no município de Teófilo Otoni (MG).

Vale destacar que o pesquisador e a instituição a qual está vinculado não dispõem de quantidade suficiente de aparelhos sensores com registradores

automáticos para coleta dos demais elementos climáticos no interior das Unidades Amostrais da pesquisa, como precipitação, radiação solar, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos, ficando os dados *in loco* restritos aos coletados pelos *dataloggers* citados. Os demais elementos climáticos foram considerados na pesquisa com base nos dados coletados pelas estações meteorológicas oficiais do INMET, em que sabidamente, porém, espera-se que seus resultados reflitam relações superfície-atmosfera não necessariamente associadas às vilas e comunidades. A Figura 20 ilustra a estrutura dos abrigos meteorológicos e os sensores utilizados na pesquisa.

Figura 20. Registro fotográfico dos abrigos meteorológicos e dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar (A). Perfil esquemático do abrigo (B), contendo 1. teto; 2. lâmina de isopor; 3. tubo PVC (parede externa); 4. tubo PVC (parede interna); 5. calço de madeira para manter afastamento e fixar as paredes externa e interna; 6. parafuso unindo os dois abrigos e o suporte do sensor; 7. suporte do registrador; 8. parafuso da haste que prende o abrigo ao teto; 9. parafuso de união dos dois abrigos (parede externa e interna); 10 lâmina de EVA; 11. registrador; 12. alça externa; 13. arame; 14. lâmina de EVA superposta ao isopor; 15. haste de metal unindo teto e corpo do abrigo.

Fonte: Adaptado de Machado (2016) e Jardim (2018).

De modo a analisar a resposta superficial da temperatura e umidade relativa do ar nas vilas e comunidades da pesquisa face a diferentes tipos de tempo, o período de coleta dos dados meteorológicos pelas miniestações foi dividido em dois blocos. O primeiro deles contemplou média de 55 dias de coleta horária ininterrupta

no período hidrológico seco de Belo Horizonte, enquanto o segundo contemplou média de 58 dias ininterruptos de coleta no período hidrológico úmido.

Para a determinação precisa dos períodos secos e úmidos da região de estudo, que foram utilizados nesta pesquisa como norteadores para a instalação dos abrigos meteorológicos e início da coleta dos dados *in loco*, considerou-se o balanço hídrico climático, tal como apresentado no capítulo anterior. Dessa forma, o período de coleta na estação seca se deu entre 29 de julho e 01 de outubro de 2022. Já a coleta de dados na estação úmida foi realizada entre 13 de janeiro de 2023 e 09 de abril de 2023.

Vale ressaltar que, previamente ao início da coleta de dados no interior das Unidades Amostrais, os aparelhos sensores passaram por etapa de aferição e ajustes dos parâmetros registrados, de modo a verificar seu funcionamento e se a calibração deles se mostrava regular, registrando dados de temperatura e umidade relativa do ar que fossem suficientemente semelhantes entre todos os sensores em um mesmo horário.

Para isso, os aparelhos utilizados na pesquisa foram lacrados no interior de caixa de papelão, protegida da incidência de radiação solar direta, difusa e/ou de outras fontes ativas de calor, para coletar dados em intervalos horários exatos durante 24 horas, conforme condições ilustradas na Figura 21.

Ao término do período de aferição, foram identificadas pequenas variações horárias nos elementos climáticos medidos entre os sensores, mas dentro da faixa de erro médio esperado, conforme assinalada pelo manual de instruções do termo-higrômetro, sendo da ordem de ± 1°C para a temperatura do ar e de ± 3% para a umidade relativa do ar. Tais variações horárias entre aparelhos não superaram a marca de 0,8°C para a temperatura, e de 0,9% para a umidade relativa do ar.

Figura 21. Sensores *dataloggers*, modelo Instrutherm HT-500, dispostos em caixa isolada para aferir a similaridade de medida dos valores de temperatura e umidade relativa do ar no mesmo horário e local.

Fonte: Autoria própria, 2022.

De posse dos dados, foram calculadas as médias horárias globais de temperatura e umidade relativa do ar de todos os sensores nesse período, bem como definidos fatores corretivos de caráter aditivo ou subtrativo, com base na diferença dos valores médios de cada sensor em relação ao valor de referência global, conforme descrito na Tabela 03 apresentada a seguir.

Com a aplicação dos fatores corretivos sobre os dados brutos coletados no interior das vilas e comunidades durante as etapas de campo da pesquisa, garantiu-se a homogeneidade de medidas entre sensores, bem como o aumento da confiabilidade geral dos resultados.

Tabela 03. Fatores corretivos para os dados de temperatura e umidade relativa do ar medidos entre os sensores *dataloggers* da pesquisa.

Unidade Amostral	Temp. média de aferição (°C)	UR média de aferição (%)	Temp. de referência (°C)	UR de referência (%)	Fator corretivo temp. (°C)	Fator corretivo UR (%)
UA1 - Pedreira Prado Lopes	24,2	80,5			-0,3	+0,3
UA2 - Morro do Papagaio	24,0	80,0			-0,1	+0,8
UA3 - Vila Novo São Lucas	23,9	81,3	23,9	80,8	0,0	-0,5
UA4 - Vila Sumaré	24,0	80,7			-0,1	+0,1
UA5 - Cabana do Pai Tomás	23,8	81,2			+0,1	-0,4
UA6 - Xangrilá	23,6	81,0			+0,3	-0,2

Fonte: Autoria própria, 2022.

Uma vez alinhados entre si, os sensores também passaram por etapa de ajuste comparativo frente aos dados das estações meteorológicas oficiais do INMET Pampulha (Belo Horizonte) e do município de Juiz de Fora, conforme procedimentos técnicos realizados por Assis & Jardim (2020), que forneceram os fatores corretivos para a presente pesquisa.

Na ocasião, os autores instalaram o mesmo modelo de abrigo meteorológico aqui utilizado, também contendo o mesmo sensor *datalogger*, ao lado das estações INMET citadas, para coleta de dados horários de temperatura e umidade relativa do ar durante período médio de uma semana. Em seguida, foi calculada a diferença entre médias horárias mensuradas por todos os instrumentos, de modo a resultar em novo fator corretor aditivo ou subtrativo, que foi aplicado sobre os dados brutos coletados no artigo citado.

Apesar das vilas e comunidades desta pesquisa estarem integralmente inseridas no município de Belo Horizonte, justifica-se o emprego dos fatores corretivos da estação INMET de Juiz de Fora pelo fato de que o número de observações realizadas pelos autores no município da Zona da Mata mineira foi superior ao de Belo Horizonte.

Ainda que localizada em contexto climático local distinto, o fato de os instrumentos meteorológicos empregados terem sido os mesmos agrega confiabilidade ao uso dos fatores corretivos derivados da estação do município de

Juiz de Fora. A Tabela 04 apresenta os valores obtidos por Assis & Jardim (2020). Destaca-se que o intervalo horário entre 09h e 12h foi o que apresentou maior diferença térmica e higrométrica média entre os sensores *datalogger* e as estações INMET, alcançando média de até -3,7°C e +3,5%, respectivamente.

Tabela 04. Fatores corretivos para os dados de temperatura e umidade relativa do ar medidos entre o modelo de sensor *datalogger* da pesquisa e as estações INMET Pampulha e Juiz de Fora.

Horário	INMET Pampulha		INMET Juiz de Fora		Fator corretivo médio temperatura (°C)	Fator corretivo médio UR (%)
	Fator corretivo temperatura (°C)	Fator corretivo UR (%)	Fator corretivo temperatura (°C)	Fator corretivo UR (%)		
00h	0,8	-0,2	0,5	-2,2	+0,7	-1,2
01h	0,7	-0,1	0,6	-1,8	+0,7	-1,0
02h	0,7	0,2	0,5	-1,2	+0,6	-0,5
03h	0,8	0,3	0,4	-1,0	+0,6	-0,4
04h	0,7	0,3	0,4	-0,7	+0,6	-0,2
05h	1,0	-0,3	0,3	-0,6	+0,7	-0,5
06h	-0,5	0,2	-0,2	0,3	-0,4	+0,3
07h	-2,7	0,1	-1,4	3,2	-2,0	+1,7
08h	-3,5	0,3	-2,0	5,2	-2,8	+2,8
09h	-4,4	0,3	-2,8	6,7	-3,6	+3,5
10h	-4,3	0,3	-3,1	6,1	-3,7	+3,2
11h	-4,1	0,1	-3,3	5,8	-3,7	+3,0
12h	-3,6	-0,1	-3,1	3,3	-3,4	+1,6
13h	-2,7	0,2	-2,6	1,6	-2,7	+0,9
14h	-2,0	0,3	-1,8	-1,1	-1,9	-0,4
15h	-1,8	-0,1	-0,9	-3,4	-1,4	-1,8
16h	0,4	0,1	0,4	-6,4	+0,4	-3,2
17h	1,7	-0,3	1,2	-7,8	+1,5	-4,1
18h	1,5	-0,1	1,0	-6,8	+1,3	-3,5
19h	1,3	-0,3	0,8	-5,0	+1,1	-2,7
20h	1,2	-1,3	0,7	-4,2	+1,0	-2,8
21h	0,8	0,1	0,7	-4,0	+0,8	-2,0
22h	0,9	-0,2	0,6	-3,2	+0,8	-1,7
23h	0,8	-0,2	0,7	-3,0	+0,8	-1,6

Fonte: Autoria própria, 2022.

Em resumo, para correção final dos dados de temperatura e umidade relativa do ar coletados nas vilas e comunidades desta pesquisa, trabalhou-se com a aplicação, primeiramente, da média dos fatores corretivos dos ajustes entre sensores e, em seguida, dos novos fatores corretivos verificados por Assis & Jardim (2020) junto às estações INMET destacadas.

Cabe informar que a pesquisa optou por aproveitar os fatores corretivos fornecidos pelos autores citados, ao invés de realizar nova etapa de instalação de equipamentos junto à estação INMET Pampulha e coleta de dados atualizados, em

virtude da relativa contemporaneidade entre os trabalhos e para fins de ganhos logísticos, tendo em vista situação pessoal de familiar do pesquisador que impactou no planejamento idealizado.

3.3.1 Locais de instalação

Como destacado na seção 3.3, a escolha dos locais para instalação dos equipamentos sensores em campo foi guiada pelas recomendações técnicas de cunho microclimatológico encontradas na literatura. Contudo, a realidade experimentada no interior das habitações que foram gentilmente cedidas por moradores das vilas e comunidades para a pesquisa, nem sempre puderam atender aos critérios que melhor refletissem aspectos estritamente topoclimáticos ou associados apenas aos climas locais, estando sob efeitos próximos de condições microclimáticas.

Isso, por outro lado, permite explorar características intrínsecas do ambiente transformado, o que também é relevante para os objetivos da pesquisa e ainda oferece a possibilidade de avaliar efeitos do balanço energético próprio em habitações de favela, esforço que carece de referência específica na literatura.

A primeira miniestação meteorológica da pesquisa, portanto, foi instalada em laje de residência domiciliar de três pavimentos no interior da Pedreira Prado Lopes, à altitude de 900 metros, em face voltada para oeste. A via que dá acesso é intitulada como “Beco do Bento”, que foi recentemente alargada e pavimentada por obras da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte.

Na laje da edificação, havia cobertura parcial de telha de amianto e solo revestido integralmente por cimento. O espaço era lateralmente aberto em três eixos e a miniestação meteorológica esteve distante do chão e das paredes em pelo menos 1,60 metros. Contudo, cabe destacar que havia presença de viga lateral de madeira para sustentação do telhado, localizada muito próxima ao abrigo (cerca de 15 cm), que poderia, em certa medida, aquecer-se e transferir saldo de calor pouco significativo ao aparelho.

Na parte superior do abrigo, também havia cenário técnico não muito interessante, visto que a telha de amianto estava distante do revestimento do equipamento em apenas 80 cm. Esperava-se, porém, que a boa condição de

advecção do ar contribuísse para a dissipação do calor gerado pelos materiais próximos, situação que será discutida no capítulo de resultados.

Nas redondezas da miniestação meteorológica foram observadas construções de alvenaria, em sua maioria sem reboco, além de arbustos localizados em quintais. O acesso ao equipamento é restrito aos moradores da residência, visto que há beco com significativa profundidade separando-a da residência vizinha. A Figura 22 ilustra as características de instalação descritas.

Figura 22. Local de instalação da Unidade Amostral 1, na Pedreira Prado Lopes.

Fonte: Autoria própria, 2022.

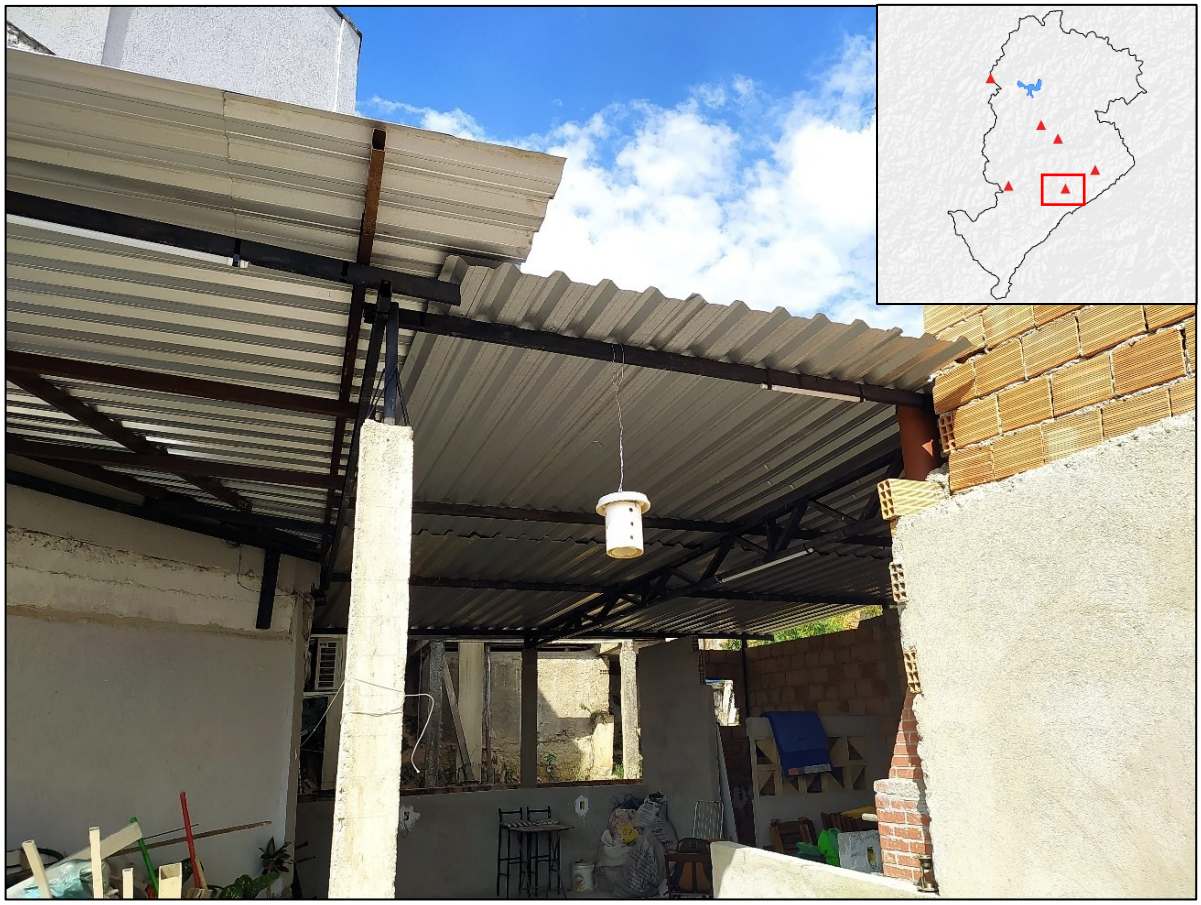
O aparelho sensor da Unidade Amostral 2 foi instalado no núcleo da comunidade do Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia), em contexto topográfico mais próximo ao topo de morro. Esteve afixado em laje de residência domiciliar de três pavimentos, à altitude de 1014 metros, voltada para noroeste. Localizava-se na rua São Sebastião, nº 135.

Foi o local de disposição dos equipamentos com maior elevação altimétrica dentre todas as Unidades Amostrais da pesquisa, experimentando significativa condição de advecção de ar, potencialmente associada aos padrões de circulação de ventos organizados entre o vale onde se encontra a Barragem Santa Lúcia e o interflúvio.

Diferentemente do local de instalação da Pedreira Prado Lopes, a porção superior do abrigo se encontrava distante da cobertura parcial metálica da laje em 1,30 metros, enquanto do chão a distância era superior a 2 metros. O solo era integralmente revestido por cimento e não havia obstáculos laterais em distância inferior a 1,50 metros.

A parte frontal ao local onde o abrigo foi instalado era totalmente desobstruída e recebia incidência de radiação solar direta pela maior parte do dia. No entorno da miniestação meteorológica há residências vizinhas de até quatro pavimentos, cujas massas edificadas se encontram mais altas em relação à laje onde foi disposto o abrigo. Destaca-se a pouquíssima presença de espécies vegetais no entorno, situação que pode ser verificada, assim como as demais características destacadas, na Figura 23 a seguir.

Figura 23. Local de instalação da Unidade Amostral 2, no Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia).



Fonte: Autoria própria, 2022.

A miniestação meteorológica da Unidade Amostral 3 foi disposta no núcleo da Vila Novo São Lucas (ou “Favelinha”), pertencente ao conjunto de vilas do Aglomerado da Serra. Está localizada próxima à Vila Cafezal, onde este mesmo pesquisador registrou variações horárias de temperatura do ar de até 8,1°C em relação a outras áreas do Aglomerado, em pesquisas já citadas como de Machado (2013) e Machado & Jardim (2014). O abrigo se encontrava em varanda de residência domiciliar de quatro pavimentos, com piso revestido por cerâmica e cobertura de estrutura metálica, tal como observado no Morro do Papagaio.

A altitude do local de instalação é de 925 metros e está em borda de vertente altamente impermeabilizada. Na vertente oposta, destaca-se a presença de habitações em condições de risco geológico, em morfologia associada à anfiteatro erosivo, com destaque para fragmentos vegetacionais e cicatrizes de movimento de massa.

Pelas condições logísticas de uso e limitação do espaço, o abrigo contendo o sensor *datalogger* foi disposto em situação muito próxima da observada na Pedreira Prado Lopes, estando distante em apenas 70 cm da cobertura metálica parcial e em apenas 15 cm da viga de madeira que dá sustentação ao telhado. Por outro lado, a varanda possuía excelente ventilação natural e estava completamente desobstruída em dois eixos, sendo que o abrigo estava voltado para a posição noroeste. Não havia paredes ou muros em raio inferior a 2,50 metros e a miniestação estava distante do piso em 1,70 metros.

É importante destacar que o acesso à residência onde o equipamento foi instalado se dá única e exclusivamente por meio de beco estreito e ausente de toponímia, que possibilita apenas a passagem de pedestres. Por se tratar de condição comum à parte das vilas e comunidades estudadas, coube também investigar a potencial formação de cânions urbanos em espaços como o citado, a depender do ângulo sazonal de incidência de luz solar, face à disposição do padrão de arranjo viário destacado.

A Figura 24, apresentada a seguir, ilustra as condições do local de disposição da miniestação meteorológica na Vila Novo São Lucas. Na seção de Apêndices da pesquisa se encontram registros fotográficos complementares, que revelam, por exemplo, as características dos becos e vielas de acesso à Unidade Amostral citada.

Figura 24. Local de instalação da Unidade Amostral 3, na Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra).

Fonte: Autoria própria, 2022.

O equipamento sensor da Unidade Amostral 4 foi instalado nas dependências da Associação dos Moradores da Vila Sumaré, no interior da comunidade. Esteve afixado em borda de pequeno telhado de amianto, em quintal relativamente amplo e arejado, com face voltada para norte. Não havia presença de vegetação no espaço e o acesso até a edificação se dá por beco localizado ao final da rua Coronel Ascendino Costa.

O abrigo esteve distante em 90 cm da pequena cobertura de amianto e a 1,80 metros do chão, que, por sua vez, era integralmente revestido por cimento. As paredes laterais que sustentam o telhado estavam a 1,50 metros do abrigo, aproximadamente, enquanto os muros que dividem o quintal se encontravam a pelo menos 5 metros de distância.

Há relativa situação de confinamento nesta Unidade Amostral, não só pela condição geomorfológica depressionária em relação aos bairros de entorno, quanto também pelas habitações que a circundam em todas as direções, que são mais elevadas. Vale destacar, inclusive, que a miniestação meteorológica da Vila Sumaré

é a que se encontra no menor patamar altimétrico dentre as comunidades pesquisadas, a 857 metros de altitude.

Ponto importante a se destacar é que o espaço da Associação dos Moradores foi alvo de reformas durante a segunda etapa dos trabalhos de campo para instalação dos equipamentos meteorológicos, o que inviabilizou a coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar durante o período úmido de 2022/2023. De tal modo, a Vila Sumaré, por impossibilidade logística, foi a única Unidade Amostral da pesquisa que contou apenas com dados empíricos do período hidrológico seco. A Figura 25 apresenta o cenário de instalação observado no primeiro trabalho de campo.

Figura 25. Local de instalação da Unidade Amostral 4, na Vila Sumaré.

Fonte: Autoria própria, ,2022.

A miniestação meteorológica da Unidade Amostral 5 esteve situada no núcleo da comunidade Cabana do Pai Tomás, em quintal de residência domiciliar com relativa situação de confinamento. Isso porque, ainda que tenham sido mantidas

distâncias de pelo menos 1,10 metros das paredes e muros e de 1,80 metros do piso com revestimento cerâmico, as edificações no entorno são dois pavimentos mais altas que a residência onde esteve afixado o abrigo. Dessa forma, mesmo que a miniestação estivesse sem cobertura superior e orientada para norte, a obstrução da luz solar pelas edificações poderia resultar em períodos mais precoces de resfriamento noturno na Cabana do Pai Tomás do que nas demais comunidades, hipótese que poderá ser confirmada no capítulo de análise dos resultados.

O acesso à residência se dá pelo recém alargado e pavimentado “Beco Pai Joaquim”, que passou a possibilitar o tráfego de veículos automotores. Ainda assim, é necessário percorrer pequeno trecho de viela, tal como observado na Vila Novo São Lucas, para acesso ao portão da residência. O local de instalação do equipamento se encontra à altitude de 917 metros e não havia presença de vegetação no interior do espaço. Todo o espaço contava com alvenaria com parcial revestimento em reboco, conforme Figura 26.

Figura 26. Local de instalação da Unidade Amostral 5, na comunidade Cabana do Pai Tomás.

Fonte: Autoria própria, 2022.

De maneira complementar às demais Unidades Amostrais, apresenta-se aquela que figurará como posto de controle para comparação dos dados mensurados nas vilas e comunidades com contextos de ocupação urbana mais próximos do convencional.

Trata-se da Unidade Amostral 6, localizada no bairro Xangrilá, divisa entre o município de Contagem e a regional administrativa da Pampulha, em Belo Horizonte. Esse local foi adicionado à pesquisa por se tratar da residência domiciliar dos pais do pesquisador, de fácil logística e cujo bairro reúne características de uso e ocupação da terra que contrastam com o adensamento de edificações observado nas vilas e comunidades, sobretudo no que se refere à presença de fragmentos vegetacionais e à disposição ordenada do traçado do sistema viário.

A residência se encontra à altitude de 862 metros e em vertente de baixa inclinação. O bairro também foi local de pesquisa climatológica em exercício comparativo de Machado (2012) para verificar variações intraurbanas de temperatura e umidade relativa do ar em Belo Horizonte e imediações.

O abrigo e seu respectivo sensor *datalogger* foram instalados em amplo quintal da residência, localizada à rua Getúlio Oliveira Souza, nº 280. Esteve afixado sob cabo de aço galvanizado, de espessura milimétrica, a 1,80 metros do chão. O local não possuía qualquer tipo de cobertura que obstruísse o abrigo, que se encontrava distante de muros e paredes em mais de 3 metros. O solo era revestido parcialmente por cimento e gramíneas. Em raio de aproximadamente 4 metros havia presença de hortas e arbustos frutíferos, que eram regados pelos proprietários do imóvel sem uso de mangueira ou jato de pressão hídrica.

O local de instalação dos equipamentos recebe luz solar predominantemente do final do período da manhã ao pôr do sol. O cabo de fixação esteve esticado no sentido norte-sul, conforme características ilustradas na Figura 27, apresentada a seguir.

Figura 27. Local de instalação da Unidade Amostral 6, no bairro Xangrilá, Contagem, MG.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Finalmente, em exercício de síntese, o Quadro 03 apresentará as principais características dos locais de instalação das miniestações meteorológicas em campo, além das informações técnicas referentes à estação INMET Pampulha, que também foi utilizada na pesquisa para efeitos comparativos e, ainda, como fonte de dados dos elementos climáticos não mensurados pelos *dataloggers*.

Quadro 03. Principais características dos locais de instalação das miniestações meteorológicas nas Unidades Amostrais da pesquisa.

Unidade Amostral	Longitude	Latitude	Altitude[27]	Orientação do abrigo	Condições locais	Datas de instalação	Datas de retirada	Dias de monitoramento
UA1 – Pedreira Prado Lopes	43°56’57,1’’W	19°54’07,7’’S	900 m	Noroeste	Laje de residência domiciliar de três pavimentos, no interior da comunidade. Solo revestido por cimento. Cobertura de telha de amianto.	29/07/2022 15/01/2023	17/09/2022 09/04/2023	134
UA2 – Morro do Papagaio	43°56’28,8’’W	19°57’04,3’’S	1014 m	Norte	Laje de residência domiciliar de três pavimentos, no interior da comunidade. Solo revestido por cimento. Cobertura metálica.	30/07/2022 22/01/2023	01/10/2022 25/03/2023	125
UA3 – Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra)	43°54’37,8’’W	19°55’57,8’’S	925 m	Noroeste	Varanda de residência domiciliar de quatro pavimentos, no interior da comunidade. Solo revestido por piso cerâmico. Cobertura metálica.	30/07/2022 26/01/2023	01/10/2022 25/03/2023	121
UA4 – Vila Sumaré	43°58’01,5’’W	19°53’19,8’’S	857 m	Norte	Quintal de associação comunitária no interior da comunidade. Solo revestido por cimento. Pequena cobertura de telha de amianto.	02/08/2022 -	28/09/2022 -	57
UA5 – Cabana do Pai Tomás	44°00’02,0’’W	19°56’55,1’’S	917 m	Norte	Quintal de residência domiciliar no interior da comunidade. Solo revestido por piso cerâmico. Sem obstrução por cobertura.	06/08/2022 14/01/2023	24/09/2022 25/03/2023	119
UA6 – Posto de controle bairro Xangrilá	44°01’11,1’’W	19°50’36,3’’S	862 m	Norte	Quintal de residência domiciliar em bairro com ordenamento padrão. Solo revestido parcialmente por horta e cimento. Sem obstrução por cobertura.	03/08/2022 13/01/2023	17/09/2022 25/03/2023	116
UA7 – Posto de controle INMET Pampulha	43°58’8,4”W	19°52’58,8’’S	854 m	Norte	Interior de Unidade de Conservação, com mata preservada. Solo revestido por gramíneas. Estação automática oficial do INMET.	N/A	N/A	N/A[28]

[27] Coordenadas e valores de altitude foram obtidos a partir de aparelho GPS de navegação, portanto, possuem erro médio posicional de ~3 metros.
[28] Dados da estação meteorológica INMET Pampulha estão disponíveis para consulta, em intervalo horário, desde 09/10/2006 (data de início da operação).

3.4 Análise dos dados coletados *in loco*

A avaliação dos dados coletados em intervalo horário pelas miniestações meteorológicas em campo, bem como sua relação com a dinâmica dos sistemas sinóticos e, principalmente, com os fatores de superfície específicos das áreas de estudo, se deu a partir da análise rítmica do clima proposta por Monteiro (1971), tal como conceituado no capítulo inicial da pesquisa e detalhado a seguir.

Em primeiro lugar, os dados obtidos nos dois períodos de monitoramento da pesquisa (seco e úmido) foram descarregados dos sensores registradores no computador do pesquisador, sendo plotados, em seguida, em planilhas eletrônicas em formato Excel. Nesta etapa, também foram aplicados os fatores de correção apresentados nas seções anteriores calculados os parâmetros da estatística descritiva mais usuais à comparação entre as áreas de estudo, como média, mediana, valores máximos e mínimos, amplitude térmica e hígrica diária.

De posse da base de dados organizada, foram construídas pranchetas de análise rítmica, em intervalo horário, contendo gráficos interrelacionados entre si, que expressam o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar de cada vila ou comunidade estudada, com recortes para períodos de interesse pré-estabelecidos em função dos desvios rítmicos experimentados a partir da mudança dos sistemas sinóticos atuantes e dos tipos de tempo originados.

Nas mesmas pranchetas, também foram plotados dados das demais variáveis meteorológicas mensuradas no mesmo período e horário[29] pela estação oficial do INMET de Belo Horizonte (5º DISME), como direção dos ventos, pressão atmosférica, precipitação acumulada e cobertura do céu por nebulosidade, com o objetivo de relacionar os elementos climáticos medidos no interior das vilas e comunidades, com variáveis que refletem características mais associadas às escalas locais/regionais de organização do clima.

A identificação dos sistemas sinóticos atuantes e os tipos de tempo encadeados a partir deles se deu com base na interpretação de imagens de satélites meteorológicos obtidas junto ao Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

[29] Por se tratar de modalidade convencional, a estação INMET Belo Horizonte (5º DISME), somente oferece dados nos horários de 09h ,15h e 21h.

(CPTEC), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e, de maneira complementar, através de cartas sinóticas da Marinha do Brasil. Diariamente, para o período de estudo, foram adquiridas e analisadas as imagens do sistema sensor GOES 16, nos canais espectrais do visível e infravermelho, de modo a identificar os fenômenos de ordem genética e plotar essa informação na prancheta integrada da análise rítmica.

Partiu-se da premissa de que somente com a conjugação dos elementos climáticos obtidos para cada vila ou comunidade, em interrelação com os controles atmosféricos de escala regional, em sucessão rítmica horária e diária, a pesquisa seria capaz de obter parâmetros técnicos que realmente permitissem a avaliação dos diferentes problemas geográficos das áreas de estudo, tal como destaca Ferreira (1996). Isso porque é justamente na identificação dos desvios rítmicos e da resposta distinta que cada espaço investigado dará ao encadeamento dos tipos de tempo, que se poderá diagnosticar clima(s) realmente produzidos no interior das favelas.

Para esses episódios de desvios rítmicos identificados a partir da análise rítmica dos elementos e fatores climáticos interrelacionados, também foi realizada pesquisa na mídia jornalística sobre impactos socioambientais positivos ou negativos que se desdobraram especificamente sobre as populações habitantes das vilas e comunidades em Belo Horizonte, bem como programas, políticas e/ou projetos da Prefeitura Municipal para gestão e enfrentamento.

Buscou-se, com isso, não simplesmente traçar potencial relação causa e efeito, mas compreender de que maneira a repercussão espacial da dinâmica micro ou topoclimática desses espaços afeta o cotidiano dos moradores, que muitas vezes são privados de infraestrutura urbana e de ações do poder público que visem à mitigação de efeitos não desejados. É, portanto, contribuição voltada ao planejamento climático municipal de maneira orientada às vilas, comunidades e populações que habitam esses espaços.

3.5 Sobrevoo com Aeronave Remotamente Pilotada para geração de insumos analíticos

Com o aprimoramento das tecnologias aplicadas aos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) e o advento das Aeronaves Remotamente Tripuladas (RPA), a aerofotogrametria experimentou avanços relevantes nos últimos anos, especialmente no que se refere à aplicação na pesquisa geográfica, conforme revisaram Paz & Sampaio (2019).

Anteriormente baseada em métodos de levantamento dependentes de aeronaves tripuladas, com câmeras fotográficas convencionais acopladas à fuselagem, tem-se vivido nova fase do desenvolvimento técnico-científico nesta seara do conhecimento, em que através de sensores ópticos e digitais embarcados em aeronaves multirotores autônomas de baixo custo relativo, ancoradas por *softwares* de planejamento de voos automatizados, pode-se gerar insumos cartográficos planialtimétricos de altíssima resolução espacial, para avaliação de feições da superfície terrestre em cobertura territorial relativamente extensa.

Tais insumos, quando pós-processados digitalmente através de programas computacionais específicos, permitem a transformação das cenas bidimensionais e estereoscópicas coletadas pelos RPAs, popularmente conhecidos como drones, em produtos georreferenciados, ortorretificados e em terceira dimensão, tais como nuvens de pontos, Modelos Digitais de Elevação (MDE) e ortofotomosaicos.

Isso é possível porque o processamento fotogramétrico digital está assentado sobre modelos matemáticos ou métodos de ajustamento, que são empregados para determinar o centro de perspectiva da aerofoto, isto é, a reconstrução da geometria do feixe perspectivo da posição do plano de imagem em relação ao eixo óptico da câmera fotográfica. Com isso, programas computacionais específicos conseguem simular a “estrutura do movimento paralático”[30] do sistema sensor e detectar pontos homólogos entre duas ou mais aerofotos com sobreposição parcial ou integral, possibilitando o ajustamento do bloco de imagens e seu alinhamento em um modelo

[30] Do inglês, *Structure from Motion* – SfM, definido por Carrivick *et al.* (2016) como uma técnica de levantamento topográfico que surgiu a partir de avanços na visão computacional e na fotogrametria tradicional, a partir da qual podem ser produzidas nuvens de pontos tridimensionais (3D) densas e de alta qualidade de um relevo, com custo financeiro mínimo.

tridimensional representativo do objeto, superfície ou cena imageada, conforme discutem Carrivick *et al*. (2016).

De modo a produzir bases cartográficas que auxiliarão na investigação dos fenômenos estudados nesta pesquisa e, principalmente, prover insumos que foram utilizados como variáveis de indicador sintético para mensurar o nível de antropização climática nas vilas e comunidades[31], a pesquisa também empregou técnicas de aerolevantamento com RPA para geração de dados primários em cada uma das áreas de estudo apresentadas na seção 3.2.

Para operacionalizar esta etapa, foi realizado levantamento aerofotogramétrico sobre as Unidades Amostrais com equipamento multirotor profissional de patrimônio próprio do pesquisador. Trata-se do modelo DJI Phantom 4 Pro, cujas principais características pertinentes à pesquisa estão sintetizadas no Quadro 04.

Quadro 04. Especificações técnicas do RPA multirotor utilizado pesquisa.

Modelo	Tamanho do sensor	Resolução da câmera	Tipo de obturador	Autonomia de voo	Sistemas de Posicionamento por Satélite
DJI Phantom 4 Pro	1'' CMOS[32]	20 megapixels	Mecânico	30 minutos	GPS e GLONASS

Fonte: https://www.dji.com/br/support/product/phantom-4-pro

Atualmente, é um dos modelos de RPA mais utilizados para levantamentos aerofotogramétricos profissionais no Brasil, justamente em virtude das características técnicas apresentadas, sua elevada produtividade e boa relação custo-benefício. Está homologado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e registrado em nome do pesquisador junto à Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC), para uso profissional.

[31] A ser discutido na seção 3.6.
[32] O Complementary Metal Oxide Semicondutor é um dispositivo de carga acoplada presente em câmeras mais robustas, cuja finalidade básica é captar as imagens e transformá-las em sinais passíveis de leitura pelo microprocessador do equipamento.

Figura 28. RPA multirotor modelo DJI Phantom 4 Pro que foi utilizado na pesquisa.

Fonte: Autoria própria, 2022.

Anteriormente à decolagem, contudo, foram realizados procedimentos a em gabinete para garantir que os voos com o RPA fossem executados de acordo com a legislação brasileira em vigor e para que as ortofotos captadas pudessem ser transformadas em produtos com qualidade adequada aos propósitos da pesquisa.

O primeiro procedimento realizado foi a solicitação de uso do espaço aéreo junto ao Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), executado através de sistema de informação do órgão, intitulado Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS). Através dele, operadores e aeronaves são cadastrados previamente e as condições de voo para cada operação são preenchidas e submetidas à análise. Seleciona-se, por exemplo, se o voo é de caráter recreativo ou profissional, define-se as coordenadas geográficas de decolagem e pouso, altitude e raio de voo, janela de horário da operação, entre outras informações de cunho técnico requisitadas pelo DECEA.

Após aprovação da solicitação de voo pelo órgão, é emitido documento oficial que deverá estar em porte do piloto durante toda a operação. Não obstante, a legislação também estabelece a obrigatoriedade de elaboração de documento contendo análise de risco operacional, conforme RBAC-E nº 94 e IS-E nº94-003 da ANAC, em que são avaliadas a probabilidade e a severidade de situações como perda do link de conexão entre RPA e rádio controle, existência de tráfego aéreo local e presença de pessoas não anuentes à operação no entorno do operador. Na seção de Anexos do trabalho pode ser visualizado modelo adotado para elaboração da análise de risco operacional para os voos executados no âmbito das vilas e comunidades da pesquisa.

Nesse sentido, torna-se importante destacar que o pesquisador possui experiência com operação de RPAs dentro do quadro legal e atua profissionalmente com aerolevantamento e geração de produtos cartográficos em empresa de geotecnologias da qual é sócio proprietário[33]. Dessa forma, para os voos realizados no âmbito da presente pesquisa de doutorado foram seguidos os mesmos protocolos corporativos e regimentais em vigor.

Uma vez em posse da documentação necessária, foi realizado o planejamento automatizado dos voos. O modelo Phantom 4 Pro possui sistema de navegação por satélite embarcado, o que possibilita que cada pixel componente das imagens captadas seja referenciado a determinado sistema de coordenadas e receba valores de latitude e longitude.

Esse mesmo sistema é utilizado por aplicativos de empresas terceiras para estabelecer rotas pré-planejadas a serem seguidas pelo RPA durante uma operação, ou seja, isentando a participação manual do operador e tornando o voo totalmente autônomo. Com isso, pode-se definir não somente o percurso aéreo a ser realizado pelo drone, mas a altitude de voo, velocidade e a porcentagem da faixa de sobreposição entre as imagens, variáveis cuja constância e uniformidade são essenciais para geração de produtos cartográficos planialtimétricos de qualidade posteriormente.

[33] Cosmo - Mapeamento Ambiental LTDA (https://www.cosmomapeamento.com.br/).

Para planejamento dos voos automatizados realizados nesta pesquisa foram utilizados os aplicativos para *smartphone* Pix4D Capture e Drone Deploy, cuja distribuição e licença de uso para essa finalidade é gratuita. Conforme pode ser observado na Figura 29, importa-se arquivo vetorial georreferenciado contendo o polígono da área de interesse a ser mapeada, define-se o modelo de RPA a ser utilizado, ponto de início e fim do aerolevantamento e demais características de voo já citadas.

Para padronizar a resolução espacial e acurácia das imagens captadas em voo, bem como garantir maior qualidade aos produtos cartográficos gerados posteriormente, todas as operações da pesquisa foram realizadas a 120 metros de altitude em relação à superfície de decolagem, sobreposição longitudinal entre imagens de 80% e velocidade máxima de voo recomendada pelo aplicativo, conforme boas práticas profissionais. As ortofotos são geradas automaticamente pelo sensor com base nas características citadas e ficam armazenadas no cartão de memória do RPA, para posterior descarregamento em computador.

Figura 29. Planejamento de voo do RPA Phantom 4 Pro, na Vila Sumaré, em exibição no aplicativo Pix4D Capture.

Fonte: Autoria própria, 2023.

Devido à logística de operação em campo, ao contexto de pandemia da Covid-19 e ao tamanho das comunidades, os sobrevoos para levantamento aerofotogramétrico foram realizados em períodos distintos em cada Unidade Amostral da pesquisa, entre os anos de 2022 e 2023, conforme sintetiza o Quadro

05. Especialmente no caso da Cabana do Pai Tomás, a operação precisou ser dividida em dois momentos, com intervalos de seis meses entre um levantamento e outro.

Quadro 05. Período de realização dos levantamentos aerofotogramétricos nas vilas e comunidades estudadas.

Unidade Amostral	Data do sobrevoo
Pedreira Prado Lopes	17/09/2022
Morro do Papagaio	22/01/2023
Vila Novo São Lucas	03/07/2023
Vila Sumaré	02/07/2023
Cabana do Pai Tomás	24/09/2022 25/03/2023

Fonte: Autoria própria, 2023.

De posse das imagens aerolevantadas, partiu-se para a etapa de geração dos produtos cartográficos analíticos que foram empregados na pesquisa. Para tanto, foi utilizada versão de testes de 30 dias do *software* proprietário russo Agisoft Metashape, consolidado no mercado. Apesar de já existir relevante projeto de desenvolvimento colaborativo de *software* livre e de código-aberto para processamento aerofotogramétrico digital derivado de RPA, como o Open Drone Map (ODM)[34], o tempo de processamento obtido em testes realizados com ele, até o período de execução das operações de voo da pesquisa, ainda apresentava desempenho inferior ao programa anteriormente citado, dificultando seu emprego no trabalho.

Do ponto de vista cartográfico, autores como Vacca (2020) e Mattivi *et al.* (2021) avaliaram, respectivamente, a qualidade geométrica e posicional de nuvens de pontos de uma mesma área processadas tanto pelo ODM, quanto pelo Agisoft Metashape, e a eficácia do ODM, em integração com algoritmos do QGIS, para classificação supervisionada e mapeamento de ervas daninhas em áreas agrícolas na Itália. Em ambos os casos, o ODM alcançou os objetivos propostos pelos autores, oferecendo produtos com o rigor técnico esperado.

Por outro lado, em artigo de revisão sobre o conjunto de ferramentas *open-source* disponíveis para captura e processamento de dados aerofotogramétricos em

[34] Mais informações disponíveis em https://www.opendronemap.org/.

aplicações científicas, Pereyra-Irujo *et al*. (2023) também destacaram a alta qualidade dos resultados provenientes do ODM em comparação com soluções proprietárias comumente utilizadas, mas em cenários com condição de iluminação inconsistente ou faixa de sobreposição entre imagens inadequada, os autores destacaram que o ODM ainda poderia apresentar desempenho inferior, devido às limitações nos algoritmos ou na sua otimização.

Vale destacar que, diferentemente do Sistema de Informação Geográfica QGIS, que já possui rede global de colaboradores engajados há mais de uma década, o Open Drone Map ainda é projeto relativamente recente e menos difundido, com relevante potencial para também se tornar solução profissional consolidada no médio ou longo prazo.

Sendo assim, diante das limitações para emprego do ODM, foi adotado fluxo de trabalho no *software* Agisoft Metashape para processar as imagens geradas e construir produtos de interesse da pesquisa, como nuvens de pontos, Modelos Digitais de Superfície (MDS) e ortofotomosaicos. A partir de informações extraídas dos produtos citados, fatores geográficos específicos das vilas e comunidades puderam ser mensurados e avaliados quali-quantitativamente, como o índice de rugosidade da superfície, declividade, situações de obstrução da abóbada celeste por adensamento de construções, condições de sombreamento perene entre moradias e estruturas, dentre outros.

Em linhas gerais, o fluxo de trabalho no *software* elencado se inicia pela importação das imagens aerolevantadas. Em seguida, aplica-se etapa de alinhamento a partir de técnica de fototriangulação, que busca por pixels homólogos entre uma imagem e outra para realizar o ajustamento simultâneo da coleção de cenas digitais capturadas de maneira georreferenciada e ordenada. O processo resulta em uma nuvem de pontos fotogramétricos, que é utilizada nas etapas seguintes.

Nesse momento, há também opção de incorporar pontos de controle coletados por receptor GNSS geodésico em superfície para melhorar a qualidade posicional dos produtos e alcançar erro de deslocamento centimétrico ou milimétrico. Contudo, dada a limitação logística e de disponibilidade de equipamento para uso no interior das Unidades Amostrais, não foram coletados pontos de controle nesta

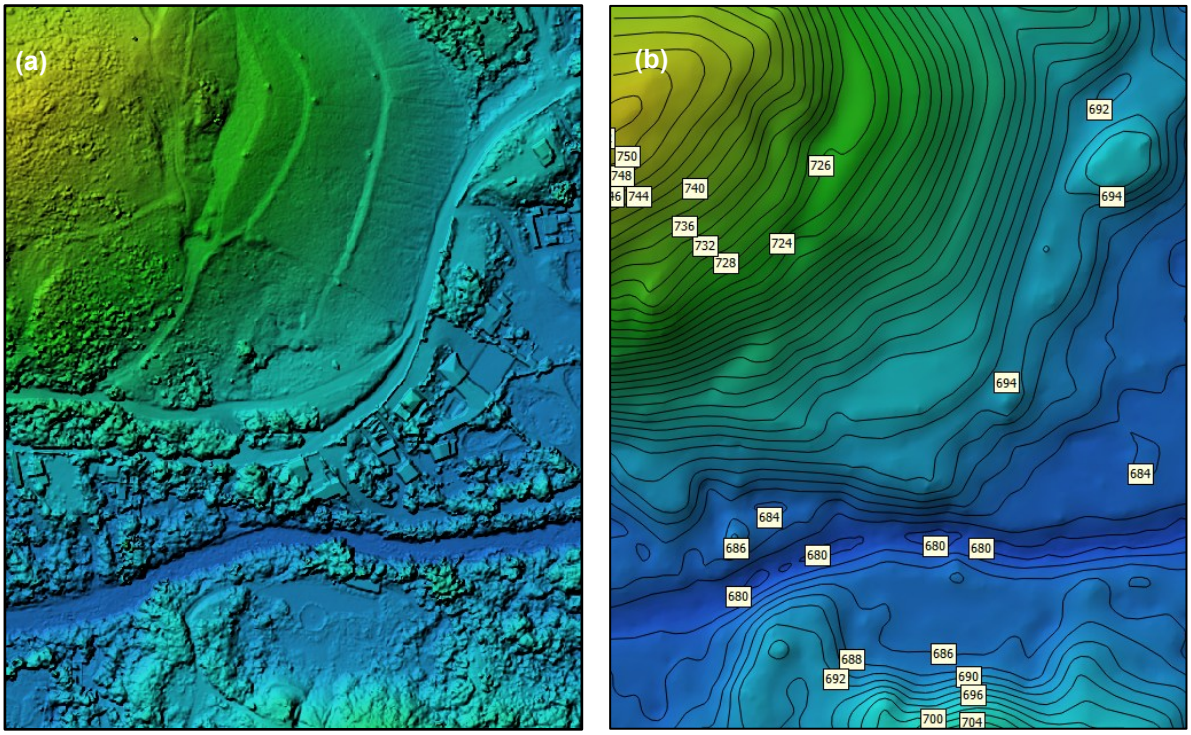
pesquisa, assumindo-se, portanto, a precisão nativa do sistema de navegação do próprio RPA. Independente disso, sobre a nuvem de pontos fotogramétricos também foi aplicada etapa de correção de erros do processamento, com a finalidade de eliminar dados espúrios.

Superadas as etapas anteriores, a nuvem de pontos gerada é então densificada, com a finalidade de preencher espaços vazios e melhorar a representação planialtimétrica do terreno. Diferentemente da topografia convencional, o processamento digital a partir de aerolevantamento com drones pode resultar em mais de um milhão de pontos com informações planialtimétricas para uma determinada área, o que aumenta significativamente a fidelidade dos resultados em relação ao mundo real.

A partir da nuvem de pontos densificada foi realizada etapa de classificação não supervisionada, em que, a partir de parâmetros informados pelo usuário, o *software* categoriza quais feições presentes na nuvem densa se encontram acima do nível do solo e, portanto, não são compatíveis com os acidentes naturais do relevo.

Essa etapa é fundamental para que, em seguida, sejam corretamente gerados o Modelo Digital de Superfície (MDS), que contêm a representação tridimensional de todos os elementos naturais ou artificiais acima do nível do solo, e o Modelo Digital de Terreno (MDT), onde são eliminados tais elementos para alcançar a representação estritamente geomorfológica da área investigada. A Figura 30, apresentada a seguir, elucida a diferença entre os produtos cartográficos citados.

Figura 30. Exemplos de MDS (a) e MDT com curvas de nível (b) gerados pelo pesquisador em testes realizados em área rural.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Também foram gerados os ortofotomosaicos de altíssima resolução espacial de cada Unidade Amostral pesquisada, de modo a apoiar na interpretação das condições de uso e cobertura dos espaços que influenciam na dinâmica climática. Segundo Wolf (1983), uma ortofoto nada mais é do que o produto resultante da transformação de uma foto original em uma imagem onde os deslocamentos devidos à inclinação da câmera em relação ao relevo são eliminados. Ou seja, há a garantia de que os objetos presentes na imagem se encontram em suas posições ortogonais, ou verdadeiras, o que é fundamental para os propósitos da pesquisa.

Cabe destacar que além de subsidiarem esta pesquisa, os produtos primários aqui gerados se encontrarão disponíveis para acesso gratuito e vitalício pela comunidade científica, sociedade civil e órgãos da administração pública municipal, como forma de apoiar o desenvolvimento de políticas urbanas que sejam especialmente voltadas ao bem-estar social das populações que habitam as vilas e comunidades.

3.6 Construção do Índice de Antropização Climática em Favelas

Diferentemente dos esforços de síntese climática tradicionais da escola climatológica brasileira, que estão majoritariamente assentados sob a definição de unidades climáticas naturais e/ou urbanas em uma dada porção do espaço, a partir da avaliação da dinâmica dos seus tipos de tempo em interação com fatores de superfície em diferentes escalas, optou-se, nesta pesquisa, por direcionar o esforço sintético a um diagnóstico de caráter estatístico-comparativo, voltado à construção de índice para identificação do nível de antropização do clima nas vilas e comunidades estudadas.

Busca-se, com isso, construir ferramenta de síntese que possa ser mais diretamente aproveitada por parte do poder público, baseada em observações empíricas e/ou remotamente obtidas a partir de geotecnologias, cujo emprego não seja somente voltado a pesquisas de cunho científico, mas que figure, também, como potencial instrumento de gestão territorial para aplicação em programas, projetos ou políticas públicas.

Em outras palavras, aqui se propõe construir indicador sintético para avaliar, quantitativamente e qualitativamente, a alteração dos elementos climáticos em escala mais aderente ao fenômeno estudado, sendo, portanto, modelado a partir de variáveis únicas obtidas de maneira direta (*in loco*) ou remota e individualizadas para cada Unidade Amostral, conforme métodos detalhados nos capítulos anteriores.

O doravante intitulado Índice de Antropização Climática em Favelas – IACF será produto de matriz de análise multicritério, ponderada, normalizada e composta por 17 variáveis meteorológicas e/ou geográficas apresentadas nas seções a seguir. Seu resultado conterá o ranqueamento das Unidades Amostrais da pesquisa através de pontuações (escores), que expressam o nível de derivação do clima nas escalas inferiores em cada vila ou comunidade.

A priori, para identificar estatisticamente quais as variáveis meteorológicas do indicador sintético que melhor representariam indícios da condição de derivação antrópica dos microclimas e/ou topoclimas entre as cinco Unidades Amostrais, foi implementado modelo estatístico multivariado conhecido como Análise de Componentes Principais (ACP), que será detalhado na seção 3.6.1. Sua importância

para a construção do IACF se dá justamente na capacidade que possui para revelar, de maneira combinada, características latentes aos dados das variáveis empregadas, mensurando o nível de participação de cada uma delas na síntese do grau de alteração do clima nas vilas e comunidades.

Além do potencial analítico destacado, foi com base nos resultados obtidos pela ACP que foram definidos os fatores de ponderação que cada variável de caráter meteorológico ou geográfico recebeu no âmbito da matriz de análise multicritério final do IACF. Aplicou-se maior peso em uma variável quanto maior fosse sua participação na representação da componente principal (componente 1) da ACP.

Apesar de majoritariamente guiado pelos resultados estatísticos, a etapa de definição dos pesos de cada variável no contexto da matriz do IACF também levou em consideração a participação do pesquisador. Não foram adotados métodos clássicos como a Análise Hierárquica de Processos (SAATY, 1980) ou técnicas de maximização de consensos, como a Delphi, que envolveria consulta a diferentes pesquisadores de relevância na temática (MOURA & JANKOWSKI, 2016). Optou-se, porém, por considerar o arcabouço teórico-conceitual do próprio pesquisador, suas experiências obtidas em campo e ao longo da sua trajetória acadêmica e profissional, para realizar análise crítica dos resultados estatísticos e testar diferentes pesos.

A matriz de ranqueamento final do IACF, portanto, nada mais é do que a média ponderada de todas as variáveis meteorológicas e geográficas do modelo, calculadas para o conjunto de vilas e comunidades pesquisadas, cujos resultados estarão normalizados em mesma escala de grandeza (0 a 1). Isso significa que quanto mais elevada a pontuação obtida por uma área de estudo, maior foi a capacidade combinada dos fatores e elementos intrínsecos àquela vila ou comunidade de alterarem o balanço energético nestes espaços, sobretudo no que se refere ao canal termodinâmico de interpretação do clima urbano. É, do ponto de vista estatístico, o espaço cuja dinâmica climática direta ou indiretamente se revelou mais sensível às modificações provocadas pela ação humana naquela escala de organização do clima, sendo alvo preferencial para intervenções de planejamento territorial a nível governamental.

O produto do IACF será expresso na forma de quadro contendo o valor normalizado de cada variável da matriz (linhas) para cada vila ou comunidade pesquisada (colunas). Na linha final estará o resultado do ranqueamento do nível de antropização climática das Unidades Amostrais a partir de seus escores obtidos, dado pela média ponderada de todas as variáveis meteorológicas e geográficas da pesquisa, conforme descrito pela equação 4:

$$IACF = \frac{(Var_1 \times W_1)+(Var_2 \times W_2)+(Var_3 \times W_3)+(Var_n \times W_n)\ldots}{\sum W} \quad (4)$$

Onde:

Var_n = Variáveis do modelo
W_n = Fatores de ponderação (pesos) de cada variável

3.6.1 Implementação da Análise de Componentes Principais

Conforme conceituado por autores como Ringnér (2008), Abdi & Williams (2010), Fávero & Belfiore (2017) e Souto (2017), a ACP é um dos métodos mais comumente empregados em estatística multivariada e tem por finalidade básica transformar, a partir de combinações lineares, um determinado conjunto expressivo de variáveis originais em outro conjunto reduzido de dados, com perda mínima de informação, denominado de componentes principais. Indo além, a ACP objetiva: i) extrair as informações mais importantes de uma tabela de dados; ii) comprimir o conjunto de dados mantendo apenas tais informações importantes; iii) simplificar a descrição do conjunto de dados; e iv) analisar a estrutura das observações e as variáveis.

A técnica, desenvolvida no início do século XX pelo britânico e célebre pioneiro da estatística moderna, Karl Pearson, pode ser utilizada para geração de índices e/ou agrupamentos de indivíduos segundo suas variâncias, ou seja, segundo seu comportamento dentro da população.

Com base nos escores obtidos pela ACP é possível identificar, por exemplo, quais as variáveis de um conjunto massivo de dados de entrada mais representativas para caracterizar determinado fenômeno sob investigação. Como o modelo estatístico resulta em “n” componentes principais (ou fatores) não

correlacionadas entre si, cada qual com diferentes percentuais referentes à capacidade individual de explicarem a variância total do modelo, os resultados obtidos pela ACP trazem características sintéticas específicas.

De maneira ilustrativa, pode-se esperar que a ACP implementada na presente pesquisa resulte em distintas componentes que sintetizem, do ponto de vista estatístico, por exemplo: i) a dinâmica termal das vilas e comunidades a partir de determinado conjunto específico de variáveis; ii) a dinâmica da umidade relativa do ar nos aglomerados com base em conjunto de variáveis distintas ou semelhantes; iii) a alteração no balanço energético das áreas de estudo a partir de variáveis morfológicas do terreno; entre diversas outras possibilidades somente compreendidas a partir da criteriosa avaliação científica dos resultados da ACP.

Para implementação da ACP, os dados de entrada das variáveis do modelo foram importados como planilhas eletrônicas em pacote estatístico desenvolvido pela Universidade Oslo – Noruega, de caráter livre, gratuito e com interface que não requer conhecimento em linguagens de programação, intitulado Past[35]. Nele, foram empregados os dados de entrada das variáveis meteorológicas mensuradas no interior das vilas e comunidades, bem como os dados geográficos remotamente obtidos para as áreas de estudo, conforme especificidades descritas na seção a seguir.

Foi inicialmente calculada a matriz de correlação entre as variáveis originais, com o objetivo de avaliar a existência de relação linear entre elas, ou seja, quanto o comportamento de uma variável original do modelo pode explicar o desempenho das outras.

Em seguida, para o cálculo da ACP propriamente dita, foi implementada solução de fator não-rotacionado[36], de modo a construir, primeiramente, a matriz de

[35] O Paleontological Statistics Software Package (Past) foi desenvolvido originalmente por Hammer *et al.* (2001). Atualmente é mantido pelo Museu de História Natural de Oslo e se encontra na versão 4.17.

[36] Na análise fatorial por Componentes Principais, a técnica de rotação de fatores pode ser aplicada para atingir melhor distinção entre eles, maximizando cargas altas entre componentes e variáveis e minimizando as cargas baixas (MATOS & RODRIGUES, 2019). Há soluções de rotação ortogonais (em que as componentes não são correlacionadas) e oblíquas (em que as componentes são correlacionadas). Para os propósitos complementares da ACP nesta pesquisa, entendeu-se como suficiente não empregar solução rotacionada.

variância total explicada, que revela o nível de participação de cada componente na explicação do modelo. Finalmente, foi gerada a matriz componente, que apresenta o escore de participação de cada variável na síntese daquela determinada componente. A partir da orientação quantitativa dada por esse produto, somada ao arcabouço teórico-conceitual do pesquisador, é que foram definidos os pesos das variáveis na matriz de análise multicritério citada na seção anterior, a partir da qual resultou o Índice de Antropização do Clima em Favelas.

Os escores dos fatores da Análise de Componentes Principais também foram salvos como novas variáveis de entrada, de modo que os coeficientes obtidos fossem utilizados para comparação entre médias das cinco áreas de estudo, revelando em que medida uma determinada vila ou comunidade pôde ser sintetizada por cada uma das componentes obtidas pelo emprego da ACP.

Cabe destacar que os *outputs* da análise implementada no pacote estatístico Past também foram carregados na plataforma livre e de código aberto “R Studio”, que permite a manipulação de dados a partir de bibliotecas baseadas na linguagem de programação R. Isso foi necessário em virtude da baixa disponibilidade de recursos de representação gráfico-visual do Past, cujas opções não satisfizeram aos interesses do pesquisador. Do ponto de vista estatístico, não há diferença entre os resultados obtidos por ambas as plataformas, tendo em vista que o conjunto de variáveis de entrada e os parâmetros da ACP foram os mesmos adotados.

Cabe informar que, previamente à implementação da Análise de Componentes Principais, também foi realizada Análise de Variância – ANOVA entre os dados médios diários de temperatura e umidade relativa do ar coletados no interior das vilas e comunidades nos períodos seco e úmido, de modo a confirmar a existência de diferença significativa, do ponto de vista estatístico, entre os grupos amostrais. Uma vez comprovada a diferença, aplicou-se, ainda, o teste *Least Significant Difference*, ou LSD de Fisher, que, conforme elucida Meier (2006), tem como objetivo determinar exatamente quais das favelas possuem médias dos elementos climáticos significativamente diferentes entre si.

A seguir, serão apresentadas todas as 17 variáveis meteorológicas e geográficas constituintes do modelo de Análise de Componentes Principais da pesquisa e, por consequência, da matriz de análise multicritério final do Índice de

Antropização Climática em Favelas. Foram selecionadas com base nos fenômenos específicos e características agudas mais comuns às áreas de estudo, encontrando-se divididas em eixos temáticos que versam sobre o campo térmico e higrométrico do ar das vilas e comunidades, as características morfológicas e vegetacionais de sua superfície, bem como sobre aspectos socioeconômicos que influenciam direta ou indiretamente na dinâmica do clima urbano na escala de análise da pesquisa.

O conjunto de variáveis do modelo foi empregado em cenários distintos para cálculo da ACP, sendo o primeiro deles a reunião dos elementos meteorológicos mensurados durante os trabalhos de campo com os fatores geográficos remotamente obtidos, o que permitiu avaliar a participação de todas as 17 variáveis no modelo simultaneamente e compreender sua representatividade estatística no que se refere ao fenômeno de antropização climática nas favelas. O segundo cenário visou a implementação de uma ACP simplificada, calcada apenas nas variáveis meteorológicas de campo, com vistas a isolar os dados cuja escala de análise refletisse aspectos mais voltados às escalas topo ou microclimáticas das áreas de estudo, evitando-se vícios associados à resolução espacial de imagens de satélite empregadas e/ou à generalização dos dados de origem secundária.

Com os resultados obtidos em ambos os cenários da ACP, pôde-se reunir evidências quantitativas sólidas do papel que cada variável meteorológica ou geográfica cumpre na explicação do modelo IACF, fornecendo ao pesquisador argumentos para distribuição dos pesos de maneira estatisticamente orientada, sem perder de vista, contudo, os aspectos qualitativos intrínsecos ao fenômeno investigado.

A origem dos dados empregados em cada variável, seu formato de aplicação no modelo, bem como a justificativa técnica para sua inserção estão expostas nos tópicos a seguir.

3.6.2 Variáveis meteorológicas do modelo

Como informado, o primeiro conjunto de variáveis do modelo contempla dados derivados da coleta realizada durante os trabalhos de campo nas vilas e comunidades, entre os períodos seco e úmido. São, portanto, variáveis

eminentemente representativas de elementos climáticos, sobre os quais foi realizada etapa de tratamento estatístico descrita na seção 2.4.

I. Temperatura do ar máxima absoluta: A primeira variável elencada para composição da ACP e, consequentemente, do IACF, será a temperatura do ar máxima absoluta de cada Unidade Amostral, registrada a partir das miniestações meteorológicas instaladas *in loco* durante todo o período de monitoramento. Sua participação no modelo tem como objetivo contabilizar a influência das propriedades físicas dos materiais de revestimento do interior das vilas e comunidades na alteração dos extremos de temperatura da parcela de ar junto ao solo, principalmente em episódios de formação de núcleos de aquecimento.

II. Temperatura do ar mínima absoluta: De maneira semelhante à variável anterior, a temperatura do ar mínima absoluta em cada área de estudo, registrada pelas miniestações meteorológicas durante todo o período de coleta dos dados meteorológicos, também tem sua inclusão no modelo justificada pela necessidade de considerar o papel dos extremos de temperatura como uma resposta da participação dos fatores urbanos intrínsecos às vilas e comunidades. Neste caso específico, espera-se participação ainda maior na configuração do modelo, tendo em vista que os efeitos dos climas eminentemente urbanos se manifestam principalmente sobre o aumento das temperaturas mínimas.

III. Temperatura do ar média do período seco: Esta variável foi incluída no modelo com o objetivo de incorporar a dimensão habitual dos tipos de tempo sobre cada Unidade Amostral durante o período específico de inverno, de modo a considerar a sazonalidade do comportamento da temperatura do ar em seus estados médios. A variável de entrada do modelo será a média aritmética simples de todos os registros de temperatura do ar de cada vila ou comunidade estudada durante o primeiro período de monitoramento.

IV. Temperatura do ar média do período úmido: De maneira oposta à variável anterior, busca-se agora contemplar no indicador sintético os efeitos dos tipos de tempo associados ao período de verão, em que os episódios de instabilidade temporal característicos e atuantes na região em que se insere o município de Belo Horizonte estarão sintetizados no comportamento médio ou habitual da temperatura do ar. Também será adotada média aritmética simples de

todas as temperaturas do ar registradas para cada Unidade Amostral durante a segura coleta de dados meteorológicos.

V. Amplitude térmica diária máxima: Variável incorporada ao modelo com o objetivo de avaliar os efeitos da densidade de construções nas vilas e comunidades no que se refere à capacidade de absorção de radiação de ondas curtas e consequente aquecimento diurno, e à perda de radiação por ondas longas e resfriamento noturno. Os dados de entrada ao modelo para essa variável serão calculados a partir dos registros diários das miniestações meteorológicas instaladas *in loco*, sendo resultado da diferença entre o maior e o menor valor de temperatura do ar registrado em um único dia, para cada Unidade Amostral.

VI. Temperatura de superfície média: De modo a considerar os efeitos de propriedades físicas dos materiais que revestem as vilas e aglomerados na configuração da temperatura de superfície destes espaços, como o albedo, a capacidade calorífica e o calor específico, serão calculadas as médias dos valores de temperatura remotamente estimadas no interior de cada Unidade Amostral. Para evitar a incorporação ao modelo de dados oriundos de episódios temporais individuais, que serão abordados em diálogo com as condições de uso e cobertura da terra em seção específica, foi adotada como variável a temperatura média calculada para toda a série temporal de imagens termais da pesquisa.

VII. Umidade relativa do ar máxima absoluta: Assim como postulado para as variáveis referentes ao campo térmico das vilas e comunidades, a pesquisa também contará com variáveis no modelo que versam sobre o campo higrométrico do ar nestes ambientes. A primeira delas objetiva considerar a participação das condições de supersaturação da atmosfera sobre as Unidades Amostrais, porém, em contrapartida às variáveis anteriormente apresentadas, os valores máximos de umidade relativa do ar registrados em todo o período de coleta serão integrados ao modelo de maneira inversamente proporcional. Isso porque, nas vilas e comunidades, pode-se reduzir consideravelmente o aporte de umidade na atmosfera por evapotranspiração ao substituir a cobertura natural do solo por condições agudas de ocupação. Com isso, espera-se que quão menor for a umidade relativa do ar máxima registrada em cada área de estudo, maior será sua participação na

configuração de micro e/ou topoclimas eminentemente urbanos e associados à ação antrópica direta sobre essas escalas.

VIII. Umidade relativa do ar mínima absoluta: Da mesma forma que a umidade relativa do ar máxima do período, os extremos mínimos de umidade também terão participação inversamente proporcional no modelo, sendo mais decisivos para o aumento do escore do IACF quanto menores forem os valores registrados em cada vila ou comunidade. Neste caso, porém, há de se observar a limitação técnica do aparelho sensor utilizado para mensuração, cuja exatidão de registro desse elemento climático decai em função da diminuição extrema dos valores (em até ~5%), o que pode impactar na sua efetividade enquanto variável do modelo.

IX. Umidade relativa do ar média do período seco: Também considerada no modelo de maneira inversamente proporcional, a umidade relativa do ar média do período seco, assim como visto para as variáveis de temperatura, preocupa-se com os estados habituais do campo higrométrico sob tipos de tempo estáveis, situação característica dos meses de inverno. O formato de entrada no modelo se dará pelo valor da média aritmética simples de todos os registros de umidade relativa do ar na primeira bateria de coleta de dados meteorológicos, para cada Unidade Amostral.

X. Umidade relativa do ar média do período úmido: Com o mesmo propósito elucidado no tópico anterior, busca-se aqui incorporar ao modelo aspectos médios e/ou habituais da dinâmica sazonal da umidade relativa do ar no interior das vilas e comunidades, dessa vez voltados ao período de monitoramento meteorológico durante o verão. O registro a ser incorporado como variável do modelo também será a média aritmética simples de todos os valores de umidade relativa do ar observados, porém, da segunda bateria de coleta de dados meteorológicos.

XI. Amplitude higrométrica diária máxima: Assim como visto na variável referente à amplitude térmica, objetiva-se agora incorporar ao modelo parâmetro que responda pelo contraste higrométrico máximo experimentado por cada Unidade Amostral em um mesmo dia. Tendo em vista as condições agudas de ocupação da terra nas vilas e comunidades da pesquisa, espera-se que quanto maior a amplitude observada, maior será o efeito da antropização da dinâmica higrométrica em escala

micro ou topoclimática. Portanto, essa variável não será considerada de maneira inversamente proporcional como observado nas demais variáveis referentes à umidade relativa do ar. Seu registro de entrada também será a diferença entre o maior e o menor valor do elemento registrado em um único dia.

3.6.3 Variáveis geográficas do modelo

Como destacado na introdução deste subcapítulo, a partir de agora serão apresentadas variáveis geográficas que, apesar de fundamentais para a implementação do IACF, foram trabalhadas no âmbito da ACP em momentos distintos, em virtude da temporalidade dos dados, que não acompanham o registro diário das variáveis meteorológicas apresentadas anteriormente, cujo método de obtenção se deu *in loco*. Tratam-se, portanto, de variáveis remotamente obtidas através de técnicas de processamento digital de imagens e/ou cujos dados são de fontes secundárias.

XII. Cobertura vegetal média: Para estimativa da cobertura de cada vila ou comunidade por feição vegetacional, variável fundamental para a inclusão de fatores edafoclimáticos ao IACF, foi calculado o valor médio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Trata-se de técnica de sensoriamento remoto, desenvolvida por Tucker (1979), com o objetivo de detectar a presença e o vigor físico de uma determinada porção vegetacional em superfície, a partir do contraste observado na resposta espectral dos pigmentos (clorofila) dos alvos nos canais vermelho e infravermelho próximo.

Os resultados do NDVI são expressos em intervalos entre -1 e 1, sendo que quanto mais elevado o valor, maior a presença e a saúde da vegetação em uma dada superfície, enquanto valores negativos ou próximos de zero indicam lâminas d’água, áreas de solo exposto ou área construída. A Figura 31 ilustra o comportamento dos alvos em diferentes intervalos de valores do NDVI.

Figura 31. Esboço esquemático do comportamento de feições vegetacionais analisadas através do NDVI.

Fonte: Adaptado de https://sentera.com/understanding-ndvi-plant-health/.

Cabe destacar que, visando alcançar melhor interpretação e avaliação das condições de cobertura vegetal entre as vilas e comunidades de Belo Horizonte, optou-se, nesta etapa, pela adoção do satélite Sentinel-2, cuja resolução espacial das bandas multiespectrais empregadas para estimativa do NDVI é maior do que as encontradas no satélite Landsat-8 (empregado nas etapas de sensoriamento remoto termal da pesquisa). A partir das bandas B8 (infravermelho próximo) e B4 (vermelho) do Sentinel-2, cujas cenas também foram adquiridas e processadas através da plataforma Google Earth Engine, em extensão territorial que cobre toda a mancha urbana de Belo Horizonte[37], implementou-se a equação (5), proposta pelo autor citado e descrita a seguir:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \qquad (5)$$

Onde:

NIR = Near infrared (banda do infravermelho próximo)
Red = Banda do vermelho

[37] Série temporal de 2015 a 2021, representativa do início da operação do satélite Sentinel-2, ao térmico do período de coleta de dados da pesquisa. Rasters já fornecidos pela USGS ao Google Earth Engine com processamento em primeiro nível, contendo correções radiométricas e geométricas em cada cena.

De posse do raster de NDVI gerado, calculou-se seu valor médio específico no interior de cada Unidade Amostral da pesquisa, de modo a obter panorama geral da presença vegetacional no interior das favelas. Tendo em vista a capacidade física da vegetação de prover vapor d'água à atmosfera por processos metabólicos, como a evapotranspiração, o valor médio do NDVI foi considerado como variável do IACF de maneira inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a presença e a saúde da vegetação em uma vila ou comunidade, menores os efeitos da ação antrópica sobre o clima nas escalas de abordagem da pesquisa.

A Tabela 05, apresentada a seguir, resume as principais características do sistema sensor Sentinel-2, que também foi empregado para cálculo do segundo índice espectral derivado de sensoriamento remoto empregado na construção do indicador da pesquisa, a ser discutido em sequência.

Tabela 05. Características das bandas espectrais do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel-2.

Sensor	Bandas espectrais	Resolução espacial (m)	Resolução espectral (µm)	Resolução radiométrica
Multispectral Instrument (MSI)	B2 (Azul)	10	0,490	12 bits
	B3 (Verde)	10	0,560	
	B4 (Vermelho)	10	0,665	
	B8 (Infravermelho próximo)	10	0,842	
	B5 (Red Edge 1)	20	0,705	
	B6 (Red Edge 2)	20	0,740	
	B7 (Red Edge 3)	20	0,783	
	B8A (Red Edge 4)	20	0,865	
	B11 (SWIR 1)	20	1,610	
	B12 (SWIR 2)	20	2,190	
	B1 (Aerossol)	60	0,443	
	B9 (Vapor d'água)	60	0,940	
	B10 (Cirrus)	60	1,375	

Fonte: Adaptado de The European Space Agency (ESA).

XIII. Cobertura edificada média: De maneira oposta aos resultados obtidos pelo NDVI, o indicador de área edificada nas vilas e comunidades estudadas foi estimado a partir do Índice de Edificação por Diferença Normalizada, do inglês "*Normalized Difference Built-up Index*" (NDBI). Originalmente, foi implementado por Zha *et* al. (2003) e utiliza a razão da diferença entre as bandas espectrais do infravermelho médio e infravermelho próximo, para estimar a densidade de área construída em uma dada porção do espaço. O índice é comumente empregado para

avaliar a evolução espacial de manchas urbanas de metrópoles ao longo de séries temporais e foi utilizado no modelo como variável importante para dimensionar a intensidade de pavimentação de cada uma das Unidades Amostrais e seu potencial de contribuição na alteração do balanço energético desses espaços.

Como visto, a resolução espacial da banda do infravermelho médio (também conhecida como infravermelho de ondas curtas ou, do inglês, *short wave infrared* – SWIR) do satélite Sentinel-2 é de 20 metros, enquanto o infravermelho próximo opera em resolução espacial de 10 metros. Por essa razão, o produto gerado herdou a resolução de menor detalhamento, tendo sido calculado com base na equação (6) apresentada a seguir.

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \qquad (6)$$

Onde:

SWIR = *Short wave infrared* (banda do infravermelho médio ou de ondas curtas)
NIR = *Near infrared* (banda do infravermelho próximo)

Uma vez estimados os valores de NDBI para as Unidades Amostrais, foi calculada a média desse parâmetro para cada uma das vilas e comunidades da pesquisa, com vistas à consideração estatística do comportamento geral da cobertura edificada, tal como realizado por Macarof & Statescu (2017). Em outras palavras, quanto maiores os valores médios do NDBI, maior o grau de antropização micro ou topoclimática dos espaços investigados.

XIV. Razão de área sombreada: Como visto na revisão bibliográfica, um dos fenômenos do clima urbano potencialmente experimentados pelas centralidades das metrópoles é a criação dos cânions urbanos. Diferentemente dos formados entre edificações de grande elevação vertical, nas favelas também poderão ser observadas situações específicas de gênese do fenômeno, em que a proximidade entre blocos edificados e a disposição de becos e vielas favorecerá a redução da iluminação solar sobre a superfície ou mesmo a completa penumbra, especialmente durante o período inverno.

Dessa forma, de modo a considerar tais efeitos no âmbito do IACF, foi gerada carta representativa da simulação de área sombreada pelas edificações das vilas e

comunidades no solstício de inverno, período em que o ângulo de incidência solar se manifesta de maneira menos perpendicular à superfície.

Para tanto, foram empregados os Modelos Digitais de Superfície (MDS) produzidos a partir do processamento aerofotogramétrico das imagens adquiridas pelo RPA sobre as comunidades, além de executado algoritmo do *plugin* para QGIS intitulado *Urban Multiscale Environmental Predictor* - UMEP, que possibilita a simulação do padrão de sombreamento superficial, a partir do fornecimento de variáveis como data, horário[38] e MDS de referência (LINDBERG *et al*., 2018). Quanto maior a área sombreada em cada uma das vilas e comunidades, maior a influência dos efeitos antrópicos sobre a condição de iluminação. Os quantitativos totais de área sombreada foram divididos pela área oficial de cada Unidade Amostral, sendo o produto dessa razão a variável de entrada do modelo IACF.

XV. Rugosidade média da superfície: Com vistas à incorporação no modelo de variável capaz de mensurar, em alguma medida, o papel da rugosidade urbana na alteração dos elementos climáticos em escalas inferiores, adotou-se o emprego do *Terrain Ruggedness Index* (TRI), proposto por Riley *et* al. (1999). Ele é baseado na medida quantitativa da heterogeneidade do terreno, sendo calculado através de rasters representativos de Modelos Digitais de Elevação, em Sistemas de Informação Geográfica, como sendo resultado da diferença de altitude de uma célula (pixel) central e das oito células adjacentes.

Do ponto de vista climático, a influência da rugosidade urbana nos elementos climáticos já foi destacada em capítulos introdutórios da pesquisa, com a observação dos efeitos da ascensão mecânica do ar, em função da morfologia dos bairros Buritis e Estoril e seu papel na alteração de totais pluviométricos (ASSIS, 2009). Também, na capacidade teórica que possui de diminuir a intensidade dos ventos em áreas densamente urbanizadas (FERREIRA, 2017), ainda que a autora tenha associado a rugosidade a outras características da superfície urbana que não somente o relevo.

[38] Como referência para estimativa da área sombreada no *plugin* UMEP, foi adotado o solstício de inverno de 21/06/2021 e o horário local padrão de 12h, compreendido como o ápice da atividade solar diária.

Para incorporação como variável do IACF, a rugosidade baseada no índice TRI foi calculada no QGIS a partir dos Modelos Digitais de Superfície gerados após processamento das imagens provenientes do aerolevantamento com RPA, conforme descrito na seção 3.5. De posse dos rasters referentes ao Índice de Rugosidade do Terreno para cada Unidade Amostral da pesquisa, calculou-se a distribuição média dos valores no interior das áreas de estudo, sendo essa a variável de entrada no modelo.

XVI. Declividade média do terreno: Da mesma forma que a variável anterior, a declividade média do terreno foi calculada em ambiente GIS, com base nos Modelos Digitais de Elevação gerados na etapa de aerolevantamento com RPA sobre as vilas e comunidades. Importante informar que, idealmente, a declividade deve ser calculada a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), que é obtido através da filtragem e eliminação dos elementos acima da superfície nos produtos derivados da nuvem de pontos. No entanto, após processamento aerofotogramétrico digital, os MDTs resultantes não foram considerados satisfatórios, em função da quantidade de ruídos associados às edificações urbanas. Por esse motivo, a declividade foi calculada a partir do Modelo Digital de Superfície (MDS), o que é certamente uma limitação da pesquisa, ainda que os produtos possuam altíssima resolução espacial.

Do ponto de vista climatológico, sua participação no âmbito do IACF almeja considerar o papel da inclinação das vertentes na configuração de padrões de circulação do ar catabáticos e/ou anabáticos, cuja relevância em determinadas porções territoriais de Belo Horizonte e divisa com Nova Lima, onde se encontram o Aglomerado da Serra e a Serra do Curral, por exemplo, foi evidenciada na literatura por autores citados.

XVII. Densidade demográfica: A última variável do modelo se trata de aspecto de ordem socioeconômica. Ao dividir a quantidade populacional de cada vila ou comunidade, obtida oficialmente através da Infraestrutura de Dados Espaciais da Prefeitura de Belo Horizonte, pela sua extensão territorial, têm-se indicador indireto e relativo da participação metabólica humana na alteração de elementos climáticos em microescala. Isso pode ser teoricamente assumido, em função de que quão mais elevada a densidade demográfica em uma dada região, maior a contribuição de ações humanas intrínsecas à dinâmica social na modificação da temperatura ou

umidade, como a queima de materiais em espaços abertos, a modificação ou construção de novas edificações, a impermeabilização do solo, o deslocamento de pessoas a partir de veículos automotores, ainda que a contribuição seja mínima, dentre outras.

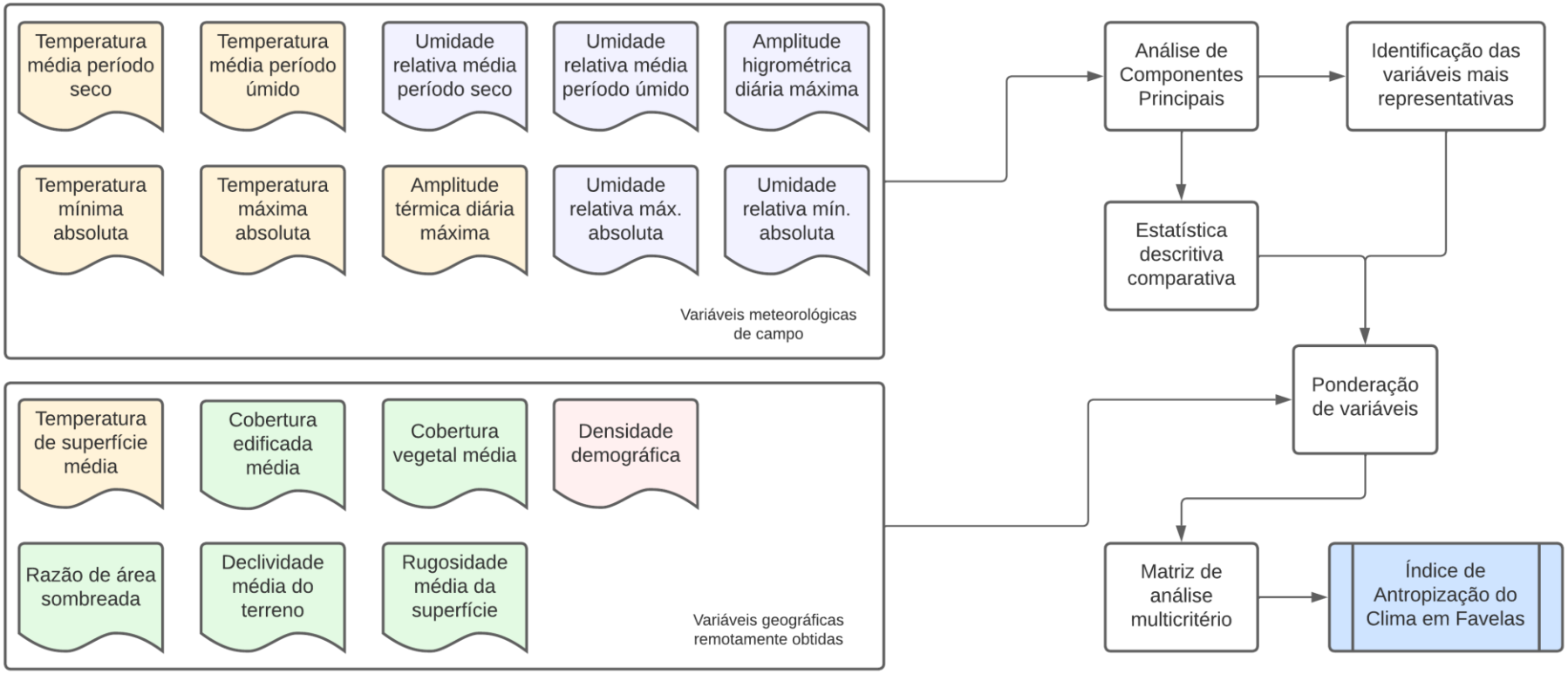
3.6.4 Resumo do modelo

Uma vez apresentadas e discutidas as variáveis que compõem o Índice de Antropização Climática em Favelas, bem como os insumos estatísticos utilizados para sua construção, será apresentado, a seguir, fluxograma-síntese específico dessa etapa da pesquisa, com o objetivo de retomar os aspectos discutidos nos tópicos anteriores e ilustrar, de maneira didática e organizada, os caminhos a serem percorridos para implementação do modelo.

É, portanto, esforço para facilitar a compreensão sistêmica do indicador sintético que a presente pesquisa se propõe a desenvolver, organizando de maneira mais inteligível as variáveis meteorológicas de campo que serão aplicadas no contexto da Análise de Componentes Principais, bem como as de caráter geográfico que complementarão a matriz de análise multicritério que culminará no IACF. A Figura 32 resume o exposto.

Ao final, também foi realizado esforço de representação espacial dos resultados obtidos no cálculo do IACF, extrapolando, ainda que em caráter reconhecidamente exploratório e reducionista, para todas as 218 favelas de Belo Horizonte. Trata-se de tentativa de fornecer visão geral sobre o nível de antropização climática nas demais comunidades urbanas da capital, com vistas à contribuição ao planejamento climático municipal.

Figura 32. Modelo para implementação do Índice de Antropização Climática em Favelas. As cores separam as variáveis de entrada por eixos temáticos, sendo amarelo, representativo do campo térmico; roxo, do campo higrométrico; verde, de aspectos morfológicos e vegetacionais da superfície; e rosa, de indicadores socioeconômicos.



Fonte: Autoria própria, 2022.

CAPÍTULO IV – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conforme apresentado nos capítulos metodológicos da pesquisa, a análise dos resultados se dará a partir da transição entre escalas climáticas, de onde parte-se da interpretação das variáveis obtidas através das técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao campo térmico local de Belo Horizonte, seguindo para a análise rítmica horária e diária dos elementos climáticos mensurados *in loco* e da interpretação da sua relação com fatores geográficos específicos das vilas e comunidades estudadas, organizados em escalas compatíveis com topo e microclimas.

Por fim, a pesquisa culmina na aplicação e avaliação do Índice de Antropização Climática em Favelas, seção em que estarão dispostos os resultados comparativos dos modelos de análise entre as áreas de estudo e onde serão discutidos os principais problemas socioambientais derivados da relação entre clima e paisagem nestes espaços, de modo a contribuir ao planejamento climático municipal. As seções a seguir estarão organizadas em seções temáticas que refletem cada um dos produtos citados, conduzidas pela lógica de integração escalar proposta.

4.1 Distribuição têmporo-espacial da Temperatura de Superfície Terrestre em Belo Horizonte e identificação de núcleos de calor superficiais

A análise do campo térmico superficial de Belo Horizonte, cujos principais resultados foram publicados preliminarmente por este autor em Machado (2021), foi realizada para o recorte temporal de 25/08/2013 a 29/09/2020, correspondendo à completude das imagens termais do sistema sensor Landsat-8, ausentes de nebulosidade, disponíveis até o ano de 2020. Importante ressaltar, novamente, que o horário local de passagem do satélite sobre a área de estudo se dá às 10h, o que influencia nos resultados apresentados a seguir.

Ainda que o principal foco deste esforço científico esteja desdobrado sobre as vilas e comunidades que figuram como Unidades Amostrais da pesquisa, a análise do campo térmico superficial neste momento se preocupou em buscar respostas que dialogassem com a escala local de organização climática. Isto é, a resposta térmica dos modelos empregados revelou características não somente associadas às cinco

vilas e comunidades selecionadas, mas ao conjunto mais amplo e variado de formas de ocupação urbana em Belo Horizonte.

Os resultados gerais revelaram que a maior temperatura de superfície calculada para a capital mineira neste período foi de 43,7°C, tendo sido registrada justamente em 29/09/2020, na última imagem do período trabalhado. Tratou-se de registro em trimestre habitualmente seco em Belo Horizonte, climatologicamente marcado pela imposição de sistemas atmosféricos de alta pressão e por episódios sucessivos de ondas de calor, com potencial repercussão de impactos negativos às populações.

Contudo, não raros foram os registros de temperatura superficial acima de 40°C durante o período de análise, tendo ocorrido oito vezes no total, o que representa aproximadamente 28% das observações[39]. Por outro lado, o que se pôde observar a partir disso é que a localização dos picos de temperatura superficial não necessariamente esteve relacionada às áreas de elevado adensamento populacional e de massa edificada, como as vilas e comunidades. Na verdade, na quase totalidade dos casos, os maiores núcleos de aquecimento superficial estiveram associados aos telhados de grandes estruturas, como galpões de logística e distribuição, centros de exposição, shoppings, entre outros.

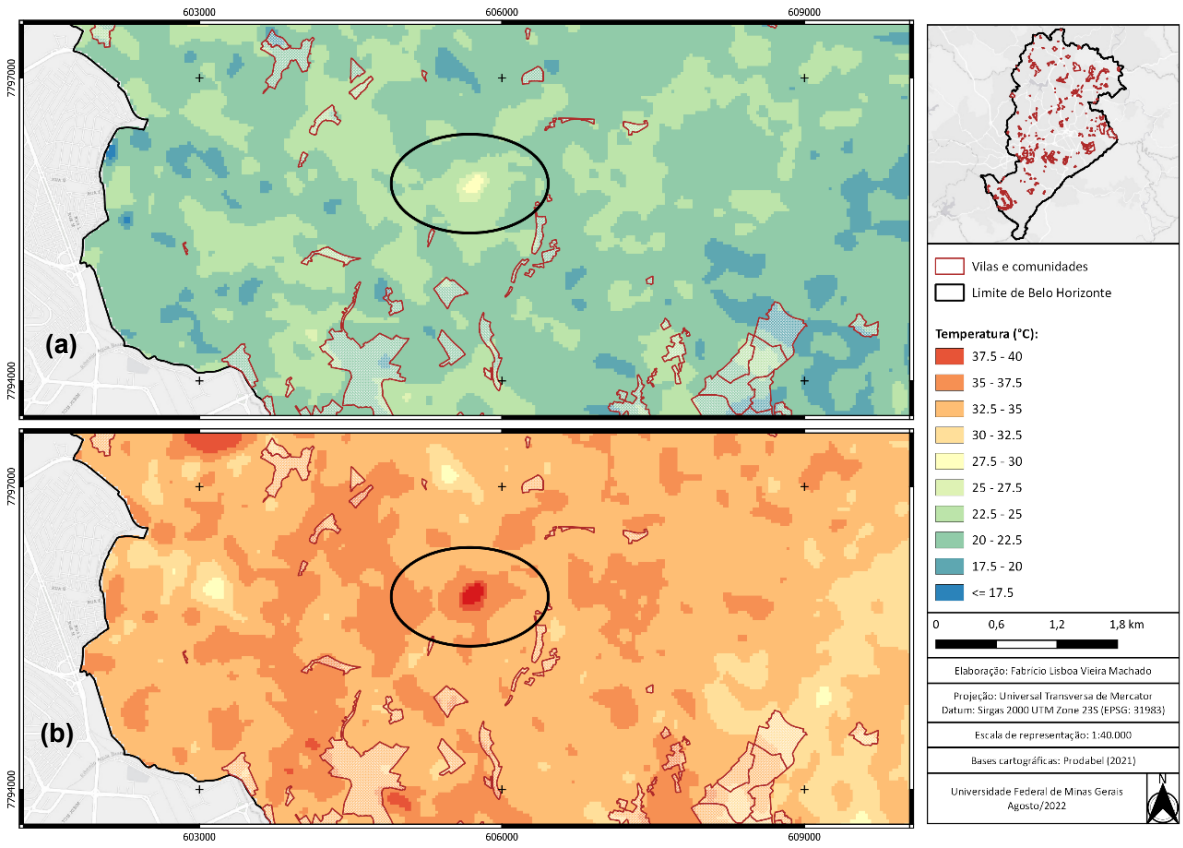
Isso está relacionado às propriedades físicas de materiais que comumente são utilizados para revestimento dessas estruturas, como o zinco e o metalon, conforme identificado durante os trabalhos de campo e por interpretação das imagens do RPA. Nestes dois casos, o calor específico dos materiais é baixíssimo (da ordem de 0,093 cal/g°C, aproximadamente), o que faz com que o aquecimento em função da incidência de radiação solar direta seja veloz e expressivo. Além disso, a espessura dos telhados com esse tipo de material geralmente é muito fina, o que contribui para a propagação do calor para toda a extensão do revestimento, sendo aspecto sensível ao satélite empregado para detecção.

De tal maneira, mesmo em áreas de Belo Horizonte com elevada densidade de edificações no entorno, a presença de grandes estruturas com telhados metálicos

[39] A amostra contou com apenas 29 observações, dadas as já discutidas características de ausência de nebulosidade exigidas para modelagem dos produtos termais.

“atraiu” o pico de temperatura superficial calculada. Cenário interessante de se destacar, neste caso, é o que ocorre em um dos maiores centros de exposição da América Latina, localizado na Região Oeste da capital mineira. O intitulado “Expominas” apresenta dimensões significativas e é revestido por extensa estrutura metálica. Dessa forma, mesmo com a presença da comunidade Cabana do Pai Tomás nas imediações, uma das mais expressivas e populosas de Belo Horizonte, além de Unidade Amostral da pesquisa, os núcleos de aquecimento observados em condições de tempo estável (quente) e pós-frontal (frio) estiveram todos vinculados ao Expominas, conforme pode ser verificado na Figura 33 para os dias 25/06/2014 e 29/09/2020, respectivamente.

Figura 33. Temperatura de superfície (°C) nas vilas e comunidades no entorno do centro de exposição Expominas (destaque), nos dias 25/06/2014 (a) e 29/09/2020 (b).



Fonte: Autoria própria, 2021.

Cabe ressaltar que o dia 25/06/2014 foi, inclusive, detentor da menor temperatura de superfície absoluta calculada no período de análise (14,1°C) e, também, da menor temperatura média (21,3°C) dentre as 29 observações. A despeito da situação pós-frontal observada, não foi registrada precipitação pelas estações meteorológicas de Belo Horizonte neste dia, o que poderia auxiliar na

interpretação dos cenários observados. Tratou-se, portanto, de significativo controle atmosférico imposto por sistema de alta pressão de origem subpolar e da resposta da superfície urbana ao mecanismo.

Outra situação interessante a se destacar é o papel da vegetação na regulação da temperatura de superfície. Mesmo nas vilas e comunidades de maior extensão territorial e adensamento de edificações, as áreas com manutenção de formações vegetacionais, sobretudo de porte arbóreo, como fundos de vale, encostas e cabeceiras, se mostraram sensíveis aos produtos derivados do sistema sensor, mesmo com a limitação da resolução espacial da banda termal do satélite empregado[40]. Isso ocorre majoritariamente nas vilas que compõem o Aglomerado da Serra e no Conjunto Taquaril, onde os fundos de vale vegetados acompanharam a distribuição espacial das temperaturas mínimas de superfície.

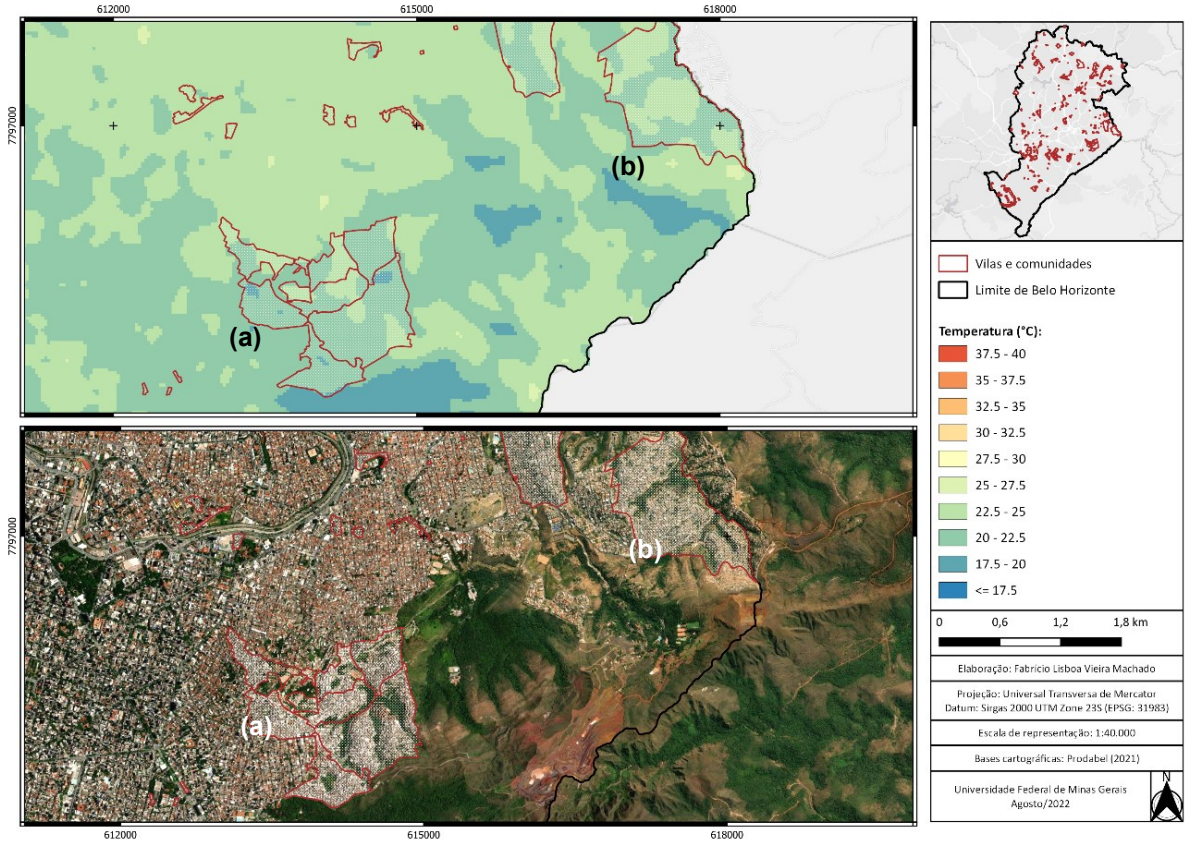
Tais comportamentos podem ser explicados em virtude da maior taxa de manutenção de umidade no solo em áreas cobertas por vegetação, através da participação do dossel no recobrimento do solo, do sistema radicular que contribui para o armazenamento de água e pelo respectivo processo metabólico de evapotranspiração, que cria contextos micro e topoclimáticos específicos. Soma-se aos fatores, ainda, o sombreamento projetado na superfície de entorno pela copa das árvores de maior desenvolvimento vertical, que pode atenuar os registros de temperatura em áreas de borda.

Sobre esse último ponto, porém, ainda é requerida melhor avaliação em ambiente urbano. Os biótopos florestais presentes geralmente são de dimensão reduzida, que não necessariamente formam massa significativa a ponto de atenuar sempre o efeito de borda. A disposição da vegetação, à exceção das Unidades de Conservação municipais, normalmente ocorre na forma de indivíduos isolados (árvores no calçamento), em linha (arborização de canteiro central de avenidas) ou biótopos com indivíduos arbóreos esparsos (praças, por exemplo). Nenhum deles inibe a advecção de ar quente.

[40] Originalmente de 100 metros, mas reamostrada pela USGS para a resolução espacial de 30 metros, que está disponível para processamento na plataforma Google Earth Engine.

Além dos controles expostos, cabe destacar que as comunidades do Aglomerado da Serra e Conjunto Taquaril estão inseridas em unidade climática distinta da grande maioria das vilas de Belo Horizonte, associada aos climas locais do conjunto de serras do Quadrilátero Ferrífero, conforme delimitados por Assis (2010). Nesse caso, tem-se o papel do padrão de circulação dos ventos, condicionado pelo relevo, que contribui para a relativa remoção do saldo de calor sensível em superfície e o transporte horizontal de umidade. A Figura 34 ilustra o cenário discutido.

Figura 34. Distribuição da temperatura de superfície (°C) nas áreas vegetadas do Aglomerado da Serra (a) e Conjunto Taquaril (b) no dia 01/06/2017.



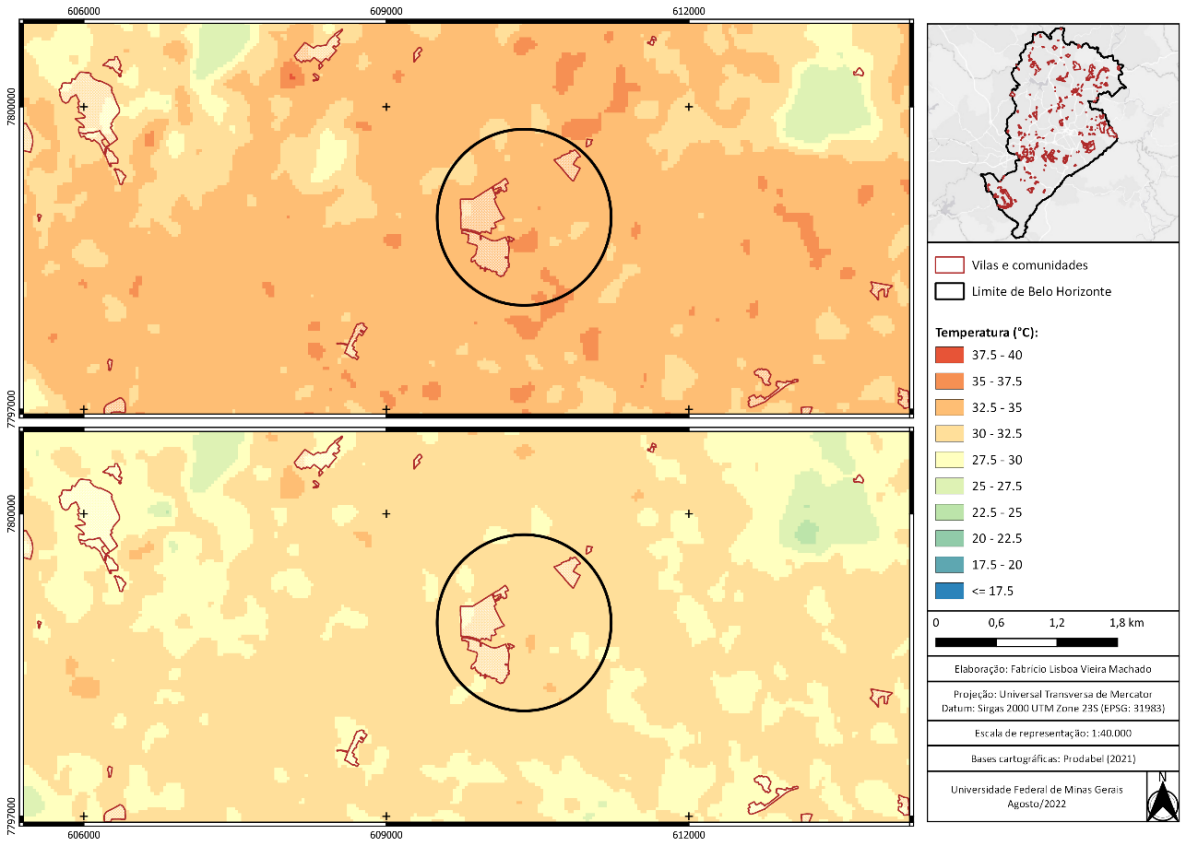
Fonte: Autoria própria, 2021.

É interessante destacar, ainda, as condições de temperatura superficial observadas no entorno de outra Unidade Amostral da pesquisa, a “Pedreira Prado Lopes”, e em comunidades vizinhas, como “Buraco Quente” e “Concórdia”, localizadas na divisa entre as regionais Noroeste e Nordeste. Apesar de densamente edificadas, as vilas citadas dividem espaço com bairros populares que, mesmo possuindo padrão ordenado de arruamento e cobertura por telha cerâmica

colonial na maioria das moradias, também possuem elevada taxa de impermeabilização do solo.

Essa condição foi sensível à média-baixa resolução do sensor termal, cujo resultado do modelo empregado agrupou os espaços citados em faixa de temperatura superficial muito semelhante, como observado nos exemplos datados de 03/01/2015 (verão) e 02/10/2015 (primavera), com temperaturas de superfície oscilando entre 33°C e 30°C, respectivamente (Figura 35). Mesma situação foi observada em vilas da região de Venda Nova, na porção norte do limite administrativo municipal.

Figura 35. Temperatura de superfície (°C) calculada para as vilas “Pedreira Prado Lopes”, “Buraco Quente” e “Concórdia” (destaque) em 03/01/2015 e 02/10/2015, respectivamente.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Também é importante destacar a participação da Lagoa da Pampulha como área onde foi recorrente o registro de temperaturas de superfície mais baixas, devido principalmente ao elevado calor específico do corpo hídrico (da ordem de 1 cal/g°C, aproximadamente) e à extensão territorial de seu espelho d’água (de quase 3 km²), o que torna o processo de aquecimento por radiação solar mais lento do que em

estruturas solidificadas. Vale lembrar, inclusive, que a passagem do satélite Landsat-8 sobre Belo Horizonte se dá às 13h (UTC), período do dia em que o saldo de radiação solar sobre os corpos hídricos ainda é insuficiente para a promoção de grandes elevações de temperatura.

Porém, ainda que recorrente a observação dos menores valores de temperatura superficial no espelho d'água da Lagoa da Pampulha, torna-se importante destacar que isso não pode ser assumido como verdade quando da avaliação da temperatura do ar, em função do transporte de calor por advecção. Isso porque, em pesquisa na cidade de São Paulo, através de métodos remotos de avaliação, Machado & Azevedo (2006) observaram superávit de calor sensível justamente sobre superfícies líquidas, localizadas nas áreas de represas ao sul do município, o que foi explicado como produto da contribuição da variação do fluxo advectivo de áreas próximas, com padrões distintos de uso do solo.

Em Belo Horizonte, Assis (2010) também identificou núcleos de aquecimento em áreas relativamente próximas à massa d'água citada, o que reforça a necessidade de relativizar o papel da Lagoa da Pampulha no arrefecimento da temperatura do ar.

De maneira oposta e de volta à avaliação do campo térmico superficial, cabe destaque à situação observada nas pistas dos aeroportos "Carlos Prates" e "Carlos Drummond de Andrade (Pampulha)", que figuraram como núcleos de aquecimento superficiais mais frequentes no conjunto de observações da pesquisa do que as áreas densamente edificadas das vilas e comunidades. Neste caso, sugere-se que os baixos valores de albedo do asfalto negro e a expressiva extensão linear (de aproximadamente 2,6 km no caso do aeroporto da Pampulha) atuaram como principais fatores responsáveis pelo padrão de aquecimento diferencial da superfície.

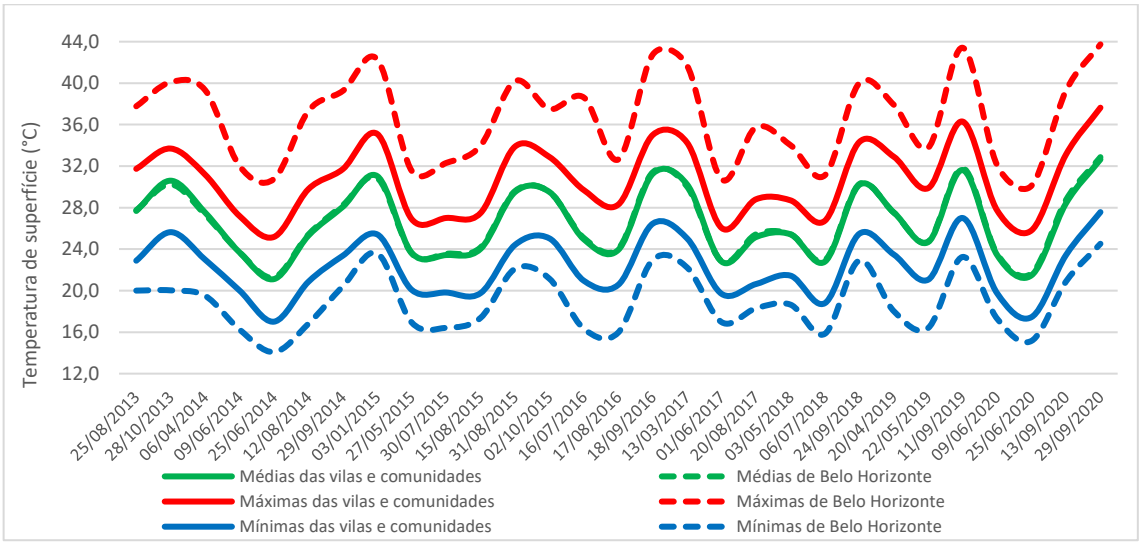
Em resumo, as temperaturas médias de superfície das 218 vilas e comunidades de Belo Horizonte se mostraram praticamente iguais às médias calculadas para a extensão do município como um todo (26,6°C contra 26,7°C, respectivamente). Por outro lado, a média das mínimas e média das máximas calculadas para a extensão completa da capital mineira (19°C e 36,6°C) foram mais contrastantes do que as obtidas nas favelas (22,3°C e 30,7°C). Ambos os cenários

são justificados, acredita-se, pelos diferentes tipos de uso e cobertura da terra encontrados nestes recortes, sobretudo em função da disponibilidade de vegetação em fragmentos muito mais extensos quando se considera a extensão completa do município de Belo Horizonte em comparação com as áreas internas das comunidades.

Além disso, parece haver ritmo médio imposto pelos sistemas atmosféricos predominantemente atuantes ao longo dos anos de análise (ASAS e APAS) e pela intensidade da radiação solar incidente sob perspectiva sazonal, situações que podem ser observadas a partir da variabilidade dos valores da temperatura de superfície média entre os meses de inverno e verão. Nesse sentido, é nítida a prevalência rítmica de temperaturas iguais ou inferiores a 20°C entre junho e agosto, ao passo que os registros térmicos iguais ou superiores a 40°C estão majoritariamente associados ao trimestre de novembro a janeiro.

A Figura 36, a seguir, descreve os comportamentos quantitativos descritos das variáveis ao longo do período de análise e possibilita observar a influência da sazonalidade associada aos controles atmosféricos predominantemente atuantes nos meses de registro. Destaca-se, ainda, a maior amplitude térmica da superfície contínua de Belo Horizonte se comparada àquela específica produzida no âmbito das vilas e comunidades, bem como a similaridade entre as médias calculadas em ambos os contextos espaciais.

Figura 36. Evolução da temperatura de superfície média, mínima e máxima nas vilas e comunidades de Belo Horizonte entre 2013 e 2020.



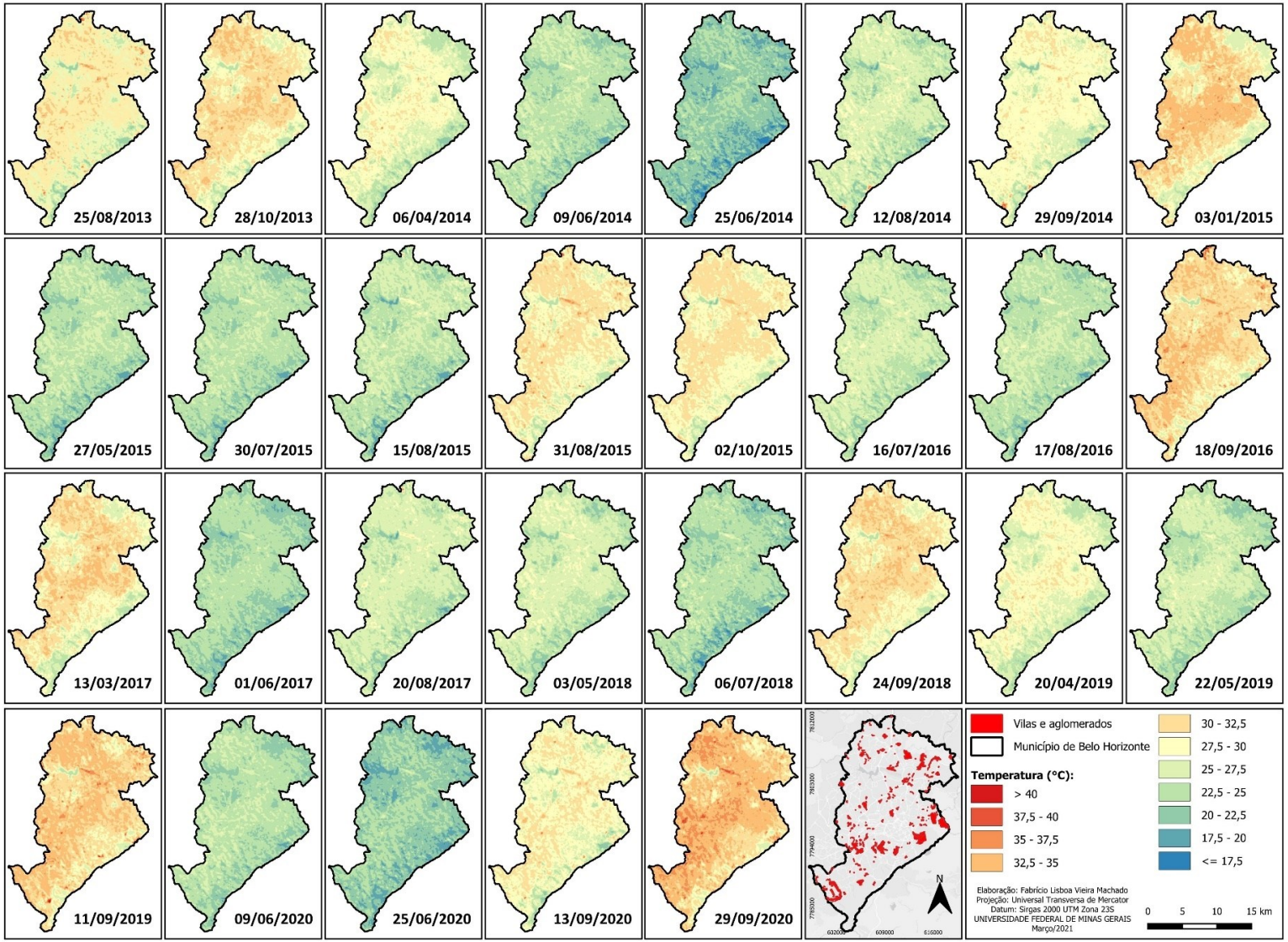
Fonte: Autoria própria, 2020.

O mapa da Figura 37, apresentado a seguir, ilustra a evolução superficial das temperaturas de superfície ao longo de todo o período amostral adotado na pesquisa. Os intervalos contendo as faixas de temperatura, bem como sua semiologia gráfica, são comuns às 29 observações.

O encarte apresentado ao final da série de cartas termais, por sua vez, ilustra a disposição espacial das vilas e comunidades de Belo Horizonte ao longo de seu território político-administrativo, de modo a facilitar a identificação visual de potenciais relações espaciais com os núcleos de aquecimento superficial, sem adentrar, porém, na aplicação de modelos de correlação espacial, como os empregados por Ferreira (2021)[41], que não figuram como objetos centrais para os propósitos da pesquisa aqui conduzida.

[41] Na ocasião, a autora empregou métodos geoestatísticos para avaliar o relacionamento da intensidade da temperatura de superfície (variável dependente) em Belo Horizonte, com o conjunto de variáveis das formas urbanas (explicativas), como o cálculo da autocorrelação espacial (Índice de Moran) e modelos de regressão espacialmente ponderada.

Figura 37. Evolução da temperatura superficial estimada por satélite em Belo Horizonte entre 2013 e 2020.



Fonte: Autoria própria, 2021.

Em esforço de síntese, calculou-se a distribuição média da temperatura de superfície de Belo Horizonte com base nas 29 observações trabalhadas no período de 2013 a 2020, em que se mostrou evidente o direcionamento dos núcleos de calor superficiais pelos grandes galpões e estruturas com cobertura de material metálico, resultado que corrobora com os encontrados pela última autora citada.

Além dos fatores destacados anteriormente, ressalta-se o papel exercido pelos extensos telhados do Centro de Triagem de Cartas e Encomendas dos Correios, na regional Pampulha, e do conjunto de estruturas metálicas da empresa Mannesmann-Vallourec, na regional Barreiro. Também é curioso observar o comportamento do estacionamento da Cidade Administrativa de Minas Gerais, que dadas suas dimensões e o acúmulo de elevado número de veículos, figurou como um dos núcleos de maior aquecimento superficial médio identificados na série temporal da pesquisa. O elevado albedo do material asfáltico de revestimento também é fator relevante a se considerar.

Por outro lado, condição interessante observada em todos os episódios amostrais foi a existência de zonas de baixo aquecimento superficial médio no hipercentro de Belo Horizonte, muito provavelmente formadas pelo sombreamento perene da superfície, gerado pela projeção vertical dos edifícios com elevado número de pavimentos da capital mineira, no horário de passagem do satélite. Em função da baixa resolução espacial do sensor termal do satélite utilizado, condição semelhante, se existente, não pôde ser observada no interior das vilas comunidades.

Os maiores contrastes térmicos médios da superfície observados entre os núcleos de aquecimento e as áreas de entorno foram de aproximadamente 8,7°C, registrado entre a Lagoa da Pampulha e a pista do aeroporto homônimo, e de 8,5°C, entre a cobertura metálica do hipermercado Carrefour Pampulha e a área vegetada do campus da UFMG.

Diferentemente do que se esperava inicialmente pelo pesquisador e ao mesmo tempo refutando umas das hipóteses da pesquisa, conclui-se que nenhuma vila ou comunidade figurou como expressivo núcleo de calor em Belo Horizonte, do ponto de vista do seu aquecimento superficial, entre 2013 e 2020. Essa condição,

porém, não pode ser assumida para a temperatura do ar, mediante as limitações dos métodos e técnicas empregadas para os propósitos específicos dessa seção, que refletem resultados voltados à escala de organização climática local.

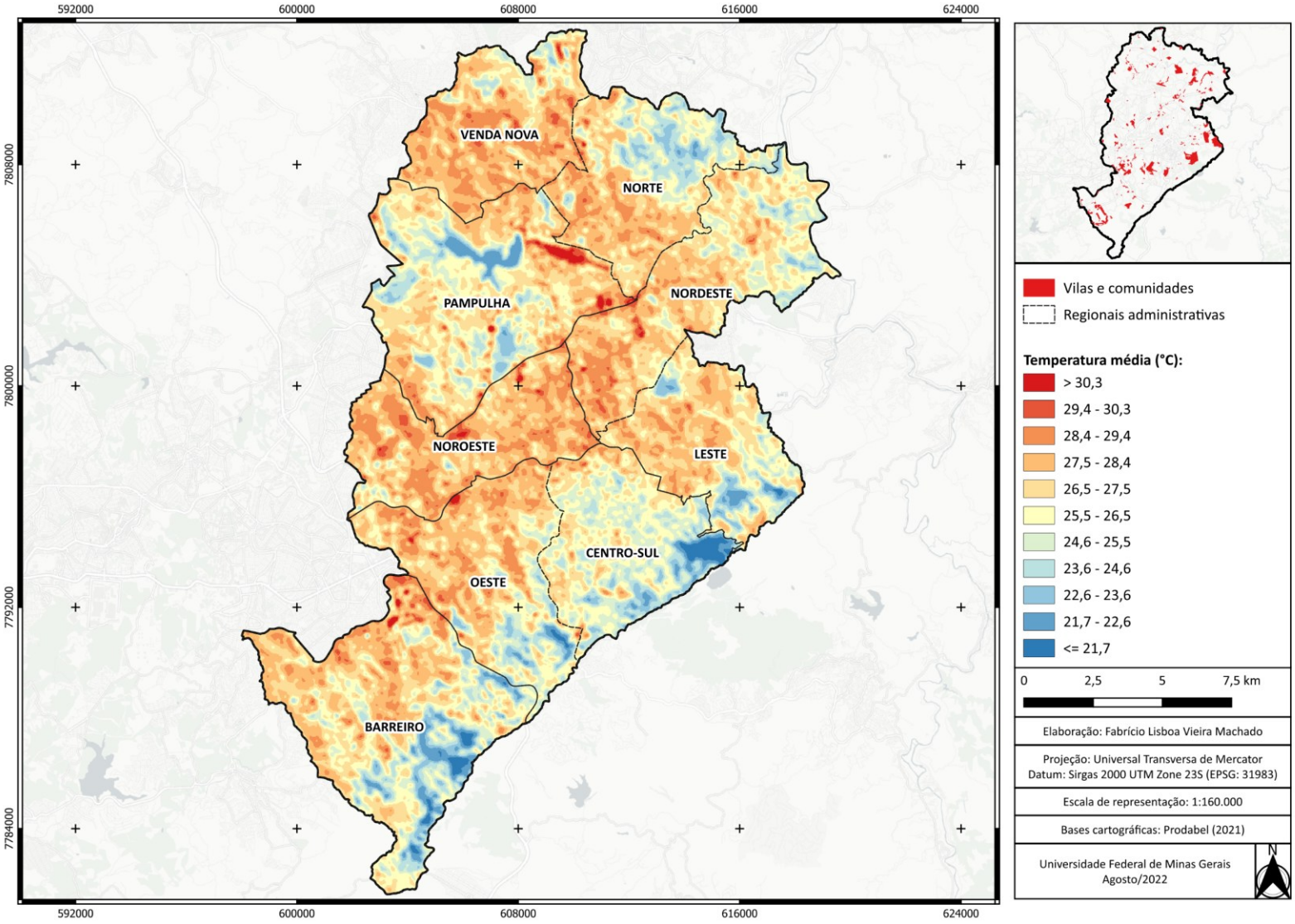
Fica claro, por outro lado, que as propriedades caloríficas dos materiais que revestem os grandes galpões de centros de comércio e lazer induzem a formação de *hotspots* prioritariamente nestes espaços, o que impacta na precisão de resposta do modelo no que se refere à identificação de núcleos térmicos associados exclusivamente à densidade de habitações, como é o caso das vilas e comunidades. Ideal, neste caso, será a condução de exercício que realize prévio processamento digital de imagens para identificação dos galpões por meio de técnicas de classificação, seguido pela geração de máscaras vetoriais compatíveis com as estruturas e a exclusão dos galpões das cartas (rasters) de temperatura superficial de entrada do modelo.

Também é nítido observar a participação dos fragmentos vegetacionais existentes no alinhamento da Serra do Curral, na Regional Pampulha e em porções da Regional Norte (onde está localizada a Mata do Isidoro[42]), como importantes mecanismos reguladores da temperatura superficial média da capital mineira, funcionando como núcleos de arrefecimento térmico. Com isotermas médias oscilando entre 21,7°C e 22,6°C, estão reunidos nestes contextos os espaços verdes associados a Unidades de Conservação em área urbana, como o Jardim Zoológico de Belo Horizonte, a Estação Ecológica da UFMG, o Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG, o Parque das Mangabeiras, a Mata da Baleia, dentre outros.

A Figura 38 revela as características médias da temperatura superficial discutidas para o período observado. Foi utilizado intervalo de distribuição e semiologia gráfica distinta dos demais mapas já apresentados neste capítulo, com o objetivo de permitir melhor identificação das nuances térmicas médias entre as diferentes porções do município de Belo Horizonte.

[42] Expressivo remanescente verde do bioma Cerrado em Belo Horizonte. Também intitulada como “Granja Werneck”.

Figura 38. Distribuição da temperatura média de superfície remotamente estimada para Belo Horizonte entre 2013 e 2020.



Fonte: Autoria própria, 2022.

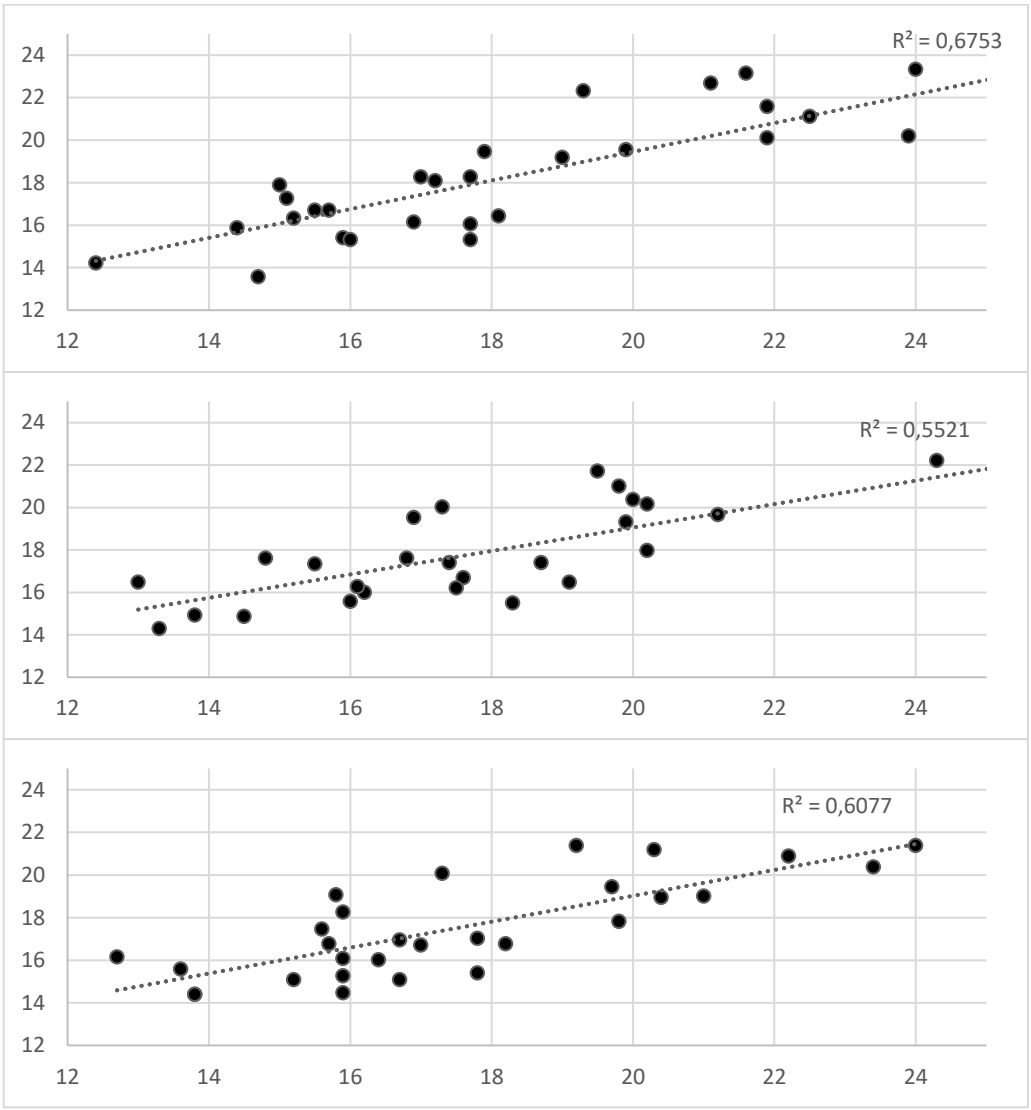
Finalmente, no intuito de validar o modelo empregado a partir de observações empíricas, implementou-se técnica de regressão para verificar a linearidade entre a temperatura do ar (observada) e a temperatura de superfície (estimada) nos locais onde estão instaladas as estações meteorológicas oficiais do INMET Pampulha, Cercadinho e Rola Moça, assumindo que a parcela de ar junto ao solo se aquece por irradiação. Os coeficientes de determinação (R^2) resultantes foram de 0,675, 0,552 e 0,607, respectivamente, sugerindo aproximação razoável entre as medidas.

No caso do desempenho inferior aos demais observado na estação Cercadinho, atribui-se à ocorrência de episódios de incêndios florestais durante a série amostral, que potencialmente influenciaram no campo térmico superficial da área quando do registro pelo sistema sensor. A estação também não conta com as duas primeiras observações, visto que sua data de inauguração se deu em 26/12/2013. Ainda assim, durante o período de oito anos de observação, a temperatura de superfície respondeu, em média, pela variação da temperatura do ar nas estações meteorológicas de Belo Horizonte em quase 62%.

Tomando por base a estação INMET Pampulha, a temperatura média da superfície no pixel correspondente ao posto de observação foi de 25,3°C para o período pesquisado, enquanto a temperatura média do ar foi de 18,3°C. Os maiores desvios positivos observados pela análise dos resíduos da regressão (situação em que a superfície se mostrou mais quente que o ar) foram observados no dia 31/08/2015, sob atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), com tipo de tempo estável e céu claro. Os maiores desvios negativos (em que a superfície foi mais fria que o ar), por outro lado, foram observados em 09/06/2020, sob atuação do mesmo sistema.

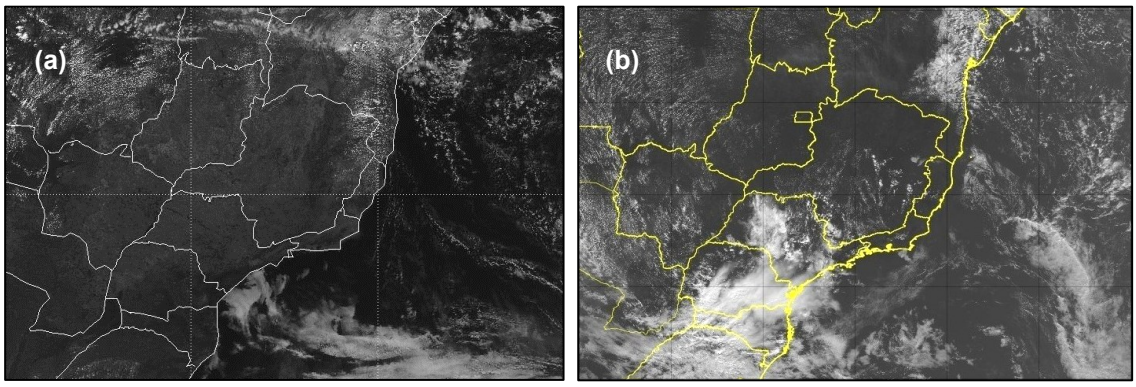
Neste último caso, é importante informar que havia presença de nebulosidade em dissipação em horários anteriores à passagem do satélite sobre a área de estudo (10h), o que pode justificar a condição observada, dado que a superfície tem capacidade de ganhar e perder calor de maneira mais veloz que o ar. A Figura 39 apresenta as retas de regressão calculadas, enquanto a Figura 40 apresenta o cenário atmosférico destacado.

Figura 39. Regressão linear calculada entre a temperatura do ar medida nas estações meteorológicas do INMET Pampulha, Cercadinho e Rola Moça e a temperatura de superfície estimada por satélite nos pixels onde se localizam as estações, entre 2013 e 2020.



Fonte: Autoria própria, 2022.

Figura 40. Imagens dos satélites meteorológicos GOES13 e GOES16 para a América Latina em 31/08/2015 (a) e 09/06/2020 (b).



Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

4.2 Quadro sinótico médio do monitoramento de campo: análise dos dados diários e variação dos tipos de tempo

Uma vez discutidos os resultados da análise do campo térmico superficial das favelas de Belo Horizonte, cabe agora transitar da abordagem climática puramente voltada à avaliação remota das vilas e comunidades de Belo Horizonte, para a análise da interação superfície-atmosfera no interior das Unidades Amostrais selecionadas, lançando mão da apresentação e discussão dos dados de temperatura e umidade relativa do ar coletados em campo durante os períodos hidrologicamente seco e úmido da pesquisa. Para tanto, a presente seção parte, inicialmente, da interpretação dos sistemas atmosféricos atuantes durante os períodos de monitoramento.

Busca-se compreender sua relação com os dados médios diários de temperatura e umidade relativa do ar registrados em cada vila e comunidade estudada e dimensionar a participação dos controles macroescalares na repercussão espacial dos tipos de tempo entre os distintos espaços urbanos, em abordagem de caráter mais descritivo.

Na seção seguinte é que serão discutidos os resultados da dinâmica de variação horária dos elementos climáticos em cada Unidade Amostral, em abordagem compatível com a análise rítmica do clima integrada às diretrizes de interpretação do Sistema Clima Urbano, nas escalas topo e/ou microclimáticas. Na oportunidade serão trabalhados aspectos geográficos da paisagem e propriedades físicas das formas e geometrias urbanas em questão, que contribuem e/ou podem explicar a construção de padrões térmicos e higrométricos específicos nas comunidades.

Para melhor organização dos resultados, esta seção de discussão do quadro sinótico e comportamento médio dos elementos climáticos será dividida em dois tópicos, referentes ao monitoramento de campo no período hidrologicamente seco do ano de 2022 e úmido de 2023, respectivamente.

4.2.1 Período seco de 2022

O primeiro período de monitoramento *in loco* da pesquisa, conforme destacado no capítulo anterior, compreendeu o intervalo do dia 29/07 a 01/10/2022. Entretanto, após etapa de tratamento estatístico e consolidação dos dados, levando em consideração, também, as diferentes datas em que as miniestações meteorológicas foram efetivamente instaladas nas Unidades Amostrais, parte dos dados foram descartados da análise para que o período de referência fosse mantido igualitariamente entre todas as comunidades.

Com isso, estabeleceu-se como intervalo de análise durante o período hidrologicamente seco o recorte do dia 06/08/2022 a 16/09/2022, totalizando 42 dias de monitoramento e tratamento estatístico efetivo.

Por se tratar de período sob forte atuação de controles atmosféricos de alta pressão, tal como discutidos em capítulos anteriores, os tipos de tempo associados foram majoritariamente estáveis, respondendo por 81% do observado. Do início do período de monitoramento ao dia 09/08, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) foi responsável por instaurar condição de bloqueio atmosférico e inibição da formação de nebulosidade, o que favoreceu a entrada de radiação solar de maneira direta e o consequente aumento das temperaturas, principalmente nas Unidades Amostrais Cabana do Pai Tomás e Vila Sumaré, que registraram média diária de 24,8°C e 24,6°C no dia 08/08, respectivamente.

O aquecimento observado também foi desencadeado por situação pré-frontal, oriunda do deslocamento de sistema de baixa pressão para o Estado de Minas Gerais, que promove a compressão adiabática do ASAS e o aumento temporário da temperatura, com consequente diminuição da umidade relativa do ar. Durante a situação atmosférica descrita, a menor média diária do último elemento citado foi registrada novamente na Cabana do Pai Tomás (51,8%), ficando atrás, curiosamente, somente da estação INMET Pampulha, que registrou 49,9%, mesmo em contexto de uso e cobertura da terra teoricamente favorável ao transporte de umidade, questão que será melhor discutida posteriormente.

Com a passagem do sistema frontal, os valores médios diários de temperatura observaram significativa redução, mantendo-se relativamente abaixo

dos 20°C até o dia 15/08, com destaque às menores médias registradas no Morro do Papagaio, da ordem de 17,2°C no dia 11/08. Isso se deve pela atuação do Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul (APAS), que age na retaguarda da Frente Fria e é responsável pela manutenção do tempo estável e frio, tendo em vista suas características originárias das latitudes polares. Por consequência, a umidade relativa do ar experimentou aumento médio diário considerável entre as Unidades Amostrais (até 5,2%) durante a passagem do sistema frontal, alcançando valor de 70,2% no dia 10/08, novamente no Morro do Papagaio.

Porém, com a entrada de radiação solar direta de maneira contínua, o APAS experimentou efeito de tropicalização, dando lugar novamente ao ASAS, que retomou o padrão de variabilidade da temperatura e umidade relativa do ar observado no início do recorte temporal.

No dia 21/08 houve atuação de nova Frente Fria, responsável por quedas abruptas nas temperaturas e aumento proporcional na umidade relativa do ar, justificadas pela instabilidade temporal desencadeada pela ascensão mecânica do ar quente em interação com o ar mais frio e denso do sistema de baixa pressão. É interessante destacar que as únicas Unidades Amostrais que mantiveram valores térmicos médios superiores aos 18°C nessa data foram a Cabana do Pai Tomás e a Vila Sumaré, ambas com 18,1°C. As comunidades Pedreira Prado Lopes, Morro do Papagaio e Vila Novo São Lucas registraram 16,7°C, 15,5°C e 16,3°C. As estações Xangrilá e INMET Pampulha, utilizadas para controle comparativo, igualmente registraram 16,7°C. Foi observada expressiva diferença de umidade relativa do ar nessa data justamente entre a Cabana do Pai Tomás e o Morro do Papagaio, que registraram contraste médio diário de 8,4%, sendo 61,3% para a primeira e 69,7% para a segunda.

A atuação novamente do APAS, após passagem do sistema frontal, foi responsável pela manutenção da baixa variação térmica e higrométrica do ar entre as Unidades Amostrais durante os dias 23 a 26/08, condição que foi reforçada por breve episódio de instabilidade local no dia 27/08. Entretanto, com a dissipação do sistema de baixa pressão e sua substituição pelo ASAS, já em condição pré-frontal, novo pico de temperatura média diária foi registrada em 28/08 em todas as

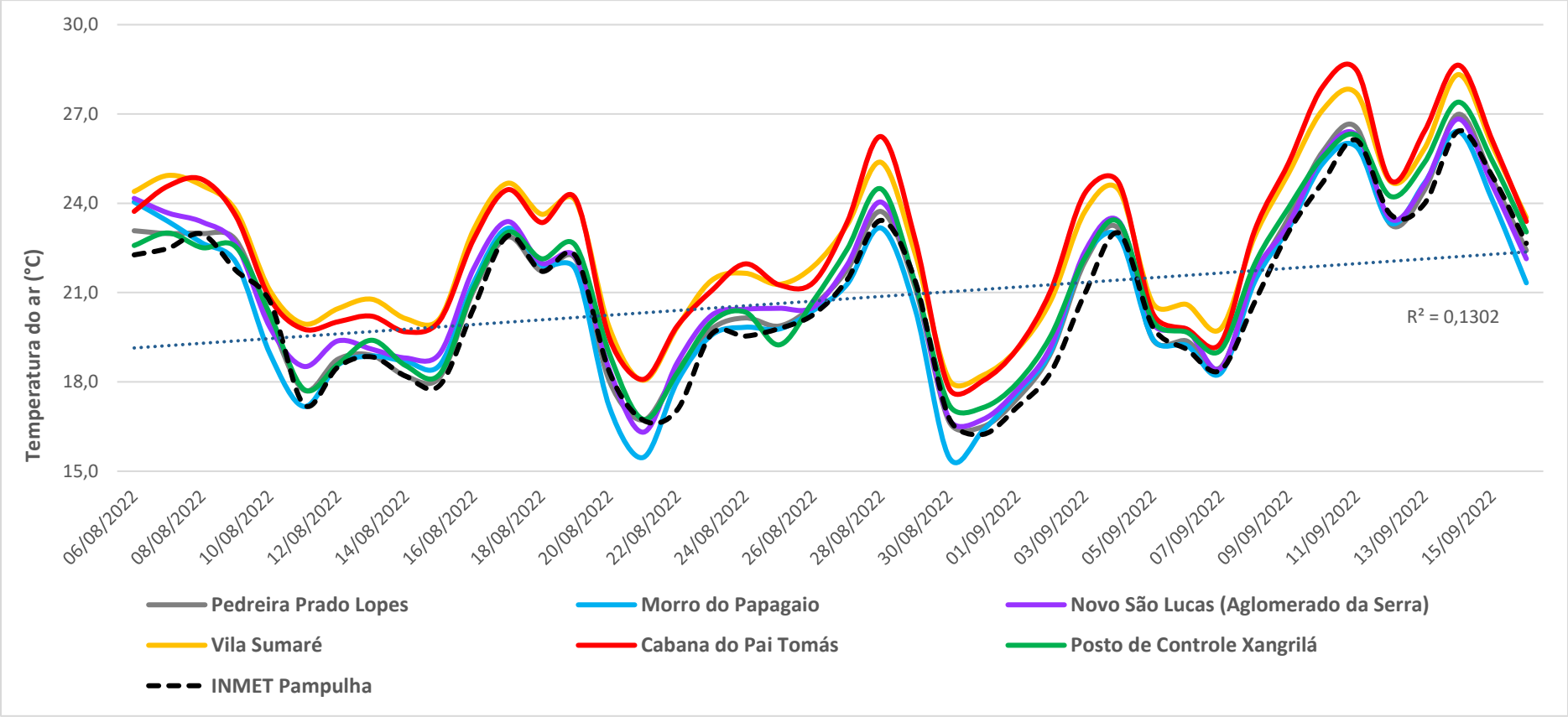
miniestações meteorológicas, com destaque uma vez mais às comunidades Cabana do Pai Tomás e Vila Sumaré, com registros da ordem de 26,2°C e 25,4°C.

Com a chegada da terceira Frente Fria observada no recorte temporal de monitoramento adotado para o período seco da pesquisa, foi registrada queda vertical nos valores de temperatura, especialmente no Morro do Papagaio, Vila Novo São Lucas e estação INMET Pampulha, cujas médias diárias foram de 15,5°C, 16,8°C e 16,8°C, respectivamente. Foi justamente no dia 30/08 que o menor valor absoluto de temperatura de ambos os períodos de monitoramento da pesquisa foi registrado, sendo de 9,5°C no Morro do Papagaio, Unidade Amostral que recorrentemente se mostrou como a detentora dos maiores valores gerais de umidade relativa do ar e menores valores térmicos.

A linha de tendência estimada para a temperatura do ar na estação INMET Pampulha, no período seco da pesquisa, indicou coeficiente de determinação (R^2) de apenas 0,130, o que indica pouca ou nenhuma relação linear de aquecimento durante os 42 dias de monitoramento. Entretanto, a análise do gráfico de distribuição da temperatura média do ar entre as Unidades Amostrais (Figura 41) revela nítida mudança de padrão da temperatura após o mês de setembro/2022, com elevação dos valores de temperatura em todas as miniestações e mudanças abruptas e verticais no padrão da umidade relativa do ar (Figura 42).

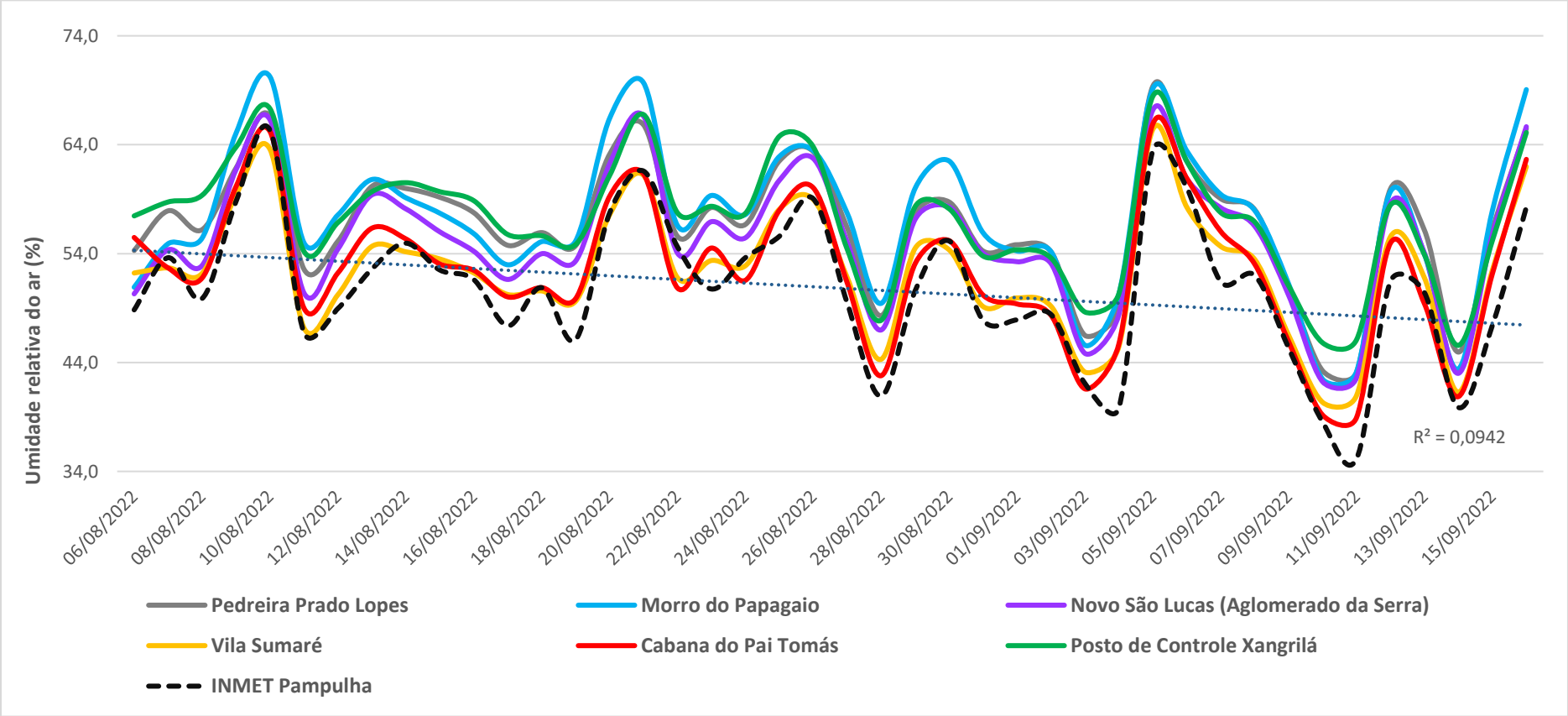
Em relação ao último elemento citado, pode-se destacar os episódios dos dias 04 e 11/09. Na primeira data, a condição de tempo estável e seco, oriunda de nova atuação do ASAS com característica pré-frontal, que era observada até então, foi fortemente substituída pela introdução da quarta Frente Fria registrada no recorte temporal da pesquisa no período seco. O sistema de baixa pressão foi responsável por forte elevação da umidade relativa do ar, que voltou a registrar valores médios diários próximos dos 70%, especialmente no Morro do Papagaio e no posto de controle do bairro Xangrilá.

Figura 41. Variação da temperatura média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período seco de 2022.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 42. Variação da umidade relativa do ar média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período seco de 2022.



Fonte: Autoria própria, 2023.

A forte elevação da umidade relativa do ar, porém, foi acompanhada do aumento abrupto das temperaturas médias nos dias seguintes, que atingiram, na segunda data destacada, os maiores valores médios e máximos absolutos do período seco, sob atuação prolongada do ASAS. Mesmo as Unidades Amostrais da Pedreira Prado Lopes, Vila Novo São Lucas e posto de controle Xangrilá, que não haviam experimentado curvas térmicas superiores aos 24,5°C até então, registraram valores médios acima de 27°C, especialmente no dia 15/09. A Vila Sumaré e a Cabana do Pai Tomás, como observado até aqui, mantiveram a condição de Unidades Amostrais mais quentes do ponto de vista da temperatura média, registrando, respectivamente, 28,3°C e 28,6°C.

Ainda em 11/09, porém, o registro médio mínimo de umidade relativa do ar se deu na estação oficial do INMET Pampulha, ao alcançar 35,2%, contra 39% da Cabana do Pai Tomás. A análise das figuras 39 e 40, anteriormente apresentadas, inclusive permitiu perceber que, apesar de manter padrão de variação diária da temperatura em patamar próximo ou ligeiramente menor do que as Unidades Amostrais localizadas em favelas, a umidade relativa do ar média diária na estação INMET Pampulha foi sempre menor do que em qualquer outra área de estudo.

Isso pode estar relacionado a questões envolvendo o ajuste estatístico dos dados coletados pelo *datalogger*, que podem ter superestimado seus valores de umidade[43], ou mesmo a fatores topo e microclimáticos próprios do ambiente onde está instalada a estação INMET Pampulha. Dentre eles, destacam-se a baixa disponibilidade de água no solo para evapotranspiração no período seco, ineficiência da cobertura gramínea no aumento do saldo de umidade, remoção de umidade pela condição topográfica, incêndio florestal, entre outras causas passíveis de investigação em pesquisa específica.

Sobre o papel da vegetação, autores como Jardim & Galvani (2022), em exercício no Parque Nacional da Serra do Cipó, inclusive avaliaram que, à exceção das matas ciliares, as fitofisionomias da região não necessariamente possuem

[43] Apesar da suposição, os coeficientes aditivos/subtrativos utilizados para ajuste dos dados coletados pelos *dataloggers* promoveram, à exceção dos horários das 06h às 13h, a redução geral dos valores brutos de umidade relativa do ar em comparação com as estações INMET utilizadas, o que chama atenção para questões de ordem microclimática envolvendo a estação INMET Pampulha. Ver tabela 04.

relação direta com o resfriamento de ambientes e o aumento do saldo de umidade, pelo menos não quando avaliadas de maneira desconjugada dos demais fatores que configuram a paisagem e o sistema climático local.

Vale destacar, ainda, que a situação observada entre a variação da umidade média diária na estação INMET Pampulha e as demais Unidades Amostrais da pesquisa vai ao encontro daquilo que não é regular ou esperado, ou seja, o que em geral é considerado como ruído, mas que está amplamente presente nesse tipo de interação, principalmente se tratando de sistemas ambientais complexos, como o climático. Contudo, a discussão inicial aqui proposta se aterá aos mecanismos atmosféricos que foram responsáveis pela gênese dos tipos de tempo e pela resposta dos elementos em superfície, principalmente nas vilas e comunidades, que são o alvo primordial da pesquisa.

Isso posto, cabe ainda destacar que o recorte temporal de monitoramento no período seco foi finalizado com nova introdução de sistema frontal, que resultou em considerável aumento nos valores médios de umidade relativa do ar no Morro do Papagaio (69,1%) e na Vila Novo São Lucas (65,7%), verificados no dia 16/09. No total, sistemas de baixa pressão, desencadeadores de tipos de tempo instáveis, foram responsáveis pelo condicionamento sinótico de oito dos 42 dias de monitoramento no período seco da pesquisa, o que correspondeu a 19% das observações. A Figura 43 revela o encadeamento sequencial dos sistemas atuantes no recorte temporal.

Por fim, dada a atuação majoritária dos sistemas anticiclonais de inverno, que foram responsáveis por inibir a formação de nebulosidade, assegurar a entrada de radiação solar direta no período diurno e a perda de energia por ondas longas no período noturno, verificou-se preponderância de padrão sazonal comum de aquecimento e resfriamento. Com isso, foram registradas amplitudes térmicas média diárias da ordem de ~12°C na maioria das comunidades, com exceção da Pedreira Prado Lopes (10,5°C) e Cabana do Pai Tomás (10,9°C), conforme apresentados na Tabela 06, que traz a síntese dos valores gerais registrados no período seco.

Figura 43. Encadeamento dos sistemas atmosféricos e tipos de tempo atuantes sobre Belo Horizonte no período seco de 2022.

Semana	Sistemas atmosféricos predominantes						
	Domingo	**Segunda**	**Terça**	**Quarta**	**Quinta**	**Sexta**	**Sábado**
31/07 a 06/08	-	-	-	-	-	-	ASAS
07 a 13/08	ASAS	ASAS Pré-frontal	ASAS Pré-frontal	FPA	APAS	APAS	APAS
14 a 20/08	APAS Tropicalização	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS Pré-frontal
21 a 27/08	FPA	APAS	APAS	APAS Tropicalização	IL	ASAS	ASAS
28/08 a 03/09	IL	ASAS Pré-frontal	FPA	APAS	APAS Tropicalização	ASAS	ASAS
04 a 10/09	ASAS Pré-frontal	FPA	FPA Dissipação	APAS Tropicalização	ASAS	ASAS	ASAS
11 a 17/09	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS Pré-frontal	FPA	-

Legenda	
	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul - ASAS: Tipo de tempo predominantemente estável, quente e seco
	Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul - APAS: Tipo de tempo predominantemente estável, frio e seco
	Instabilidade Local - IL: Tipo de tempo relativamente instável, quente e úmido
	Frente Polar Atlântica - FPA: Tipo de tempo predominantemente instável, frio e úmido

Fonte: Autoria própria, 2023.

Tabela 06. Resumo quantitativo das variáveis climáticas mensuradas nas Unidades Amostrais da pesquisa durante o período seco de 2022.

Variáveis climáticas	UA1 - Pedreira Prado Lopes	UA2 - Morro do Papagaio	UA3 - Vila Novo São Lucas	UA4 - Vila Sumaré	UA5 - Cabana do Pai Tomás	UA6 - Posto de controle Xangrilá
Temperatura média global (°C)	21,0	20,8	21,3	22,5	22,5	21,3
Umidade média global (%)	56,7	57,2	55,3	52,4	52,6	57,1
Temp. máxima absoluta (°C)	34,1	33,5	36,0	34,8	35,5	36,4
Temp. mínima absoluta (°C)	11,5	9,5	10,9	11,9	12,2	9,2
Umid. máxima absoluta (%)	81,1	81,7	80,8	78,2	77,4	85,6
Umid. mínima absoluta (%)	21,4	22,1	19,4	17,9	20,5	17,4
Temp. máxima média (°C)	26,9	27,7	28,8	28,7	28,1	29,3
Temp.mínima média (°C)	16,4	15,2	16,2	16,8	17,2	14,8
Umid. máxima média (%)	72,6	73,2	71,8	70,7	69,5	77,7
Umid. mínima média (%)	37,8	36,7	33,9	33,3	35,7	33,4
Amplitude térmica média (°C)	10,5	12,6	12,5	12,0	10,9	14,5
Amplitude hígrica média (%)	34,9	36,6	37,9	37,5	33,8	44,4

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.2.2 Período úmido de 2023

O intervalo de monitoramento em campo durante o período hidrologicamente úmido compreendeu os dias 13/01 a 09/04/2023. Entretanto, devido às distintas datas em que, do ponto de vista logístico, as miniestações meteorológicas puderam ser instaladas e retiradas nas comunidades da pesquisa, adotou-se como recorte temporal de análise o intervalo de 27/01 a 24/03, totalizando 57 dias efetivos.

Apesar de, assim como observado no período seco, o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) figurar como sistema atmosférico mais recorrente nesse intervalo de monitoramento, sua frequência de participação na definição de tipos de tempo foi 13% menor, respondendo por 68% do total de observações. Os outros 32% se referiram a sistemas de baixa pressão, incluindo os de natureza mais energética, como as Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) e do Atlântico Sul (ZCAS), responsáveis pela imposição de tipos de tempo eminentemente instáveis e com registro de precipitação.

Como revela a Figura 44, o intervalo de monitoramento tem início com a atuação da Frente Polar Atlântica, responsável pela manutenção da temperatura média diária próxima aos 22~23°C em todas as Unidades Amostrais, especialmente no dia 30/01, quando evoluiu para uma ZCOU. A umidade relativa do ar média, por sua vez, registrou nessa data valores de até 83,5% na estação INMET Pampulha e de 82,9% no posto de controle do Xangrilá. Dentre as vilas e comunidades, o menor registro médio foi observado na Vila Novo São Lucas, ainda assim com valor da ordem de 77,4%, o que corresponde, por exemplo, ao registro máximo absoluto observado na Cabana do Pai Tomás durante o monitoramento do período seco.

Vale reforçar que, devido às questões expostas no capítulo metodológico, a miniestação meteorológica não pôde ser instalada na Unidade Amostral Vila Sumaré durante o período úmido, o que certamente prejudicou a compreensão da interação superfície-atmosfera nesse espaço, tendo em vista, que junto da Cabana do Pai Tomás, foi a área de estudo que experimentou os menores valores médios de temperatura e maiores valores médios de umidade relativa do ar durante o período seco.

Figura 44. Encadeamento dos sistemas atmosféricos e tipos de tempo atuantes sobre Belo Horizonte no período úmido de 2023.

Semana	Sistemas atmosféricos predominantes						
	Domingo	**Segunda**	**Terça**	**Quarta**	**Quinta**	**Sexta**	**Sábado**
22 a 28/01	-	-	-	-	-	FPA Dissipação	ASAS
29/01 a 04/02	ZCOU	ZCOU	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS
05 a 11/02	ASAS	FPA	FPA Estacionária	FPA Estacionária	LI	ASAS	ASAS Pré-frontal
12 a 18/02	FPA	ZCOU	ZCAS	ASAS	FPA Dissipação	ASAS	ZCOU
19 a 25/02	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS
26/02 a 04/03	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS
05 a 11/03	ASAS	ASAS Pré-frontal	ZCOU	ZCOU	ASAS	ASAS	ASAS Pré-frontal
12 a 18/03	ZCAS	ZCOU	ZCOU	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS
19 a 25/02	ASAS	IL	ASAS	ASAS	ASAS	ASAS	-

Legenda	
	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul - ASAS: Tipo de tempo predominantemente estável, quente e seco
	Instabilidade Local - IL: Tipo de tempo relativamente instável, quente e úmido
	Linha de Instabilidade - LI: Tipo de tempo predominantemente instável, quente e úmido
	Frente Polar Atlântica - FPA: Tipo de tempo predominantemente instável, frio e úmido
	Zona de Convergência de Umidade - ZCOU: Tipo de tempo predominantemente instável, quente e superúmido
	Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS: Tipo de tempo predominantemente instável, quente e superúmido

Fonte: Autoria própria, 2023.

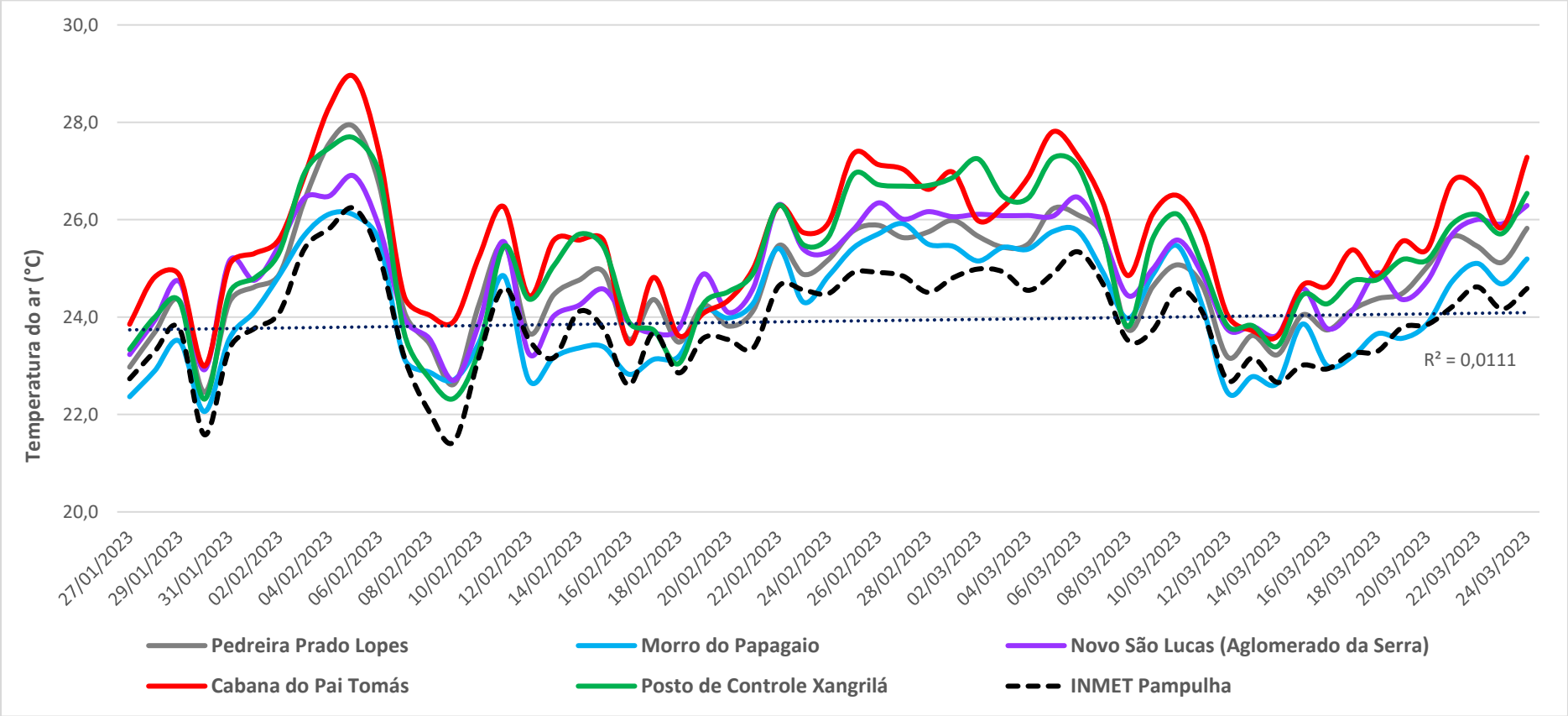
Retomando a exposição do comportamento da umidade relativa do ar, vale destacar que foi sob atuação dessa mesma Zona de Convergência de Umidade citada que os valores máximos absolutos do elemento foram registrados entre quase todas as Unidades Amostrais, sendo de 91,5% na Pedreira Prado Lopes e Vila Novo São Lucas e de 90,4% no Morro do Papagaio no dia 30/01/2023.

Após dissipação do sistema energético de baixa pressão, houve atuação preponderante do ASAS, por intervalo aproximado de seis dias. Com a imposição da célula de alta pressão, os tipos de tempo observados foram estáveis, mas notadamente demarcados pela elevação das temperaturas médias e significativo declínio da umidade. No dia 05/02, por exemplo, somente o Morro do Papagaio e a estação INMET Pampulha mantiveram valores térmicos médios próximos aos 26°C, ao passo que a Cabana do Pai Tomás registrou média elevada de 28,9°C, seguida pela Pedreira Prado Lopes (27,9°C), posto de controle Xangrilá (27,7°C) e Vila Novo São Lucas (26,9°C).

A umidade relativa do ar, como poderá ser observado nas Figuras 45 e 46, acompanhou a forte elevação da temperatura com padrão inversamente proporcional, tendo em vista que, dada as propriedades físicas do vapor d'água, à medida que a temperatura aumenta, a capacidade da parcela de ar de reter água também aumenta. Com isso, o maior contraste higrométrico do recorte temporal foi registrado justamente na transição entre os sistemas atmosféricos citados, partindo dos valores máximos apresentados anteriormente e culminando na média de 58,7% na Cabana do Pai Tomás no dia 04/02, diferença média de mais de 20% em comparação com período sob atuação da ZCOU.

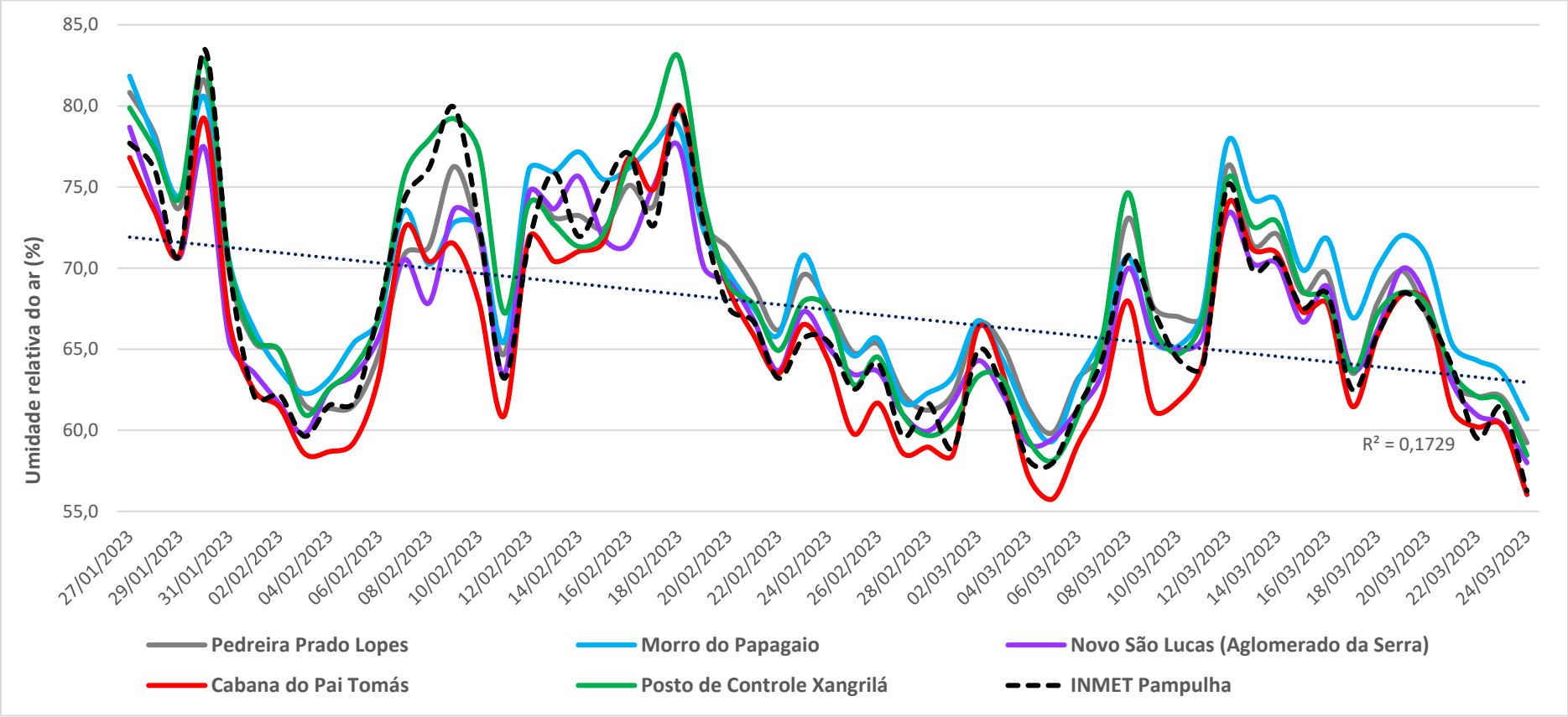
Com a chegada de novo sistema frontal no dia 06/02, de caráter estacionário, as Unidades Amostrais experimentaram novo padrão ondulatório de variação das curvas térmicas e higrométricas médias diárias. À exceção da queda abrupta nos valores de umidade relativa do ar observada especificamente no dia 11/02, com registro médio mínimo de até 60,9%, novamente na Cabana do Pai Tomás, há um perfil complexo de variação de ambos os elementos climáticos até o dia 18/02, com frequente oscilação da distribuição dos valores entre as Unidades Amostrais, que pode ser facilmente verificada nas figuras citadas.

Figura 45. Variação da temperatura média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período úmido de 2023.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 46. Variação da umidade relativa do ar média diária entre as Unidades Amostrais da pesquisa durante o período úmido de 2023.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Esse perfil complexo de variação da temperatura e umidade relativa do ar é compatível com a diversidade de sistemas instáveis de baixa pressão em imposição sobre as áreas de estudo entre 06 e 18/02/2023, que foram responsáveis por desorganizar a influência dos aspectos de superfície individuais de cada vila e comunidade sobre a atmosfera e ditar padrões oriundos dos mecanismos genéticos de macroescala. Além disso, há de se considerar que em um sistema complexo como o climático há sempre vários fatores ou controles atuando simultaneamente e que não há necessariamente apenas uma causa e um efeito único e conhecido, de resposta linear. Sistemas complexos são sensíveis a perturbações iniciais, que podem evoluir para resultados com padrões inesperados.

Resultado da atuação dos sistemas de baixa pressão também pode ser observado na diminuição da diferença entre valores médios diários de temperatura e umidade relativa do ar entre as Unidades Amostrais, que se mostraram mais homogêneos sob tipos de tempo instáveis do que sob atuação de sistemas de alta pressão. Como exemplo, destaca-se a temperatura no dia 12/02, com diferenças de apenas 1,7°C entre a Cabana do Pai Tomás (24,4°C) e o Morro do Papagaio (22,7°C), e a umidade no dia 13/02, com contraste de 5,5% observado entre a estação INMET Pampulha (75,9%) e novamente a Cabana do Pai Tomás (70,4%).

Nesse intervalo de 12 dias sob atuação variável de sistemas instáveis, inclusive houve registros de formação de Linha de Instabilidade (09/02), episódio em que foi registrado outro pico de umidade relativa do ar, da ordem de 79,9% e 79,2% na estação INMET Pampulha e no posto de controle do bairro Xangrilá, respectivamente. As vilas e comunidades, porém, não acompanharam essa elevação de maneira significativa, chegando a registrar média de apenas 71,5% na Cabana do Pai Tomás e 72,8% no Morro do Papagaio.

Em 14/02, a atuação contínua de uma ZCOU deu origem à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que apesar de não provocar nenhum desvio rítmico no padrão de variação térmica e higrométrica observado até então, foi o principal responsável pela manutenção da relativa homogeneidade dos valores médios registrados até 18/02, conforme já apresentados. Apesar da dissipação razoavelmente rápida desses sistemas, em virtude do alto nível energético e da

ocorrência de precipitação[44], os episódios de atuação de sistemas atmosféricos estáveis durante esse intervalo de 12 dias foram sempre muito curtos, justificados potencialmente pela intensa atividade convectiva de superfície, desencadeada pela maior incidência de radiação solar global no verão, e pelo aumento do saldo de umidade disponível no período, em virtude do deslocamento de sistemas depressionários da região amazônica para latitudes maiores.

Tais condições são favoráveis ao desenvolvimento frequente dos sistemas de baixa pressão atuantes sobre Belo Horizonte no período citado. Inclusive, o dia 18/02 foi marcado pela elevação considerável dos valores médios de umidade relativa do ar, que registraram 83% no posto de controle do Xangrilá e 80% na estação INMET Pampulha e, até mesmo, na Unidade Amostral da Cabana do Pai Tomás.

É importante destacar que, durante todo o monitoramento de campo no período úmido, a estação INMET Pampulha apresentou variabilidade de temperatura e, principalmente, de umidade relativa do ar muito mais próxima das registradas nas Unidades Amostrais. Isso sugere que, por mais que possa haver alguma espécie de superestimação dos dados corrigidos das vilas e comunidades, os fatores de superfície, como relevo e vegetação, estão bastante presentes nas curvas térmicas e higrométricas observadas para a estação INMET Pampulha, especialmente quando levado em consideração o papel das fitofisionomias semidecíduas na disponibilização de saldo de umidade na atmosfera durante o período úmido, questões que serão discutidas com mais propriedade na seção seguinte.

Dando sequência à análise dos controles atmosféricos e tipos de tempo responsáveis pelo desempenho médio da temperatura e umidade relativa do ar no período úmido, a pesquisa pôde registrar interessante evento ocorrido entre 19/02 e 06/03/2023. Trata-se da ocorrência de veranico, fenômeno caracterizado pelo estabelecimento de extensos períodos de interrupção da precipitação durante a estação habitualmente chuvosa (CARVALHO *et al*. 2000).

Na ocasião, foram registrados 16 dias ininterruptos de atuação do ASAS, com imposição de bloqueio atmosférico, considerável redução da umidade relativa do ar

[44] Com registro acumulado de 22,8 mm, entre 22h e 23h, do dia 14/02, na estação INMET Pampulha.

(média de até 55,8% na Cabana do Pai Tomás no dia 05/03) e manutenção dos valores médios de temperatura em patamares próximos aos 26°C, com exceções episódicas da estação INMET Pampulha e Morro do Papagaio (variações negativas em relação ao patamar) e do posto de controle Xangrilá e Cabana do Pai Tomás (variações positivas).

Inclusive, o valor médio de umidade relativa do ar informado foi o menor registro diário do recorte temporal do período chuvoso, observado em situação atmosférica pré-frontal, próxima ao término do episódio de veranico.

Apesar da fraca correlação estatística entre a variação da umidade ao longo do tempo (R^2 de 0,172), a interpretação da Figura 46 anterior permite identificar o efeito do veranico sobre a quebra do padrão de oscilação diária observado até então. Trata-se de um desvio rítmico claro, com efeitos duradouros sobre o comportamento dos elementos climáticos no recorte temporal da pesquisa.

O episódio de veranico é finalmente interrompido na transição entre os dias 07 e 08/03, com a criação de um corredor de umidade responsável pela gênese de nova ZCOU. A umidade relativa do ar média diária foi significativamente alta nestes dias na comunidade Pedreira Prado Lopes (73,1%) e no posto de controle do bairro Xangrilá (74,7%).

Com a dissipação do sistema de baixa pressão anterior, observou-se intercalação da atuação do ASAS com novas Zonas de Convergência de Umidade, incluindo episódio de precipitação acumulada de 36 mm, registrado pela estação INMET Pampulha entre 03h e 09h da manhã do dia 12/03. Sob atuação dos mesmos sistemas, o Morro do Papagaio se destacou ao registrar, nesse mesmo dia, os menores valores médios de temperatura (22,5°C) e maiores valores médios de umidade relativa do ar (77,8%) dentre todas as estações, incluindo as localizadas em contextos fora de favelas.

As novas zonas de convergência de umidade citadas deram lugar, a partir do dia 15/03, ao estabelecimento de tipo de tempo estável e quente, controlado por bloqueio atmosférico duradouro. Há o registro pontual de instabilidade local no dia 20/03, gerada por convectividade de superfície, mas sem registro oficial de

precipitação ou mudança sistemática no ritmo de variação da temperatura e umidade relativa do ar.

Com o fortalecimento do ASAS, o final do monitoramento no período úmido da pesquisa foi marcado pela elevação das temperaturas médias diárias, registrada acima dos 26°C em três das seis Unidades Amostrais (Cabana do Pai Tomás, Xangrilá e Vila Novo São Lucas). Também foi caracterizado pela queda vertiginosa dos valores diários de umidade relativa do ar, que registraram médias inferiores aos 59% em todas as miniestações meteorológicas, com exceção, mais uma vez, do Morro do Papagaio, que se manteve em 60,7% no dia 24/03.

Finalmente, do ponto de vista da amplitude térmica e hígrica deste período de monitoramento, observou-se redução dos contrastes médios diários em comparação com o período seco, que orbitaram em torno dos 10°C e dos 35%, respectivamente. Isso está associado a maior presença de nebulosidade no período úmido, que atenua a entrada de radiação solar de maneira direta no período diurno, enquanto reduz a perda de energia por infravermelho no período noturno, mantendo as curvas de amplitude mais próximas entre si.

A Tabela 07 sintetiza os principais valores médios do comportamento da temperatura e umidade relativa do ar entre as Unidades Amostrais da pesquisa no período úmido, conforme aqui discutidos. Em seguida, inicia-se nova seção voltada à discussão da variação horária dos elementos e dos fatores geográficos responsáveis pelos padrões criados.

Tabela 07. Resumo quantitativo das variáveis climáticas mensuradas nas Unidades Amostrais da pesquisa durante o período úmido de 2023.

Variáveis climáticas	UA1 - Pedreira Prado Lopes	UA2 - Morro do Papagaio	UA3 - Vila Novo São Lucas	UA4 - Vila Sumaré	UA5 - Cabana do Pai Tomás	UA6 - Posto de controle Xangrilá
Temperatura média global (°C)	24,8	24,2	24,9	x	25,6	25,2
Umidade média global (%)	68,4	69,2	67,0	x	66,0	68,6
Temp. máxima absoluta (°C)	34,4	34,0	36,5	x	34,4	36,0
Temp. mínima absoluta (°C)	19,3	17,6	19,4	x	19,1	19,1
Umid. máxima absoluta (%)	91,5	90,4	91,5	x	91,1	94,3
Umid. mínima absoluta (%)	36,0	35,4	29,4	x	36,0	33,2
Temp. máxima média (°C)	30,1	29,7	31,6	x	30,6	32,1
Temp.mínima média (°C)	21,3	20,2	21,2	x	21,7	20,6
Umid. máxima média (%)	82,8	81,5	82,8	x	81,1	85,5
Umid. mínima média (%)	48,4	50,6	45,3	x	47,2	45,5
Amplitude térmica média (°C)	8,8	9,5	10,3	x	8,9	11,5
Amplitude hígrica média (%)	34,4	30,9	37,5	x	33,8	40,0

Fonte: Autoria própria, 2023.

4.3 Variação horária dos elementos climáticos e identificação do ritmo climático próprio das favelas

Transitando dos mecanismos macroescalares responsáveis pela gênese meteorológica dos tipos de tempo, em direção aos fatores geográficos de superfície responsáveis pela sua modulação em escalas climáticas inferiores, a pesquisa analisa, agora, a variação horária dos elementos climáticos em recortes temporais específicos, ocasiões em que os dados coletados em campo serão discutidos em abordagem rítmica e sequencial.

Como discutido, o objetivo não mais visa descrever os controles atmosféricos atuantes e a resposta das Unidades Amostrais segundo dados médios de temperatura e umidade relativa do ar, mas sim integrar os mecanismos de grandeza regional com os aspectos urbanos individuais de cada vila ou comunidade estudada, buscando analisar a variação dos elementos nas diferentes horas do dia, a partir dos fatores que condicionem contextos topo ou microclimáticos.

Para o período hidrologicamente seco da pesquisa, foi escolhido o intervalo compreendido entre os dias 27 e 31/08/2022, tendo em vista os fortes contrastes térmicos e higrométricos do ar experimentados pelas Unidades Amostrais nesse recorte temporal e, sobretudo, pelo potencial de avaliação de episódios de desvios rítmicos.

A série de dados em análise se inicia com condição atmosférica estável, imposta pela atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, em que as temperaturas do ar variam de 15,6°C às 07h da manhã do dia 27/08 no Morro do Papagaio, aos 31°C às 13h na Vila Novo São Lucas. Como discutido, a atmosfera livre de cobertura de nebulosidade não somente permite a entrada de radiação ultravioleta e promove o aquecimento da superfície no período diurno, como também não oferece barreira natural à perda de calor por irradiação de energia em infravermelho no período noturno.

Resultado disso, foram as amplitudes térmicas elevadas registradas nos dias 27 e 28/08, sob atuação intercalada do ASAS com uma Instabilidade Local de curta duração, em que os sensores registraram, mesmo com a elevação da nebulosidade,

até 14,1°C e 14,8°C de diferença diária na Cabana do Pai Tomás e no posto de controle do bairro Xangrilá na segunda data citada.

Em comparação simultânea dos valores registrados em cada Unidade Amostral, percebe-se a oscilação, muitas vezes sutil, dos picos de temperatura e umidade relativa do ar entre elas, com recorrência da Vila Novo São Lucas figurando como detentora dos valores horários máximos no período da tarde, principalmente quando sob atuação de tipos de tempo instáveis ou estáveis de origem subpolar. Exemplo disso ocorre quando o ASAS predominante até então dá lugar à Frente Polar Atlântica, no dia 29/08. A partir da transição entre os sistemas atmosféricos, a Vila Novo São Lucas passa a registrar, no intervalo das 13h às 15h, picos de temperatura de até 31,6°C no dia 29/08, 26,7°C em 30/08 e 29°C em 31/08, sendo os dois últimos valores já sob atuação do Anticiclone Subpolar do Atlântico Sul, após dissipação do sistema frontal.

A situação observada só encontrou registro semelhante na Cabana do Pai Tomás às 13h do dia 29/08, quando foi mensurada temperatura de 33,8°C. Entretanto, por mais que tenham sido recorrentes os picos térmicos na Vila Novo São Lucas, ela não foi a Unidade Amostral que se manteve como mais quente durante o intervalo em análise. Principalmente quando se trata da variação da temperatura no período noturno, a citada Cabana do Pai Tomás e a Vila Sumaré é que registraram curvas mais elevadas, o que indica relação dos materiais urbanos no controle do campo térmico microclimático.

Procedendo à explicação, vale lembrar que é justamente no comportamento da temperatura do ar no período noturno que a literatura revisada encontra considerável respaldo para caracterizar a formação de núcleos de calor em áreas urbanas, justamente porque os materiais de revestimento da superfície reúnem propriedades físicas que favorecem a retenção do calor, mesmo com a atmosfera livre de nebulosidade.

Em comum às comunidades citadas, além da presença de becos e vielas estreitos, que não favorecem a dissipação do calor pelo transporte horizontal de ar, destacam-se, também, fatores como a característica da geometria das edificações, que nem sempre são separadas por quintais, áreas verdes ou espaços minimamente abertos, mas por muros muito próximos uns dos outros ou pelas

próprias paredes das construções vizinhas. Resultado disso é a contribuição do padrão de organização das edificações no aprisionamento do saldo de calor sensível, especialmente no período noturno, onde o fenômeno dos núcleos de calor se manifesta em maior propriedade.

Além disso, os materiais comumente utilizados no revestimento das alvenarias nas comunidades estudadas são o cimento (reboco) e o concreto, que são somados à presença de coberturas de amianto, zinco ou metalon, capazes de reunir as já destacadas propriedades térmicas que contribuem para o aquecimento superficial e a manutenção do calor, como o baixo albedo (inferior a 30%) e a elevada capacidade calorífica (até 3,93 J/m³/K no caso das ligas de aço). Os metais ainda apresentam condutividade térmica altíssima, tal como descrita na Tabela 08, o que colabora para a transferência de calor por condução ou irradiação e para a criação de “estufas” nos cômodos das moradias que estão sob as coberturas.

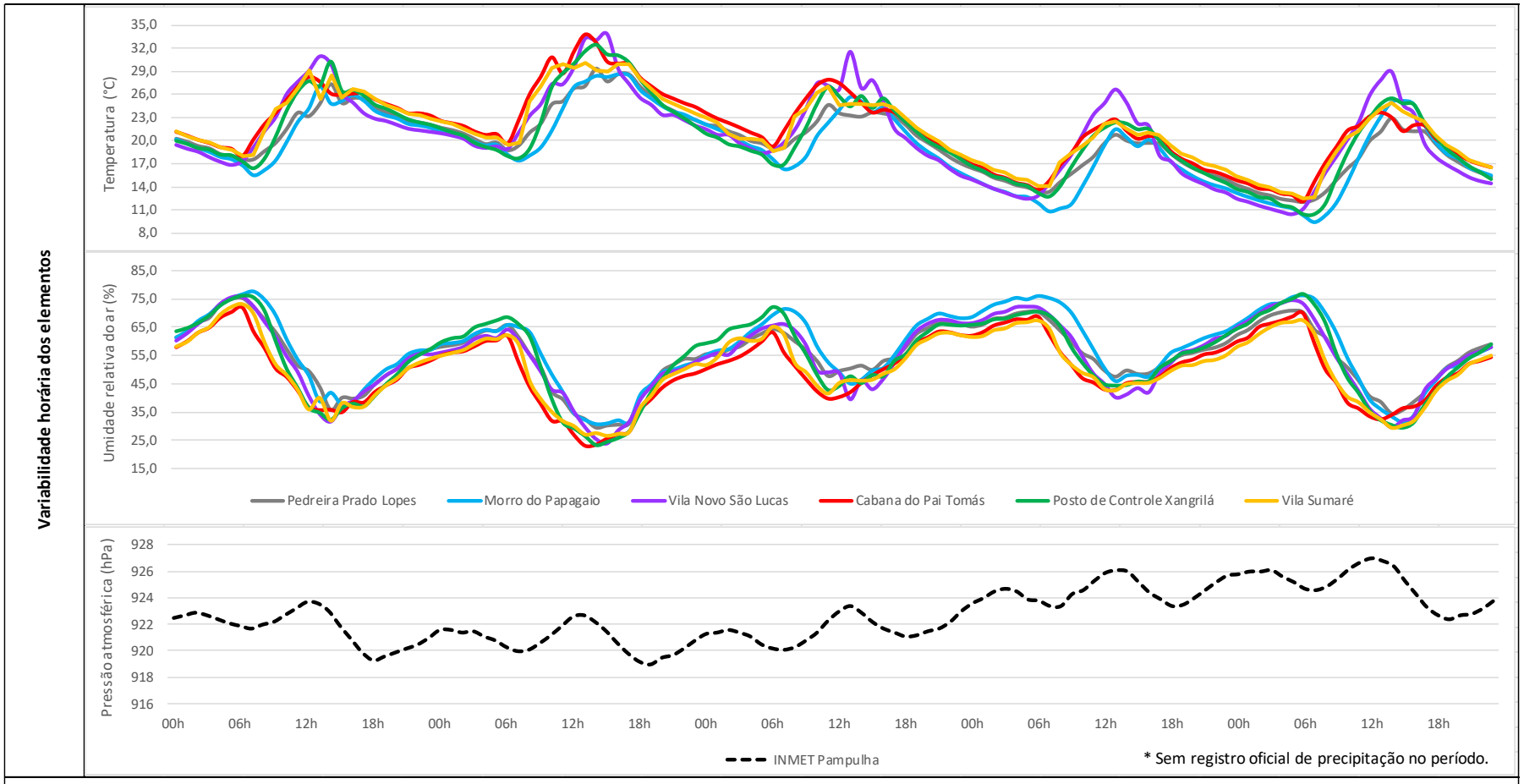
Tabela 08. Propriedades térmicas dos principais materiais constituintes do ambiente urbano.

Tipo de superfície	Albedo (%)	Condutividade térmica (w/mk)	Capacidade calorífica ($J/m^3/K \times 10^6$)
Aço	-	53,3	3,93
Água	2 a 4	0,57	4,18
Areia	15 a 25	-	-
Asfalto	4 a 25	0,75	1,94
Cerrado	16 a 18	-	-
Concreto seco	17 a 27	1,51	2,11
Floresta deciduifólia	12 a 18	-	-
Floresta tropical úmida	7 a 15	-	-
Gramados	15 a 30	-	-
Madeira densa	5 a 20	0,19	1,52
Madeira leve		0,09	0,45
Rocha	-	2,19	2,25
Solo seco	14	0,25	1,42
Solo úmido	8	1,58	3,1
Telha cerâmica	-	0,84	1,77
Tijolo	-	0,83	1,37
Vidro	-	0,74	1,66

Fonte: Adaptado de Mendonça & Danni-Oliveira (2007) e Gartland (2010).

A Figura 47 apresenta os gráficos de análise rítmica contendo a variação horária dos elementos climáticos integrados, onde é possível observar a influência das propriedades citadas no padrão térmico e higrométrico de cada Unidade Amostral ao longo dos períodos diurno e noturno.

Figura 47. Análise rítmica horária dos elementos climáticos nas Unidades Amostrais. Recorte temporal episódico de 27 a 31/08/2022 (período seco).



Sistema atmosférico	ASAS		IL		ASAS			FPA					APAS		
Direção predom. dos ventos	→		↑	→			↗	→	↘	↗	→	↘	↖	↑	→
Nebulosidade	6/10	4/10	8/10	10	2/10	4/10	2/10	9/10	0/10	3/10	7/10	6/10	0/10		

Fonte: Autoria própria, 2024.

No caso especial da Vila Novo São Lucas, há inevitável influência da cobertura metálica da edificação onde o abrigo meteorológico foi instalado, que se encontra a menos de um metro da porção superior do equipamento. Isso contribuiu significativamente para a observação dos picos de temperatura do ar registrados no período diurno durante tipos de tempo instáveis ou sob influência de controles de alta pressão de origem subpolar, enquanto as demais Unidades Amostrais apresentavam curvas mais homogêneas. No período noturno, entretanto, a Vila Novo São Lucas experimentou padrão de temperatura e de umidade relativa do ar muito próximo do Morro do Papagaio e do posto de controle do bairro Xangrilá, registrando às 5h da manhã do dia 31/08, valores de 12,5°C e 74,7%. No mesmo horário, as últimas estações citadas registraram, 11,3°C (ambas), 75,5% e 75,2%, respectivamente.

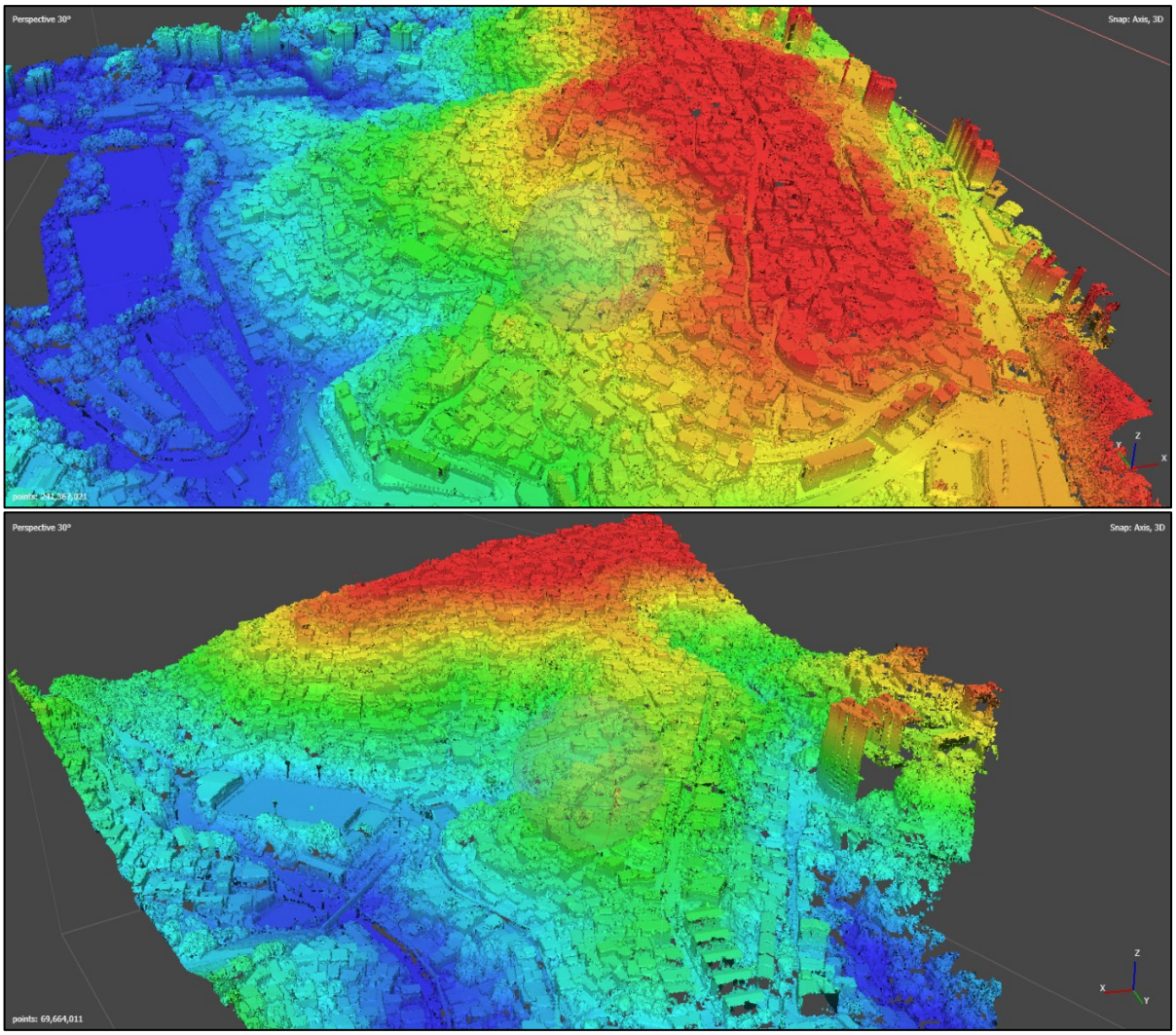
Se por um lado, o padrão verificado no posto de controle Xangrilá pode ser justificado, em linhas gerais, pelas diferentes formas de uso e ocupação do bairro, pelos materiais de revestimento das edificações e pela maior presença de vegetação, elemento a ser melhor discutido posteriormente, a relação com o Morro do Papagaio certamente resguarda justificativa no fator relevo. Além de estarem localizadas a 925 e 1014 metros de altitude, a Vila Novo São Lucas e o Morro do Papagaio, respectivamente, experimentam padrões de circulação do ar capazes de frear a participação das variáveis estritamente urbanas, de origem microclimática, e impor condições associadas aos níveis de organização dos topoclimas e climas locais.

Segundo dados da estação INMET Pampulha, a direção preferencial dos ventos durante o recorte temporal da análise rítmica no período seco foi para leste (tipos de tempo estáveis) e nordeste (tipos de tempo instáveis), o que indica a existência de vetores de origem sul, porção de Belo Horizonte onde está localizada a Serra do Curral e ambas as comunidades. Experimentam, portanto, condição topográfica favorável ao transporte de ar, que desencadeia processos termodinâmicos, descritos a seguir, que são responsáveis pelos valores de temperatura e umidade registrados.

De maneira explicada, ao se aquecer durante o período diurno, sob incidência da radiação solar direta e atmosfera livre de obstrução, o ar em expansão no fundo

de vale é comprimido lateralmente pelas encostas íngremes do Morro do Papagaio e da Vila Novo São Lucas, sendo forçado a subi-las, por processo anabático. No período noturno, em contrapartida, à medida que os topos de morro perdem calor por irradiação em ondas longas, o ar mais frio e denso tende a escoar em direção ao fundo de vale, por padrão catabático, resultando no arrefecimento das temperaturas nos patamares altimétricos menos elevados e na ascendência do ar quente que estava ali concentrado até então. Ao observar as nuvens de pontos da Figura 48, geradas pelo processamento aerofotogramétrico das imagens captadas pelo RPA sobre as duas comunidades, torna-se nítida a compreensão da influência da topografia dos sítios nos padrões de circulação discutidos.

Figura 48. Nuvens de pontos geradas por processamento aerofotogramétrico digital, contendo a representação tridimensional e hipsométrica do Morro do Papagaio (Aglomerado Santa Lúcia) e Vila Novo São Lucas (Aglomerado da Serra), respectivamente. Cores mais quentes indicam patamares altimétricos mais elevados.



Fonte: Autoria própria, 2024.

De volta à discussão dos padrões horários observados na análise rítmica do intervalo temporal de 27 a 31/08/2022, torna-se importante discutir o papel da vegetação no comportamento da umidade relativa do ar entre as Unidades Amostrais. Diferentemente do observado na análise dos dados médios diários, a variação do elemento em unidade horária é bastante sensível à presença de fragmentos vegetacionais no interior das áreas de estudo.

Tal como discute Ometto (1981), a vegetação desempenha papel importante ao aportar saldo de umidade na atmosfera através da evapotranspiração, processo definido como o somatório da transpiração da planta com a evaporação da água em superfície. Não obstante, durante o processo há mudança do estado físico da água, o que exige gasto de energia suficiente para superar as atrações intermoleculares da partícula. Ao ocorrer, há consumo de calor sensível do ambiente e armazenamento dessa energia na forma de calor latente, processo que consequentemente resulta no resfriamento da parcela de ar junto à superfície.

Além disso, tem-se o papel da vegetação no provimento de sombras sobre a superfície e no favorecimento da entrada de radiação solar por maneira difusa, associada à fragmentação de folhas na copa das árvores. Ambas as características contribuem para o arrefecimento da superfície e, por consequência, da parcela de ar no interior do dossel vegetacional.

Durante o período noturno, por exemplo, as Unidades Amostrais com maior presença de fragmentos florestais, reconhecidamente Morro do Papagaio, Novo São Lucas e posto de controle no bairro Xangrilá, registraram valores de umidade relativa do ar, às 21h do dia 29/08, da ordem de 69,7%, 67,7% e 66,1%, enquanto a Vila Sumaré e Cabana do Pai Tomás registraram no mesmo horário, respectivamente, 62,7% e 63,7%. Inclusive, pela proximidade das curvas de temperatura e umidade relativa do ar exibidas nos gráficos da Figura 48, especialmente a partir da data e horários citados, há exemplo interessante de leve desvio rítmico, característico da transição de sistema de alta pressão para a atuação de frentes de natureza instável.

Ou seja, com a passagem do sistema frontal, houve elevação simultânea da umidade relativa do ar e redução significativa da temperatura em todas as estações, mas com destaque àquela que soma o fator relevo com a participação da maior densidade vegetacional, o Morro do Papagaio. Às 07h da manhã do dia 30/08, a

comunidade registrou 75,2% de umidade e 10,9% de temperatura do ar. Situação semelhante, já sob tipo de tempo estável e frio associado ao APAS, também foi observada às 06h da manhã do dia 31/08, no bairro Xangrilá, com umidade relativa do ar de 76,9% e temperatura de 10,4°C.

Ainda que a pesquisa não se proponha estritamente a discutir impactos das condições climáticas destacadas sobre a saúde da população habitante das vilas e comunidades, principalmente nesta seção, cabe trazer breve, mas interessante, contraponto apresentado por Gonçalves *et al.* (2012), no que se refere ao papel da umidade relativa do ar.

Em monitoramento sistemático conduzido por equipe do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas e da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, no interior de quase 400 habitações da capital paulista, os autores observaram que a umidade relativa média das máximas foi de 87%. Também observaram que 21% dos domicílios amostrais ainda registraram valores máximos de umidade relativa do ar de 100%, no período noturno, condição de supersaturação interna que trouxe implicações relacionadas ao desenvolvimento significativo de fungos e que poderia contribuir para o aumento de doenças respiratórias nos moradores.

Ao concluir pela sugestão contrária à umidificação noturna dos ambientes internos das habitações paulistanas, mesmo no período hidrologicamente seco, os autores fogem do senso comum e permitem levantar questão que se relaciona ao contexto em que a presente pesquisa se insere. Mesmo que sob regime pluviométrico distinto, as características de adensamento e condições gerais de construção das habitações encontradas nas Unidades Amostrais, que não necessariamente favorecem a ventilação natural e a criação de ambientes internos bem arejados, podem culminar na configuração de espaços superúmidos, com potencial repercussão negativa no bem-estar populacional, tanto quanto a ocorrência de ondas de calor. Isso pode ser especialmente observado sob atuação de sistemas atmosféricos instáveis de verão, cuja dinâmica será discutida no recorte temporal a seguir.

A análise rítmica no período hidrologicamente úmido da pesquisa foi conduzida para o intervalo temporal compreendido entre os dias 09 e 14/02/2023,

justificada pela variabilidade observada entre tipos de tempo estáveis e instáveis, além da ocorrência de eventos pluviométricos interessantes à avaliação da resposta superficial dos fenômenos estudados.

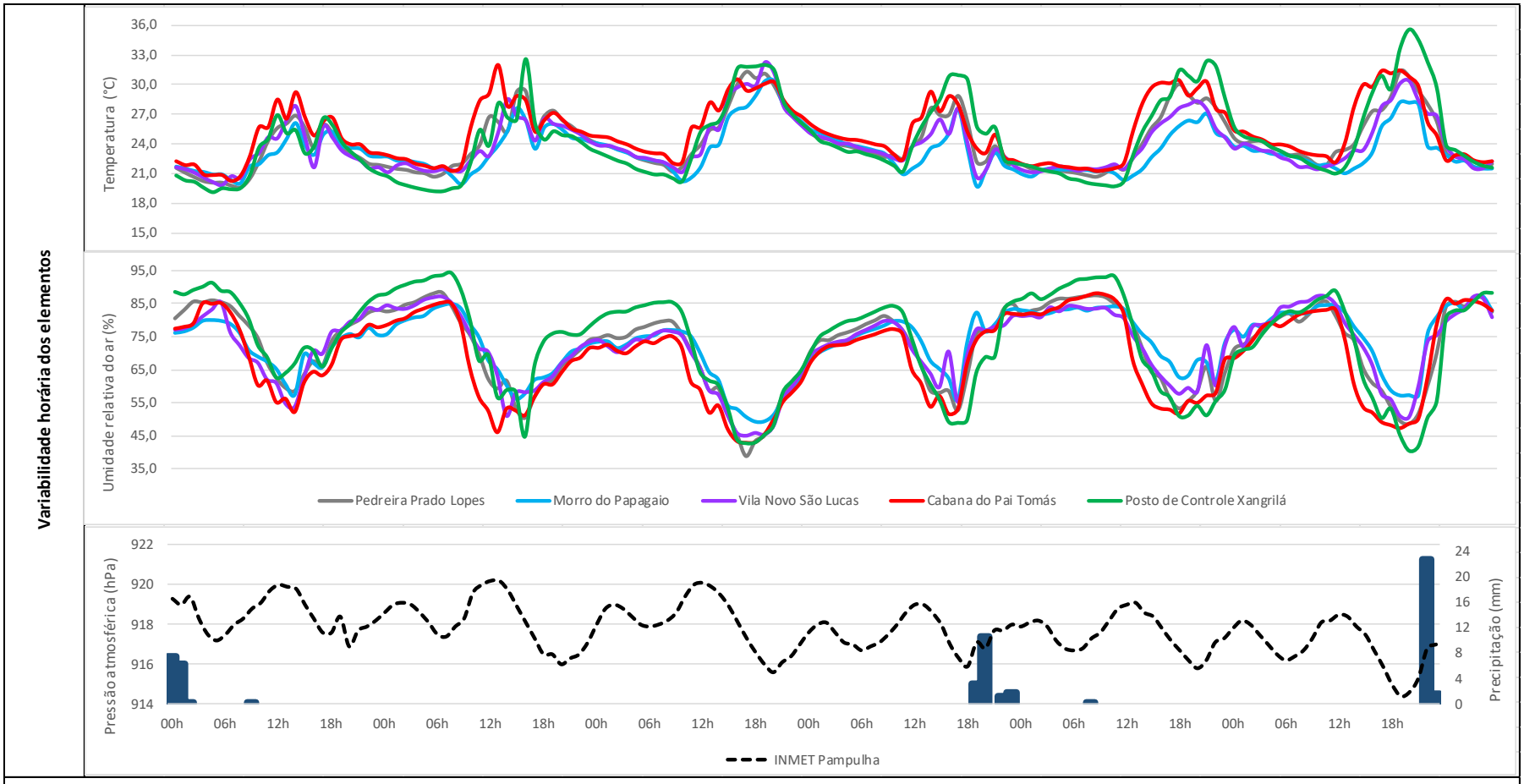
Inicia-se com a atuação de Linha de Instabilidade, responsável pelo registro de nebulosidade elevada (até nove décimos da abóboda celeste) e de precipitação acumulada de 13,8 mm entre 00h e 02h da manhã do dia 09/02. Tal situação foi responsável pela homogeneização das temperaturas e aumento da umidade relativa do ar entre todas as Unidades Amostrais, que registraram, às 06h da manhã do mesmo dia, valores respectivos de 19,8°C e 84,5% (Pedreira Prado Lopes), 20,4°C e 79,1% (Morro do Papagaio), 20,8°C e 76,4% (Novo São Lucas) e 20,3°C com 82,3% (Cabana do Pai Tomás).

Ou seja, com a imposição de controle atmosférico de grandeza macroescalar e o desencadeamento de evento pluviométrico, as diferenças térmicas simultâneas entre as vilas e comunidades não superaram 1°C, enquanto o contraste higrométrico foi pouco maior do que 8%. Inclusive é válido destacar que, diante da instabilidade temporal e da superfície úmida, Unidades Amostrais que frequentemente figuraram como mais quentes ou mais frias no período seco da pesquisa, agora apresentaram variabilidade de registros em padrão comum a qualquer outra estação, especialmente no período noturno, nas primeiras horas da manhã e sob tipos de tempo instáveis.

Contudo, com a transição da Linha de Instabilidade para a atuação do ASAS, a partir de 10/02 até 12/02, o bloqueio atmosférico parcial[45] possibilitou a ascensão das temperaturas em padrão mais errático entre as estações e a reconfiguração da Cabana do Pai Tomás como Unidade Amostral habitualmente mais quente e seca (32°C e 46% às 11h do dia 10/02). Há de observar, porém, que o posto de controle no bairro Xangrilá experimentou flutuações muito expressivas daí em diante, fato que será justificado após apresentação dos gráficos integrados da análise rítmica (Figura 49).

[45] Intitula-se como parcial pelo fato de ter sido registrada atividade convectiva típica de verão, com nebulosidade de razoável desenvolvimento vertical ao final das tardes.

Figura 49. Análise rítmica horária dos elementos climáticos nas Unidades Amostrais. Recorte temporal episódico de 09 a 14/02/2023 (período úmido).



Sistema atmosférico	LI		ASAS					FPA			ZCOU				ZCAS
Direção predom. dos ventos	↗	↙	↑	→	↗	→	↑	→	↗	↑	←	↑	→	↗	
Nebulosidade	9/10		0/10	3/10	9/10	3/10	8/10	4/10	6/10	10/10	6/10	9	0/10	3/10	8/10

Fonte: Autoria própria, 2024.

Supõe-se que dois fatores responderam pelas amplitudes térmicas e higrométricas elevadas observadas no bairro Xangrilá durante o recorte temporal da análise rítmica no período úmido. O primeiro deles pode estar associado ao crescimento da vegetação na área de horta que ficava ao lado do local onde foi instalado o abrigo contendo o sensor *datalogger*, distante em aproximadamente três a quatro metros.

Quando o aparato meteorológico foi afixado, no período seco, os arbustos e hortaliças, teoricamente, não representavam conteúdo de biomassa suficiente para alterar a umidade relativa do ar de maneira substancial, mas, com a chegada do período chuvoso e a falta de manutenções na área (especialmente a capina), muita braquiária foi naturalmente introduzida, além de espécies como pé de acerola e jabuticaba terem aumentado seu volume de copa e a quantidade de estruturas foliares.

O outro fator de suposição diz respeito à deterioração parcial do abrigo meteorológico. Somente ao removê-lo, ao final do período úmido da pesquisa, é que se percebeu que havia sujeira, de coloração escura, na porção superior do material isolante de EVA. Isso pode ter contribuído para o ligeiro aumento do albedo do material e da capacidade de absorver mais energia e transformá-la em calor. São suposições de difícil avaliação, ainda mais pelo local de instalação não apresentar comprometimento microclimático, mas que podem ajudar a explicar os ruídos e a variabilidade das amplitudes registradas.

No próprio dia 10/02, por exemplo, o posto de controle do bairro Xangrilá chegou a experimentar diferenças diárias de até 12,1°C para a temperatura e de 41,5% para a umidade relativa do ar, enquanto as Unidades Amostrais localizadas em áreas muito mais densamente ocupadas registraram amplitudes térmicas próximas aos 9,5°C e higrométricas aos 35%. Esse comportamento, por outro lado, também pode ser visto como argumento para reforçar que o estabelecimento de núcleos de calor deve ser relativizado e observar, sempre, o tipo de tempo sobre os quais se manifestam, que são capazes de desorganizar padrões urbanos até então muito claros.

A partir da noite do dia 12/02, o recorte temporal da análise rítmica observou o desenvolvimento sequencial, e em sucessão, de tipos de tempo eminentemente instáveis, com registros pluviométricos bastante característicos do padrão convectivo do verão na região Sudeste brasileira, totalizando 16,8 mm na transição para o dia 13/02 e 24,4 mm, entre 22h e 23h, do dia 14/02, nesse caso sob influência de Zonas de Convergência de Umidade. Esse último evento, inclusive, teve repercussão na mídia em relação aos seus desdobramentos enquanto impacto negativo sobre a superfície urbanizada, conforme reportagem do portal G1 (Figura 50), que destaca a ocorrência de enchentes e outros prejuízos nas esferas pública e privada, a partir do desenvolvimento do canal hidrometeórico do clima urbano.

Figura 50. Manchete de 14/02/2023, destacando impactos negativos de episódio de precipitação acentuada em curto tempo.

Fonte: Portal G1. Disponível em: https://bitlybr.com/ACIA.

Apesar de não receber especial atenção nesta pesquisa, face aos seus propósitos e objetivos, o canal de desenvolvimento hidrometeórico do clima urbano é o que, na maioria das vezes, melhor elucida a ocorrência de repercussões espaciais negativas à população, derivadas da relação superfície-atmosfera. Considerou-se importante trazer a reportagem acima, para ilustrar como os grandes centros urbanos não necessariamente estão preparados para lidar com desvios rítmicos do clima, que podem ser desencadeadores de problemas de ordem socioeconômica. É como se as cidades, e Belo Horizonte não é exceção, estivessem preparadas apenas para aquilo que é habitual, médio ou padrão, sem muita capacidade de suporte para atenuar ou mitigar os efeitos adversos sobre a estrutura urbana ou população.

A presente pesquisa ainda trará seção de resultados específica para a discussão dos impactos e do planejamento da capital mineira (4.5), sobretudo em

relação aos fenômenos do canal termodinâmico do clima e sua repercussão sobre áreas em vulnerabilidade social. Mas a provocação aqui antecipada é pertinente e reforça a importância da análise rítmica do clima, em unidade horária, para observar situações como as descritas.

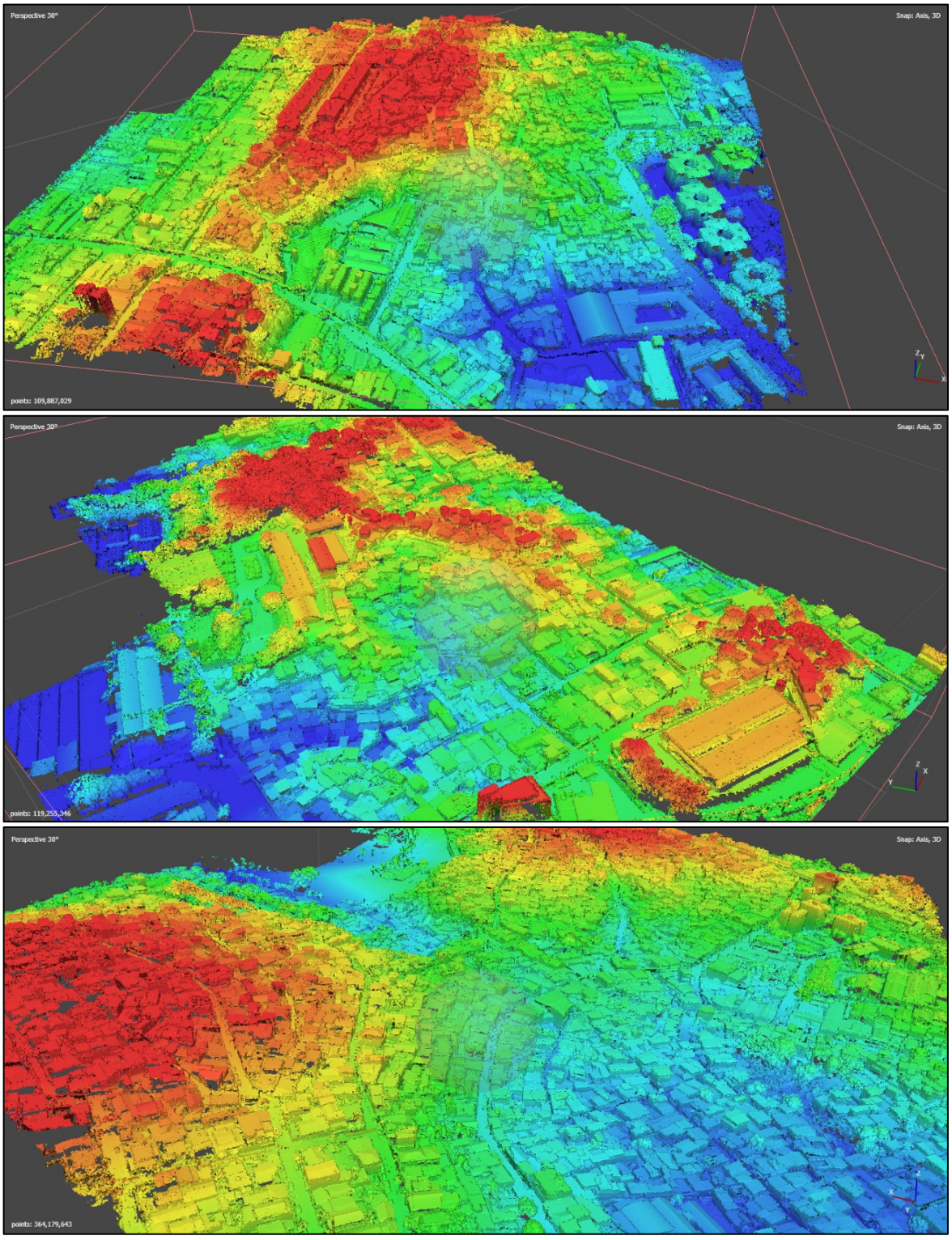
De volta à discussão dos elementos climáticos entre as Unidades Amostrais, cabe destacar os aspectos do relevo e da geometria urbana na Pedreira Prado Lopes, Vila Sumaré e Cabana do Pai Tomás. Apesar de não apresentarem desníveis altimétricos muito significativos, e, principalmente nas duas últimas vilas citadas, estarem em situação topográfica de relativo confinamento, as intervenções de infraestrutura urbana realizadas pela Prefeitura Municipal de Belo Horizonte são completamente diferentes.

Os Modelos Digitais de Superfície da Figura 51, oriundos do levantamento aerofotogramétrico sobre as vilas e comunidades em campo, destacam os aspectos mencionados e ainda permitem observar traços do padrão de arruamento entre as comunidades. A Pedreira Prado Lopes foi alvo de sucessivas obras oriundas do Programa Vila Viva, que abriram vias com larguras padronizadas e reduziram a densidade de área construída no interior da comunidade.

Tais ações, sem dúvida, favoreceram o transporte horizontal de ar, contribuindo para a diminuição do saldo de calor sensível e ao aumento da velocidade dos ventos, que muitas vezes é prejudicada pela rugosidade urbana, em especial em espaços altamente edificados, conforme amplamente avaliado por Grimmond *et al.* (1998).

Resultado disso está refletido nos gráficos da análise rítmica, onde a Pedreira Prado Lopes tem comportamento térmico muito semelhante ao mensurado na Vila Novo São Lucas, e higrométrico igualmente satisfatório como o Morro do Papagaio. Exemplos podem ser destacados às 00h do dia 13/02, em que a umidade relativa do ar é registrada em 86,9% (maior do que todas as demais Unidades Amostrais) e às 11h da manhã do dia 14/02, quando a temperatura de 27,4°C só é maior do que a medida no Morro do Papagaio, no mesmo horário (25,8°C).

Figura 51. Nuvens de pontos geradas por processamento aerofotogramétrico digital, contendo a representação tridimensional e hipsométrica da Pedreira Prado Lopes, Vila Sumaré e Cabana do Pai Tomás, respectivamente. Cores mais quentes indicam patamares altimétricos mais elevados.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A Vila Sumaré e a Cabana do Pai Tomás, por outro lado, foram Unidades Amostrais interessantes para observar a potencial ocorrência de fenômenos climáticos característicos de áreas densamente edificadas. Trata-se dos já citados cânions urbanos, que puderam ser verificados, ainda que de modo distinto dos modelos clássicos da literatura, a partir dos produtos derivados da aerofotogrametria.

Em contextos de favelas, o fluxo de ar, fluxo radiativo e o comportamento das superfícies podem ser muito diferentes do que os modelos propostos para cânions urbanos almejam investigar, mas a disposição dos becos e vielas estreitos nas comunidades citadas de fato pôde contribuir para a configuração de situações perenes de penumbra.

Especialmente no período de inverno, cuja iluminação solar é menor, mesmo na latitude onde se encontra o município de Belo Horizonte, a projeção horizontal do sombreamento imposto pelas edificações com maior número de pavimentos é suficiente para impossibilitar que a luz alcance a superfície. Além disso, a transferência de calor por irradiação ou condução entre habitações muito próximas entre si pode potencializar o aprisionamento do calor sensível e culminar em impactos relacionados ao desconforto térmico populacional.

Becos com menos de dois metros de largura, cercados lado a lado por habitações com até quatro pavimentos, foram constantemente verificados na Vila Sumaré e na Cabana do Pai Tomás. Não que seja exclusividade das comunidades citadas, mas as geometrias descritas podem ter contribuído para os padrões térmicos observados tanto no período seco, quanto úmido. Na Figura 52, há exemplos de arruamentos e desníveis sombreados pela proximidade lateral de edificações em ambas as comunidades citadas, além da Vila Novo São Lucas, que podem figurar como potenciais cânions urbanos.

Figura 52. Especificidades das edificações e estruturas viárias informais observadas na Vila Sumaré (a), Cabana do Pai Tomás (b) e Vila Novo São Lucas (c), a partir do levantamento aerofotogramétrico com RPA.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Para finalizar, ainda que não disponíveis dados empíricos da Unidade Amostral Vila Sumaré durante o período úmido da pesquisa, a análise rítmica do clima em ambas as estações sazonais leva a sugerir que apenas a Cabana do Pai Tomás e a Vila Sumaré parecem de fato figurar como comunidades que podem ser entendidas como núcleos de calor, pois mantiveram temperaturas noturnas consistentemente mais altas em relação às outras estações, mesmo durante o período chuvoso (no caso da Cabana do Pai Tomás). A combinação dos fatores urbanos discutidos, como densidade de construções e pavimentação, com a topografia confinada do sítio, provavelmente são os aspectos-chave que contribuíram para a retenção de calor e o contraste observado com as demais comunidades.

Por outro lado, não há quaisquer indícios que levem a sugerir que a Pedreira Prado Lopes, Vila Novo São Lucas e, principalmente, o Morro do Papagaio funcionem como núcleos de calor urbanos em Belo Horizonte, independentemente do sistema atmosférico ou tipo de tempo atuante. Portanto, mais uma vez se torna necessário relativizar a consideração generalizada das favelas como “ilhas de calor”, pois ainda que densamente ocupadas e com elevadas taxas de impermeabilização

da superfície, permanecem dependentes de fatores responsáveis pela organização climática em escala local ou regional, que se sobrepõem à particularidade dos microclimas e condicionam padrões que na maioria das vezes estão associados ao relevo belo-horizontino.

Contudo, ainda é possível identificar o grau de antropização de cada espaço, a fim de compreender de que modo as variáveis climáticas são mais ou menos influenciadas pelos aspectos urbanos e naturais. Nessa seara, as seções seguintes apresentarão os resultados dos modelos estatísticos empregados na pesquisa, além da síntese climática adaptada ao contexto das vilas e comunidades a que se propôs desenvolver.

Antes, porém, cabe dar ênfase à divulgação dos produtos derivados do levantamento aerofotogramétrico, que foram parcialmente apresentados nessa seção durante a discussão dos resultados da variação horária dos elementos climáticos, mas que estarão integralmente disponíveis à comunidade científica.

4.3.1 Acesso aos produtos derivados do levantamento aerofotogramétrico com RPA

Etapa fundamental ao desenvolvimento da pesquisa, o levantamento aerofotogramétrico das favelas que figuraram como Unidades Amostrais culminou em produtos gerados a partir do processamento digital das imagens captadas pelo RPA em campo. Dada a riqueza de detalhes e seu caráter inovador, a pesquisa recomenda e encoraja fortemente os leitores a conhecer as maquetes tridimensionais que foram modeladas para cada comunidade estudada. Trata-se de produtos interativos, com alto nível de renderização gráfica, que ajudam sobretudo a compreender as particularidades das áreas de estudo, os aspectos geográficos discutidos até aqui e a localização dos miniabrigos meteorológicos, sendo um dos principais resultados da pesquisa.

As maquetes estão hospedadas na plataforma Cesium Ion, através de licença gratuita não-comercial. Seu manuseio e navegação são intuitivos e requerem apenas boa conexão com a internet, computador com 8 GB ou mais de memória RAM e uso dos botões direito, esquerdo e *scroll* do *mouse*, incluindo clique sobre o *scroll*, para funções como rotação e *zoom* sobre as áreas de interesse. A Figura 53

ilustra, a partir de exemplo do Morro do Papagaio, os produtos que serão manipulados de maneira interativa para cada comunidade na plataforma.

Figura 53. Exemplo de maquete tridimensional gerada a partir do processamento aerofotogramétrico digital do levantamento realizado com RPA no Morro do Papagaio.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os endereços de acesso às maquetes tridimensionais das demais comunidades estudadas estão disponibilizados a seguir:

- Maquete tridimensional da Pedreira Prado Lopes: https://ion.cesium.com/stories/viewer/?id=5d891cfd-4d84-4ee9-880b-34f9a5e02259
- Maquete tridimensional do Morro do Papagaio: https://ion.cesium.com/stories/viewer/?id=53253519-8d72-40b4-84a9-7584ba402086
- Maquete tridimensional da Vila Novo São Lucas: https://ion.cesium.com/stories/viewer/?id=bbb88811-3c8f-4747-ac89-fb32d3c4e550
- Maquete tridimensional da Vila Sumaré: https://ion.cesium.com/stories/viewer/?id=857b5d26-a58b-4d64-95db-38c33fc0bf37

- Maquete tridimensional da Cabana do Pai Tomás: https://ion.cesium.com/stories/viewer/?id=e3344620-a103-4afc-90cf-adf002b53331

Ainda, seguindo o compromisso da pesquisa de fomentar o uso de geotecnologias livres e de tornar o acesso aos dados oriundos do levantamento aerofotogramétrico totalmente aberto e gratuito, os ortofotomosaicos gerados em altíssima resolução espacial, podem ser consultados e baixados através da plataforma Open Aerial Map[46], pelo link: https://map.openaerialmap.org/.

[46] O Open Aerial Map é um conjunto de ferramentas para pesquisar, compartilhar e usar imagens de satélite e de Aeronaves Remotamente Pilotadas com licença aberta. Conta com plataforma colaborativa, onde, a partir de um mapa interativo, o usuário pode acessar áreas de interesse e verificar coleções de imagens disponíveis.

4.4 Aplicação do Índice de Antropização Climática em Favelas

Como descrito no capítulo 3, a proposta de síntese climática da pesquisa está voltada à construção de indicador para mensurar o nível de transformação antrópica da atmosfera em interação com as superfícies urbanas em estudo. Em outras palavras, busca-se reunir conjunto de variáveis remota ou empiricamente obtidas que, quando combinadas, consigam revelar a influência das favelas na derivação dos elementos climáticos em escalas inferiores.

O abreviado IACF é produto de matriz de análise multicritério, onde a média ponderada do desempenho de cada variável culminará em um valor numérico representativo do grau de transformação climática.

Entretanto, o processo de atribuição dos pesos às variáveis depende da consideração das características geográficas analíticas reveladas durante a etapa de análise rítmica dos elementos climáticos na seção anterior e, do ponto de vista estatístico, do conhecimento de quais são as variáveis mais representativas ao fenômeno estudado, informação obtida pela implementação de Análise de Componentes Principais, cujos resultados estão descritos nas seções a seguir.

4.4.1 Resultados da ACP e discussão das variáveis do modelo

Para melhor compreensão do leitor quanto à distribuição espacial das variáveis geográficas que foram empregadas na Análise de Componentes Principais, vale inicialmente apresentar conjunto sistemático de produtos cartográficos, individualizados para cada Unidade Amostral, contendo os mapas derivados do processamento aerofotogramétrico digital das imagens geradas pelo sobrevoo com RPA sobre as comunidades. Além deles, também é importante apresentar a cartografia da distribuição espacial dos índices NDVI e NDBI de cada favela estudada, que reforçam aspectos vegetacionais e da densidade de edificação discutidos na seção da análise rítmica dos dados horários.

Como poderá ser visto na Figura 54, a Pedreira Prado Lopes tem dois patamares altimétricos muito bem demarcados, notadamente divididos pela borda da antiga área de extração mineral, onde atualmente se encontra um campo de futebol (parte baixa). É justamente nesse rompimento de padrão altimétrico que se concentram as áreas mais sombreadas da comunidade, cuja distribuição é de

38,7%, valor que também é justificado pelo fato de a Pedreira Prado Lopes estar localizada em vertente preferencialmente voltada para o sudeste, recebendo menor iluminação no horário utilizado para cálculo do sombreamento (12h).

Em função da topografia da área de estudo e das obras de moradia e infraestrutura urbana da Prefeitura Municipal, que alargaram vias e construíram edificações padronizadas, os valores médios de declividade e rugosidade foram menores em comparação com as demais comunidades, sendo de 23,8° e de 38,7%, respectivamente.

Já o Morro do Papagaio, apesar de registrar baixo percentual de sombreamento 28,6%, possui a maior declividade média dentre as Unidades Amostrais da pesquisa, com 27,2°, o que é nitidamente destacado no contraste entre patamares altimétricos da Figura 55. Em função da presença de fragmento vegetal na porção sul da comunidade, cuja rugosidade do dossel é sensível à resolução espacial do RPA e, somada à densidade de edificações, impacta no cálculo dos indicadores morfométricos, o Morro do Papagaio registrou elevada rugosidade média (45,5%), ficando atrás somente da Vila Novo São Lucas (50,2%).

Essa última também possui desníveis consideráveis, que contribuíram para o registro de declividade média de 27°. Quanto ao sombreamento, na Vila Novo São Lucas foram observados os menores valores dentre as comunidades (22,8%), o que está associado à disposição da vertente orientada preferencialmente ao norte e há existência de campo de futebol em tamanho oficial, que devido à topografia plana contribuiu para o resultado observado (Figura 56).

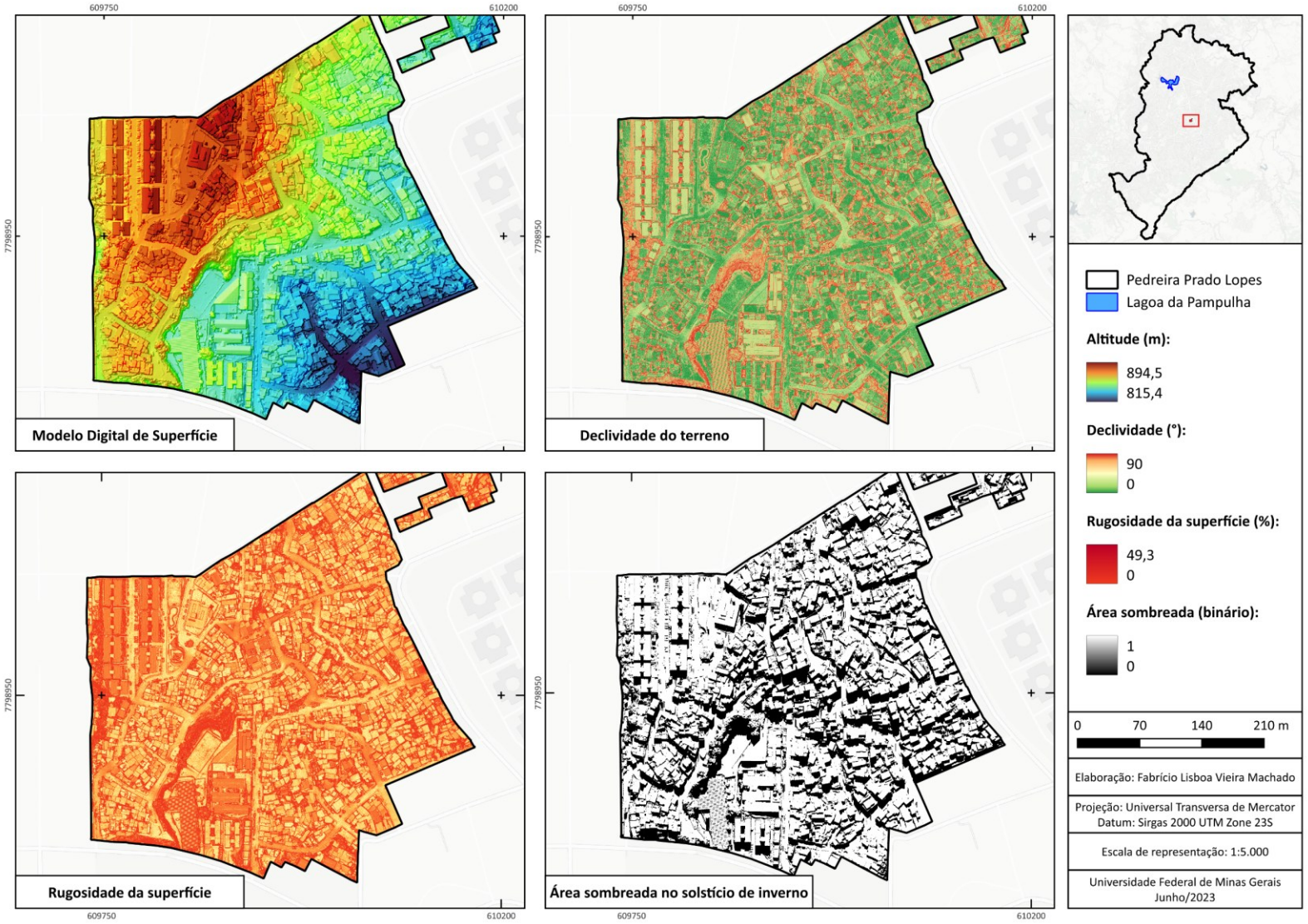
Dada a discutida particularidade topográfica da Vila Sumaré, com pouca variação altimétrica e situação de depressão relativa (Figura 57), a comunidade foi aquela que registrou os menores valores médios de declividade e rugosidade da superfície dentre as Unidades Amostrais da pesquisa (22,4° e 33,2%). O comportamento do sombreamento, porém, foi o segundo maior registrado (30,7%), fato que, supõe-se, estar relacionado com a disposição das edificações e ao agrupamento de construções com maior número de pavimentos em reduzida unidade de área, o que culmina no aumento da projeção das sombras.

É importante reforçar que o cálculo desse indicador foi sempre baseado na divisão do quantitativo de área sombreada pela área total da comunidade, de modo que a influência da extensão territorial das distintas Unidades Amostrais não repercutisse nos valores registrados, tornando-os comparativos.

A Cabana do Pai Tomás, por fim, registrou valores intermediários em todas as variáveis morfométricas, o que é justificado pela diversidade da cobertura da terra e de formas das edificações ao longo do extenso território da comunidade. Em outras palavras, mesmo com razoável variação altimétrica, densidade de habitações, presença de fragmentos vegetais e de campos de futebol, os elementos se misturam à diversidade paisagística da área de estudo, posicionando-a de maneira intermediária. Como ilustrado na Figura 58, a razão de área sombreada foi de 29,6%, a declividade média do terreno foi de 23,8° e a rugosidade média foi de 39,4%.

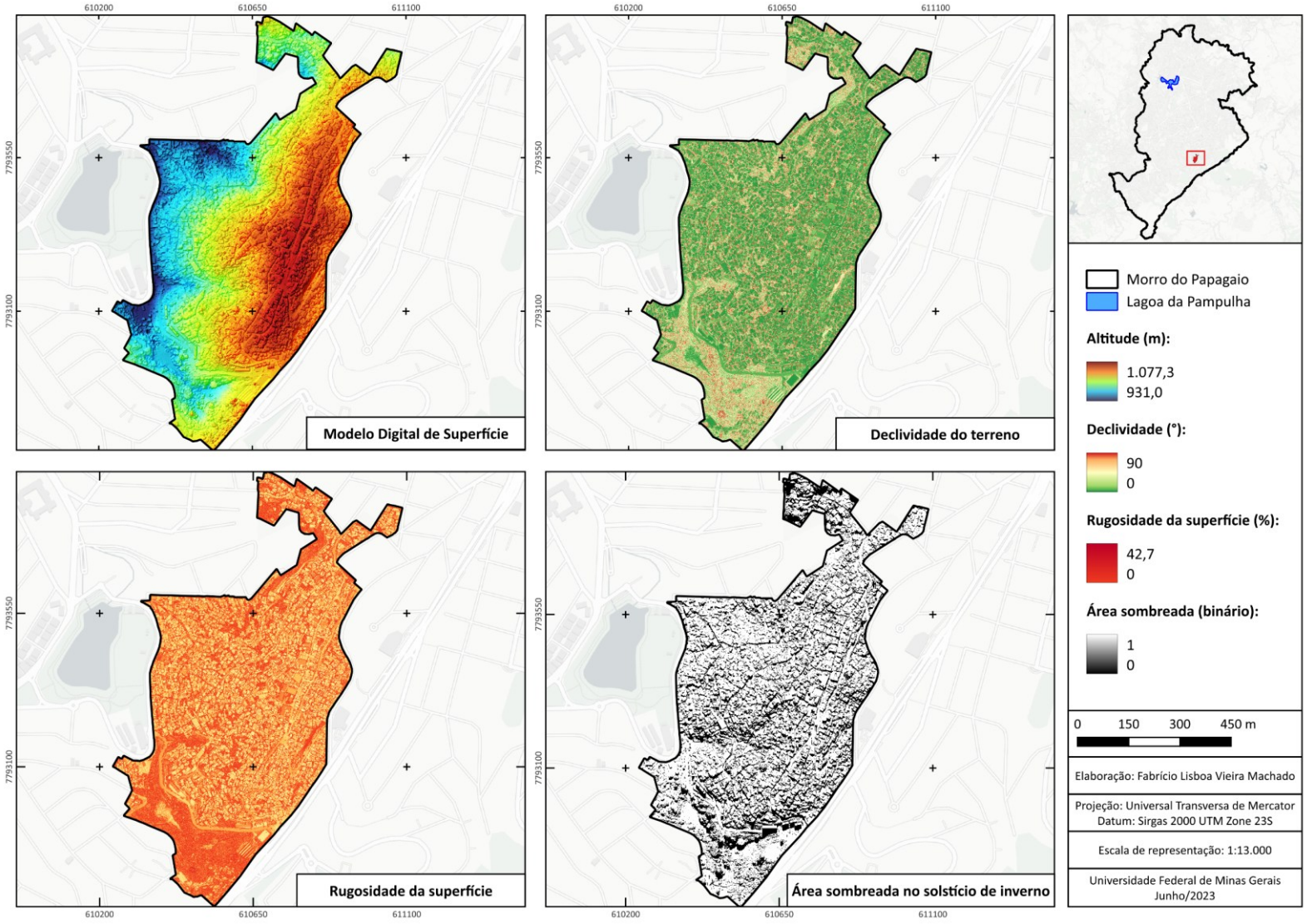
Importante destacar que os valores das variáveis morfométricas apresentadas refletem a situação da superfície de cada vila ou comunidade na época em que foi realizado o levantamento aerofotogramétrico em campo, conforme pode ser visualizado no Quadro 05 do capítulo metodológico da pesquisa.

Figura 54. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 1 - Pedreira Prado Lopes.



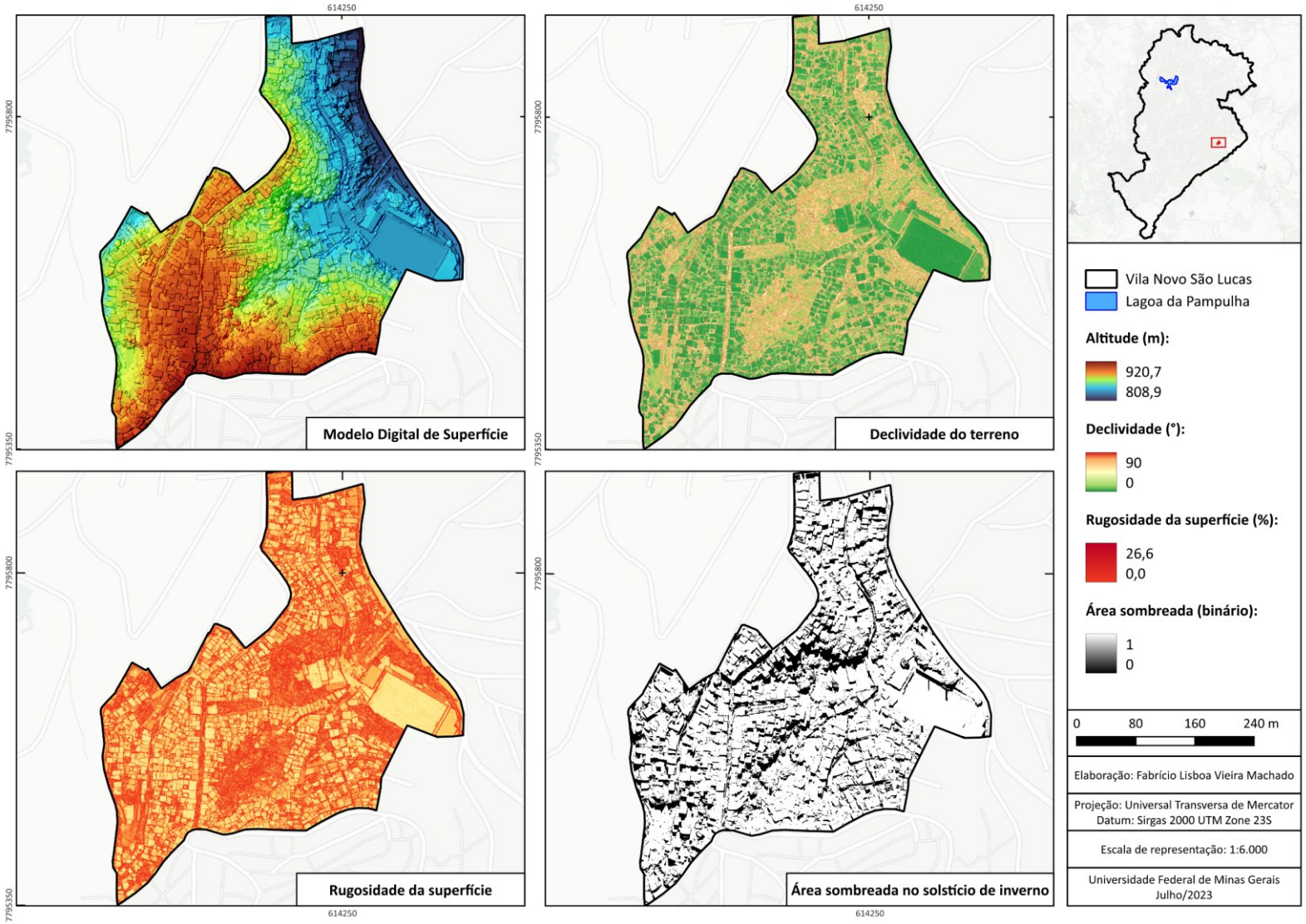
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 55. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 2 - Morro do Papagaio.



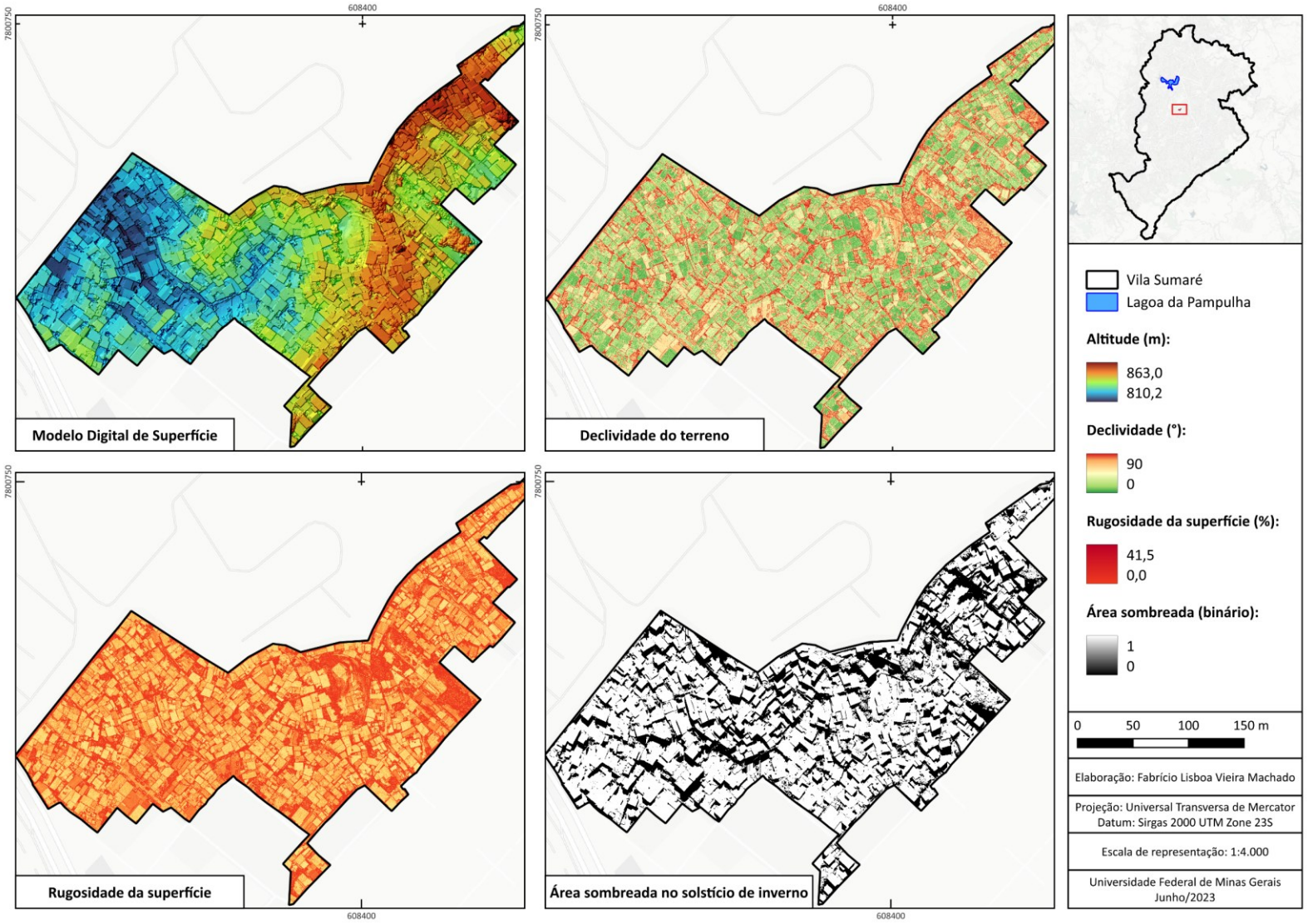
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 56. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 3 - Vila Novo São Lucas.



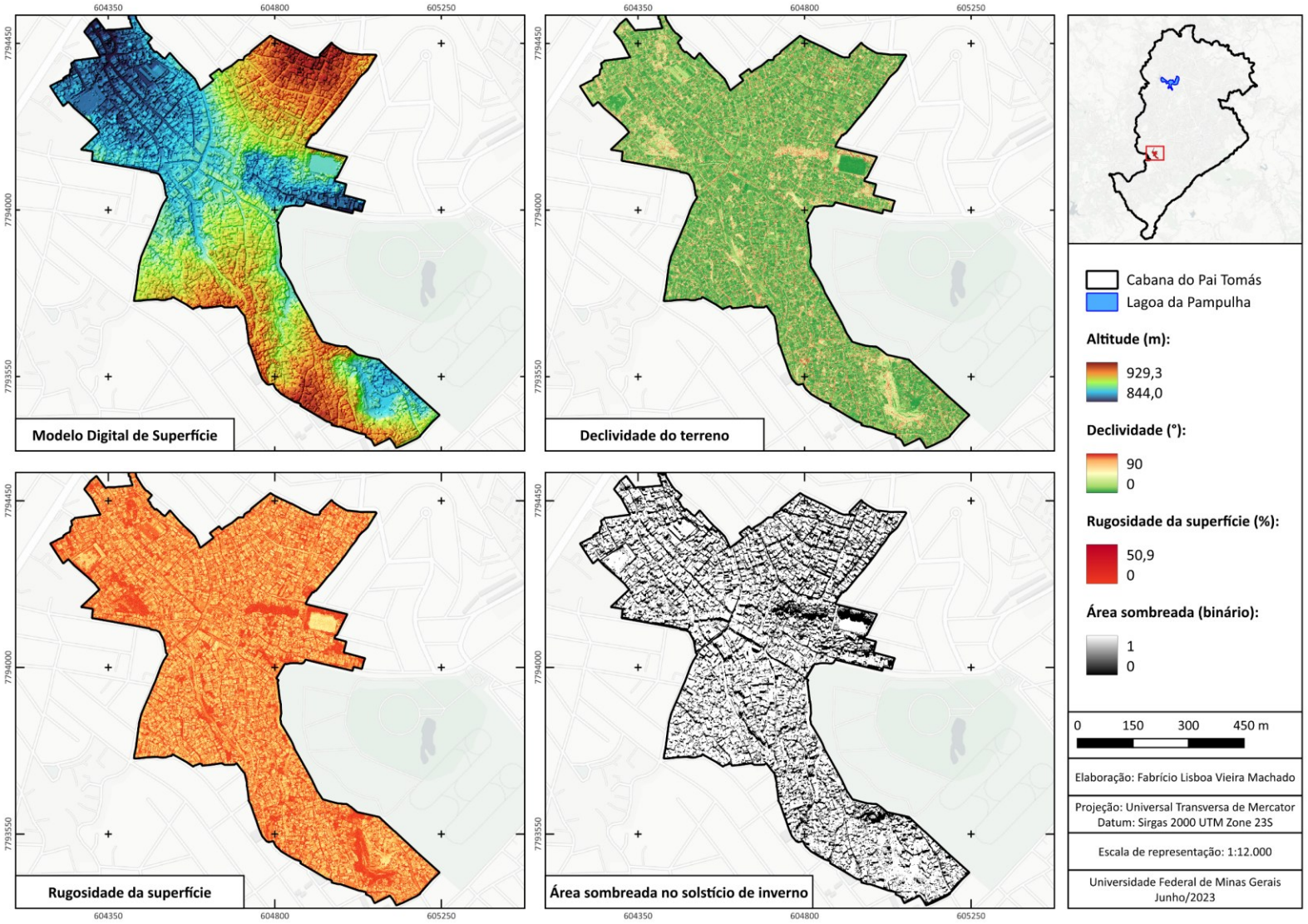
Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 57. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 4 - Vila Sumaré.



Fonte: Autoria própria, 2023.

Figura 58. Variáveis morfométricas calculadas a partir de processamento aerofotogramétrico digital para a Unidade Amostral 5 - Cabana do Pai Tomás.



Fonte: Autoria própria, 2023.

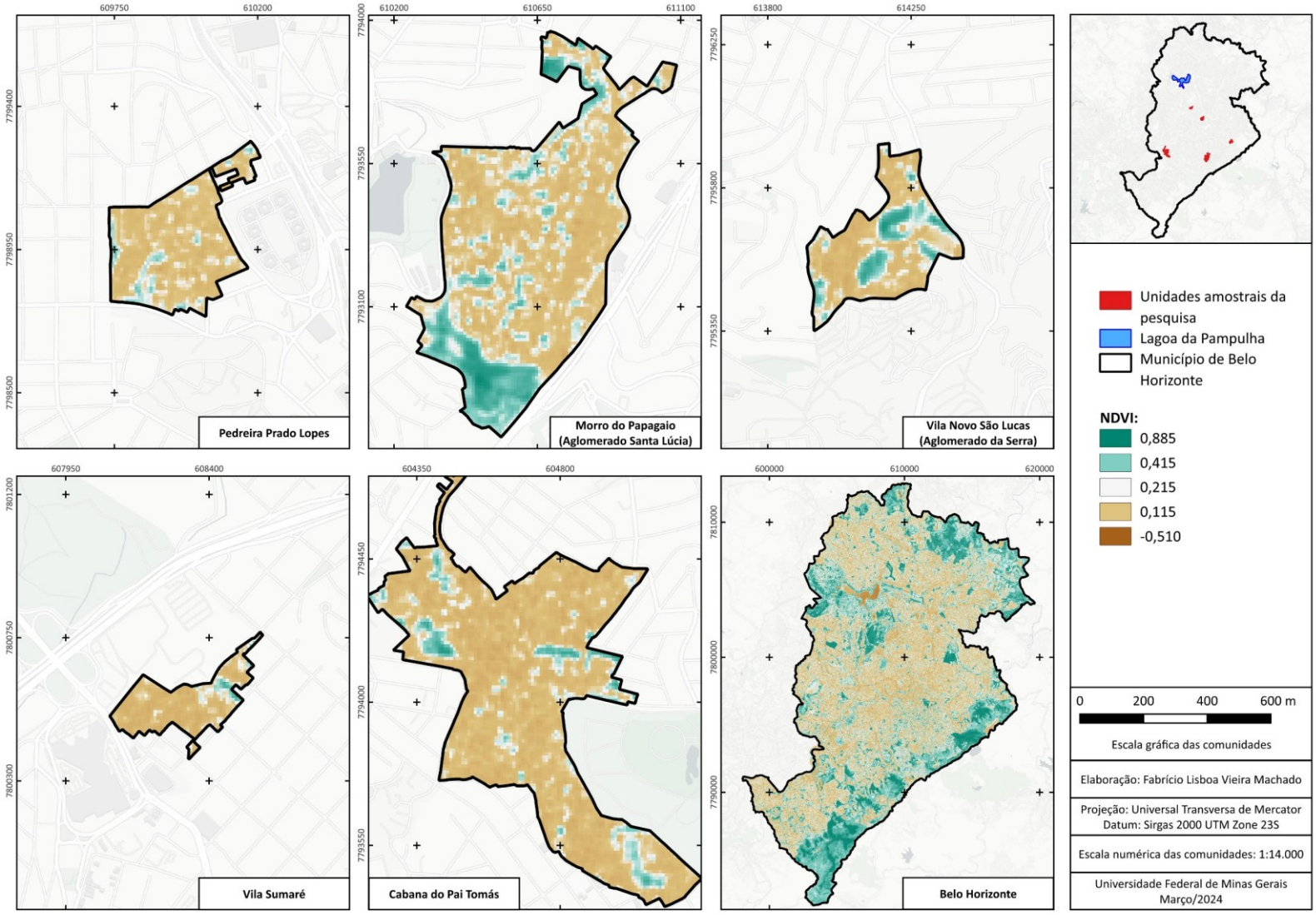
Quanto às últimas duas variáveis da ACP de caráter remotamente obtido, referentes à distribuição espacial das áreas vegetadas e edificadas das vilas e comunidades da pesquisa, cabe apresentar os resultados cartográficos dos valores médios do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada e do Índice de Edificação por Diferença Normalizada calculados. Como visto, os produtos foram gerados a partir das bandas espectrais do satélite Sentinel-2, com resolução espacial de 10 e 20 metros, respectivamente, e se referem ao intervalo temporal entre 2013 e 2021, tal como descrito no capítulo metodológico.

Ambos os índices espectrais são expressos no intervalo entre -1 e 1, em que quanto maior o resultado observado, no caso do NDVI, maior a concentração e a saúde da vegetação no interior da área de estudo. No caso do NDBI, quanto maiores forem os valores médios, mais significa que a superfície foi ocupada por formas urbanas (como concreto, cimento, asfalto, coberturas cerâmicas ou metálicas, etc.). São, portanto, índices opostos.

Como revelam os mapas das Figuras 59 e 60, elaborados em mesma escala, a Cabana do Pai Tomás foi a comunidade com maiores características de urbanização da superfície, registrando valor de NDBI médio de 0,197, enquanto o NDVI alcançou média de -0,129, associada a presença de fragmentos isolados no interior da extensão territorial da área de estudo. Em contraste, o Morro do Papagaio registrou o menor valor médio de NDBI (0,095) e o maior valor médio de NDVI (0,208), certamente associados à presença e ao vigor físico do fragmento florestal na porção sul da comunidade.

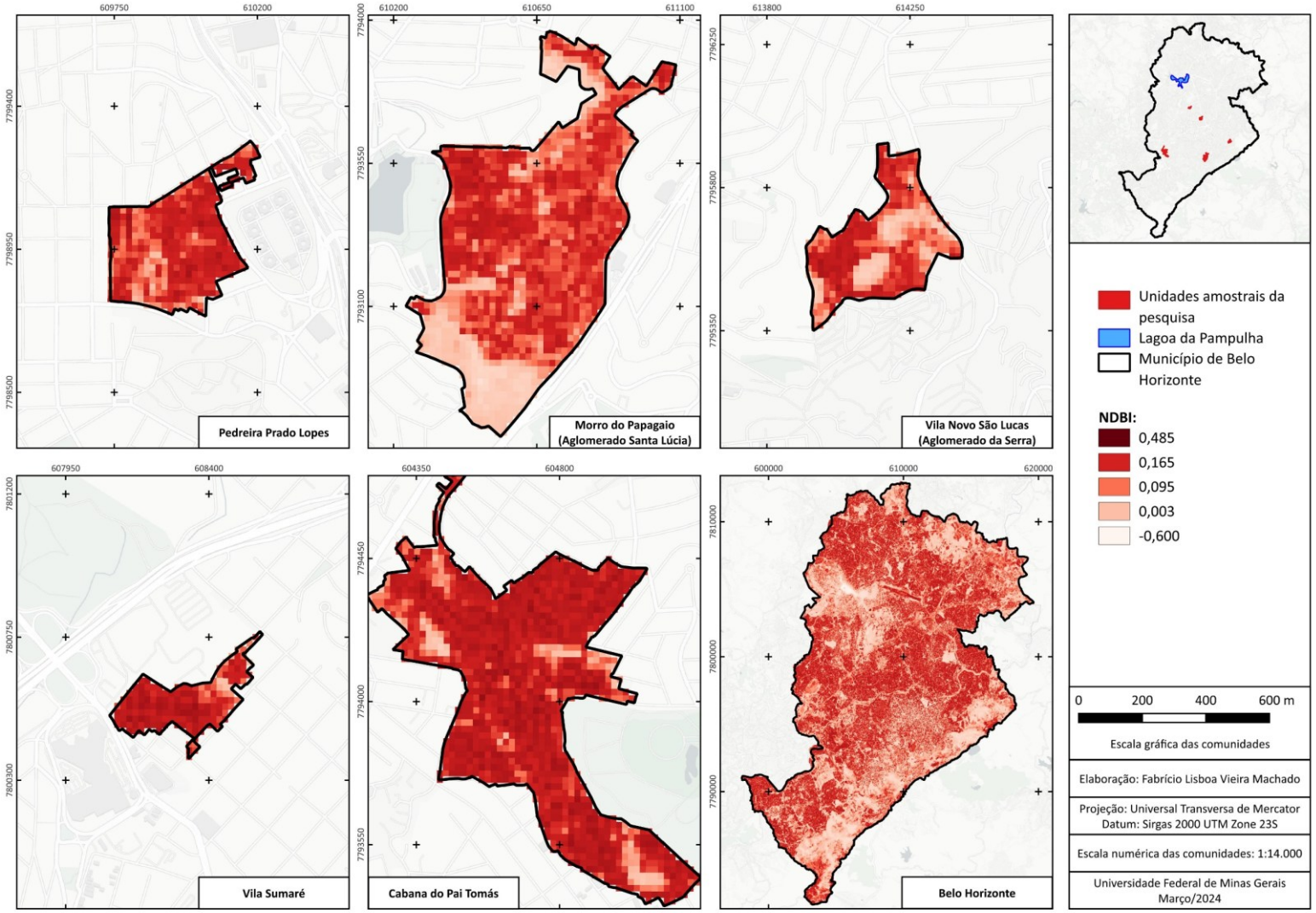
A Vila Sumaré e a Pedreira Prado Lopes tenderam a apresentar características de urbanização e de disposição da vegetação mais próximas à observada na Cabana do Pai Tomás, registrando NDBI médio de 0,185 e 0,159 e NDVI médio de 0,111 e 0,129, respectivamente. Inclusive as figuras citadas revelam padrões de distribuição espacial muito semelhantes não somente entre as comunidades citadas, mas entre o Morro do Papagaio e a Vila Novo São Lucas também. Essa última, finalmente, registrou valores médios de NDVI de 0,198 e de NDBI da ordem de 0,106, também associados à existência de fragmentos vegetais mais robustos no interior da área de estudo.

Figura 59. Distribuição espacial da variável NDVI (média 2015 a 2021) nas Unidades Amostrais da pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Figura 60. Distribuição espacial da variável NDBI (média 2015 a 2021) nas Unidades Amostrais da pesquisa.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Postos os resultados gerais das variáveis remotas que compõem o modelo de Análise de Componentes Principais, partiu-se a sua implementação propriamente dita. Inicialmente, a ACP foi calculada a partir do conjunto das 17 variáveis meteorológicas e geográficas descritas no capítulo metodológico da pesquisa, cujos valores de entrada do modelo refletem comportamento individual de cada Unidade Amostral.

É muito importante destacar que, no caso dos dados de entrada que deveriam vir do monitoramento de campo da Vila Sumaré no período úmido, que não ocorreu por questões logísticas envolvendo o colaborador responsável pelo acesso ao espaço, foram preenchidos valores médios baseados no comportamento das demais vilas e comunidades.

A ACP, portanto, não considerou os dados do posto de controle do bairro Xangrilá e nem da estação INMET Pampulha, seja para preenchimento dos dados faltantes da Vila Sumaré ou para fins da modelagem estatística propriamente dita. Isso é justificado pelo fato de que seu objetivo principal foi extrair informações latentes aos dados especificamente das vilas e comunidades selecionadas, revelando padrões inerentes às paisagens de maior interesse à pesquisa e promovendo melhor orientação para distribuição assertiva dos pesos na implementação do indicador final.

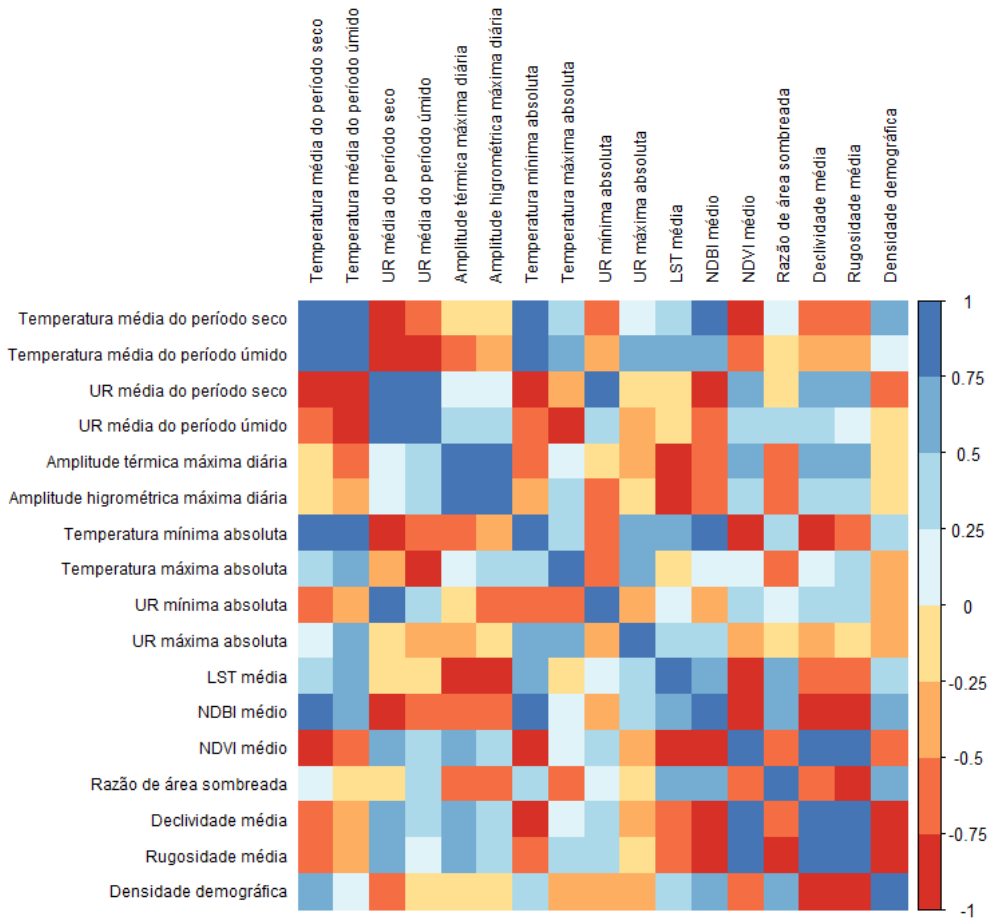
O primeiro resultado gerado pela ACP, referente à matriz de correlação entre as variáveis, indicou comportamento interessante no que diz respeito à temperatura média do período seco e à temperatura mínima absoluta, que demonstraram correlação positiva forte com os valores de cobertura edificada no interior das comunidades (variável identificada no diagrama da Figura 61 como NDBI), cujos coeficientes foram de 0,844 e 0,920, respectivamente.

Isso reforça o papel das superfícies impermeabilizadas na alteração do balanço energético dos espaços estudados e ainda destaca a influência no clima urbano, ao resguardar relação linear da densidade de edificações com a variação das temperaturas mínimas. A temperatura média no período seco, por sua vez, também apresentou correlação razoável com a variável de caráter socioeconômico do modelo (densidade demográfica), tendo registrado valor de 0,749, indicando

influência, ainda que indireta, do papel das atividades humanas na configuração dos padrões térmicos observados.

Em relação à umidade relativa do ar, a maior correlação positiva foi registrada na média do período seco com a variável responsável por considerar o aspecto da cobertura vegetacional no interior das comunidades (NDVI), alcançando coeficiente tímido de 0,686. Curiosamente, os valores absolutos ou médios do período úmido de umidade relativa do ar não registraram correlação positiva forte com nenhuma variável geográfica do modelo, sobretudo com o NDVI (apenas 0,409), o que sugere que a contribuição da parcela de vegetação na advecção de vapor d'água e geração de saldo de umidade no interior das favelas estudadas é tímida ou ineficiente.

Figura 61. Diagrama da matriz de correlação das variáveis da ACP implementada[47]. Tons azuis indicam correlação positiva, ao passo que tons vermelhos indicam correlação negativa.



Fonte: Autoria própria, 2024.

[47] Devido ao tamanho, a tabela contendo os valores numéricos da matriz de correlação se encontra disponível para consulta na seção de Apêndices da pesquisa.

Quanto à temperatura de superfície terrestre (LST), a ACP permitiu observar correlação negativa forte com os valores de amplitude térmica e higrométrica máxima diária (-0,998 e -0,860), o que pode indicar duas situações: i) a resolução espacial do sistema sensor utilizado para estimativa da LST foi mais uma vez incompatível com a escala de análise do clima em favelas; ou ii) as amplitudes térmica e higrométrica não foram variáveis muito explicativas no modelo, visto que também não apresentaram correlação linear significativa com nenhuma outra variável a não ser entre si mesmas. Sobre esse último ponto, ao apresentar os escores de participação de cada variável na definição das Componentes Principais, a suposição poderá ser confirmada.

Ainda sobre a LST, vale destacar sua razoável correlação positiva com o NDBI (0,723), ratificando a relação linear entre a urbanização e o aumento da temperatura superficial, principalmente quando analisadas a partir da mesma fonte de observação (sensores remotos).

Variáveis geográficas derivadas de produtos da aerofotogrametria, como a declividade e a rugosidade do terreno, estiveram fortemente e positivamente correlacionadas entre si (0,951) e com o NDVI (0,982 e 0,902). No primeiro caso, por se tratar de variáveis morfométricas do terreno, era esperada a correlação observada. Já em relação ao NDVI, a linearidade observada pode ser entendida como uma limitação, visto que o dossel da vegetação em cada vila ou comunidade apresenta uma rugosidade natural, que não pôde ser removida sem prejuízo à completude dos dados cartográficos matriciais (rasters) que foram utilizados para geração das variáveis, o que acabou por contabilizar essa parcela de rugosidade do dossel vegetacional nos valores médios de entrada do modelo.

Cabe também destacar que, devido às propriedades físicas do vapor d’água, amplamente discutidas ao longo da pesquisa, os valores médios e absolutos de temperatura e umidade relativa do ar sempre se mostraram negativamente correlacionados, especialmente no primeiro caso, em que chegaram a registrar coeficiente de -0,991 na média do período seco.

A implementação da ACP propriamente dita resultou em quatro Componentes Principais, ou eixos, conforme descritas na Tabela 09.

Tabela 09. Percentual de variância explicada por cada Componente Principal calculada.

Componente	Eigenvalue	Variância explicada (%)
1	9,11938	53,643
2	4,14463	24,380
3	2,58131	15,184
4	1,15469	6,792

Fonte: Autoria própria, 2024.

Em consonância com Jackson (1993), apenas os eixos 1 e 2 da ACP foram considerados de fato representativos face às variáveis empregadas no modelo. Juntos, foram responsáveis por explicar mais de 75% da variância global do modelo, fato que direciona a análise apresentada a seguir apenas aos resultados dos primeiros dois eixos. Se considerados, ainda que em menor atenção, os resultados do eixo 3, o percentual de explicação global do modelo alcança mais de 93%, somando as três primeiras componentes.

As variáveis com maior participação na caracterização do eixo 1 se referiram substancialmente ao campo térmico das Unidades Amostrais e aos principais fatores geográficos que o condicionam. Como pode ser visto na Tabela 10, as maiores correlações foram obtidas pelas variáveis temperatura mínima absoluta (0,952) e NDBI médio (0,995), o que destaca a reconhecida influência da urbanização na variabilidade da temperatura, especialmente das mínimas. Inversamente, as variáveis declividade média (-0,931) e NDVI médio (-0,975) revelaram que a topografia acidentada e a presença de vegetação no interior das comunidades são fatores importantes para a atenuação da temperatura do ar, pelo menos nas escalas climáticas trabalhadas.

Por sua vez, o eixo 2 da ACP, embora tenha explicado menor percentual da variância global do modelo, permitiu verificar característica interessante referente à disposição das formas e geometrias urbanas específicas das comunidades. Isso porque as maiores correlações foram obtidas, inversamente, pelas variáveis temperatura máxima absoluta (0,954) e razão de área sombreada (-0,809), destacando que a presença de becos estreitos, tais como observados na seção anterior, que impedem a incidência de radiação direta solar sobre a superfície, podem contribuir para a diminuição dos registros máximos de temperatura. Também

guardam relação, por consequência, com a umidade relativa média do ar, que na variável referente ao período úmido alcançou correlação com o eixo 2 de -0,662.

Tabela 10. Correlação entre cada variável do modelo e as diferentes Componentes Principais.

Variáveis	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
Temperatura média do período seco	0,82985	0,38311	-0,31679	-0,25342
Temperatura média do período úmido	0,79931	0,40029	0,36725	-0,25688
UR média do período seco	-0,79007	-0,47809	0,31675	0,21655
UR média do período úmido	-0,59246	-0,66238	-0,32979	0,31856
Amplitude térmica máxima diária	-0,70633	0,43756	-0,54796	-0,09687
Amplitude higrométrica máxima diária	-0,52207	0,49564	-0,54426	0,43077
Temperatura mínima absoluta	0,95262	0,22870	0,15364	0,12890
Temperatura máxima absoluta	0,13573	0,95480	0,26146	0,03970
UR mínima absoluta	-0,44800	-0,68349	0,46658	-0,33829
UR máxima absoluta	0,38217	0,39384	0,55421	0,62585
LST média	0,72175	-0,49074	0,48436	0,06041
NDBI médio	0,99570	-0,06079	-0,04418	-0,05415
NDVI médio	-0,97565	0,15672	0,06686	-0,13814
Razão de área sombreada	0,55912	-0,80942	-0,13489	0,11840
Declividade média	-0,93139	0,17513	0,21744	-0,23360
Rugosidade média	-0,81326	0,37107	0,41702	-0,16433
Densidade demográfica	0,68321	-0,23317	-0,66579	-0,18861

Fonte: Autoria própria, 2024.

O eixo 3, por fim, revela comportamento contrastante entre a densidade demográfica das vilas e comunidades da pesquisa em comparação com os registros de umidade relativa máxima do ar, que em termos de correlação com a terceira componente, mostraram-se inversamente proporcionais (-0,665 e 0,554, respectivamente). A densidade demográfica, porém, acompanhou o comportamento das amplitudes térmicas e higrométricas, que também apresentaram correlação negativa com o eixo 3.

Do ponto de vista da participação de cada Unidade Amostral na configuração dos eixos da ACP, a Tabela 11 torna bastante clara a relação contrastante, principalmente do ponto de vista térmico e de disposição do sítio urbano, do Morro do Papagaio com a Cabana do Pai Tomás, situação que foi frequentemente evidenciada tanto na análise da influência dos tipos de tempo sobre os dados médios, quanto na análise rítmica do clima em unidade horária.

Ao registrar escores respectivos de -3,871 e 3,097, o Morro do Papagaio e a Cabana do Pai Tomás foram as principais Unidades Amostrais responsáveis pela explicação combinada do conjunto de variáveis do eixo 1 da ACP. No eixo 2, porém, a Pedreira Prado Lopes e a Vila Novo São Lucas foram estatisticamente preponderantes na explicação da relação entre o sombreamento gerado pelas geometrias urbanas com a variação da temperatura e umidade, fato provavelmente associado à existência de vias mais largas e mais bem estruturadas no interior da Pedreira, que favorecem a advecção de ar e diminuem o aprisionamento de calor entre as edificações.

Tabela 11. Escores de participação de cada Unidade Amostral na configuração das diferentes Componentes Principais.

Unidade Amostral	PC 1	PC 2	PC 3	PC 4
UA1 - Pedreira Prado Lopes	0,7963	-2,2013	1,4630	1,1434
UA2 - Morro do Papagaio	-3,8713	-1,6397	-0,9384	-0,8089
UA3 - Vila Novo São Lucas	-2,3842	2,9354	0,8967	0,4636
UA4 - Vila Sumaré	2,3617	0,5454	-2,3675	0,6314
UA5 - Cabana do Pai Tomás	3,0975	0,3602	0,9463	-1,4295

Fonte: Autoria própria, 2024.

Conforme informado no capítulo metodológico da pesquisa, o conjunto das 17 variáveis da ACP foi utilizado no cálculo do modelo estatístico multivariado em dois momentos distintos. O primeiro deles foi o apresentado até aqui, que culminou nos resultados combinados considerando tanto as variáveis meteorológicas (empiricamente obtidas), quanto as de caráter geográfico (remotamente obtidas), cuja entrada no modelo se deu a partir dos valores médios ou absolutos[48], o que resultou em reduzido tamanho amostral (n = 85).

Contudo, dado o número de observações disponíveis para as variáveis meteorológicas, oriundas do monitoramento realizado em trabalhos de campo, considerou-se importante implementar outras duas Análises de Componentes Principais, dessa vez empregando apenas os dados dos elementos climáticos mensurados no interior das vilas e comunidades nos períodos seco e úmido, em unidade diária.

[48] Como já destacado no capítulo metodológico, o conjunto de dados das variáveis geográficas não possuía a mesma temporalidade de observação que os dados meteorológicos de campo.

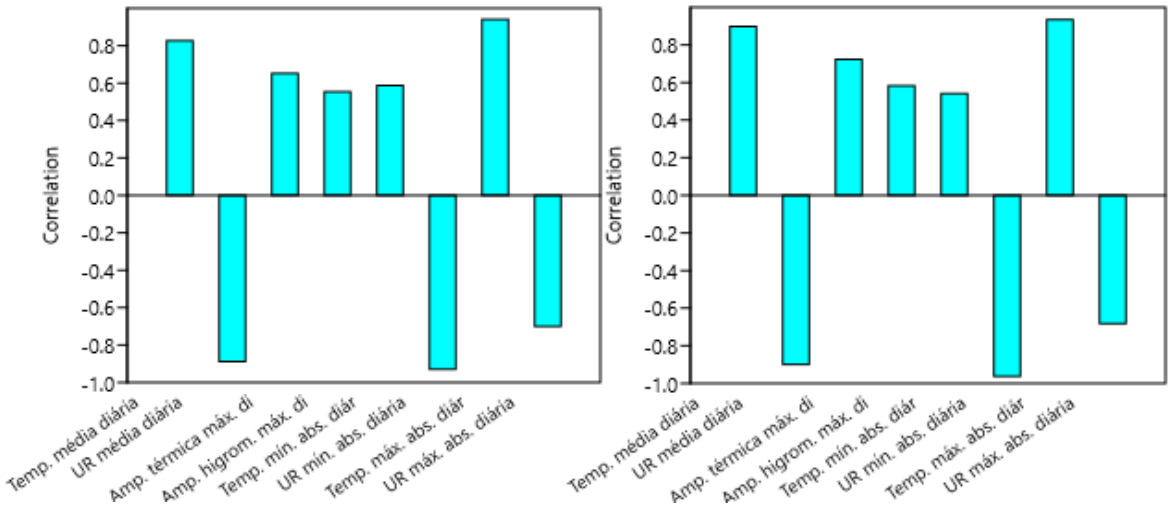
Buscou-se, com isso, isolar comportamentos cuja escala de análise fosse mais compatível com as áreas de estudo, evitando, ainda, a generalização potencialmente promovida pelo emprego das variáveis remotamente obtidas com distintas resoluções espaciais. Também vale destacar que o tamanho amostral das novas ACPs implementadas a partir dos dados meteorológicos foi significativamente maior (n = 1680 no período seco e n = 1824 no período úmido), uma vez que as entradas dos modelos se deram em intervalo diário.

Entretanto, os resultados obtidos nas ACPs realizadas a partir dos dados meteorológicos foram estatisticamente muito próximos dos observados na ACP completa inicial. O total de variância explicada no período seco esteve concentrado em mais de 84% apenas nos dois primeiros eixos (59,8% e 24,3%), assim como observado na ACP do período úmido, que teve mais de 85% da variância concentrada nos primeiros dois eixos (62,9% e 22,3%).

Tomando por base apenas o eixo 1, as correlações observadas entre as variáveis meteorológicas e essa componente, tanto no período seco, quanto no período úmido, refletiram características semelhantes às observadas na ACP completa, com destaques à relação contrastante, mas altamente explicativa, da temperatura e umidade relativa do ar e a menor participação das amplitudes térmicas e higrométricas no modelo (Figura 62, a seguir).

Isso vai ao encontro do padrão de variabilidade dos elementos climáticos observado no Morro do Papagaio e na Cabana do Pai Tomás, que mais uma vez figuraram como Unidades Amostrais que, inversamente, melhor caracterizaram o comportamento do eixo 1, o que reforça a dinâmica topoclimática oposta entre as comunidades.

Figura 62. Correlações entre as variáveis meteorológicas do período seco e úmido e o eixo 1 das novas Análises de Componentes Principais implementadas.



Fonte: Autoria própria, 2024.

4.4.2 Síntese e ranqueamento das Unidades Amostrais

O esforço final da pesquisa visa sintetizar o comportamento das variáveis discutidas em um ranqueamento das comunidades, representativo do grau de antropização climática em escala inferior. Para tanto, à luz do arcabouço teórico-metodológico do pesquisador, do referencial bibliográfico construído, do conhecimento analítico dos tipos de tempo predominantes sob a área de estudo, dos padrões de variação termo-higrométrica média e horária das comunidades e do conhecimento da participação estatística de cada variável na explicação geral do modelo, parte-se, agora, para o estabelecimento dos fatores ponderadores.

Os pesos foram distribuídos entre as 17 variáveis em intensidades que variam de 1,0 a 15,0 pontos, seguindo subdivisões da ordem de 2,5 pontos, cujo somatório resulta no total de 100,0 pontos. O maior peso para cálculo do IACF foi aplicado à variável “temperatura mínima absoluta”, cujos resultados da Análise de Componentes Principais indicaram ser a variável que, do ponto de vista estatístico, figura como a mais representativa do modelo.

Os resultados obtidos pela ACP também corroboram com os advindos da análise técnica dos dados de campo da pesquisa, permitindo atribuir peso 10,0 às variáveis “temperatura média do período seco” e “temperatura máxima absoluta”, que notadamente tiveram padrão associado à dinâmica climática própria das vilas e

comunidades, em especial na Cabana do Pai Tomás. Especialmente no caso da primeira variável citada, sua ponderação encontra apoio na revisão bibliográfica realizada, no que diz respeito à participação dos elementos urbanos na alteração climática em escalas inferiores.

As variáveis meteorológicas “umidade relativa do ar média do período seco” e “umidade relativa do ar máxima absoluta”, receberam pontuação intermediária pelo razoável desempenho que obtiveram na explicação estatística dos resultados da ACP, além de figurarem como elementos sensíveis à imposição das agudas formas urbanas sob seu comportamento, o que foi observado com propriedade em quase todas as vilas e comunidades, à exceção relativa do Morro do Papagaio.

Da mesma maneira, as variáveis geográficas “NDBI médio” e “NDVI médio” receberam pontuação idêntica em função da razoável participação na explicação da variância global da ACP, ainda que sejam oriundas do processamento digital de imagens de sensores remotos com média resolução espacial, razoavelmente compatíveis com a escala da pesquisa.

Por outro lado, mesmo que os produtos derivados do levantamento aerofotogramétrico sobre as comunidades apresentassem altíssima resolução espacial, compatível com a escala de trabalho da pesquisa, e que suas contribuições efetivas na ACP tenham sido razoáveis, o fato do dossel vegetacional impactar negativamente na geração das variáveis “razão de área sombreada”, “declividade média” e “rugosidade média” levou o pesquisador a concluir que deveriam receber menor ponderação, distribuída entre 2,5 e 5,0 pontos.

Dessa forma, buscou-se eliminar o viés que as variáveis poderiam agregar ao modelo, ainda que sejam importantes no balanço de energia e configuração climática dos espaços. A Tabela 12, apresenta a seguir, descreve a distribuição dos pesos proposta pelo pesquisador.

Tabela 12. Matriz de pesos propostos para cada variável para cálculo do Índice de Antropização Climática em Favelas.

Variáveis	Peso
Temperatura média do período seco	10,0
Temperatura média do período úmido	5,0
UR média do período seco	7,5
UR média do período úmido	5,0
Amplitude térmica máxima diária	2,5
Amplitude higrométrica máxima diária	1,5
Temperatura mínima absoluta	15,0
Temperatura máxima absoluta	10,0
UR mínima absoluta	5,0
UR máxima absoluta	7,5
LST média	2,5
NDBI médio	7,5
NDVI médio	7,5
Razão de área sombreada	5,0
Declividade média	5,0
Rugosidade média	2,5
Densidade demográfica	1,0

Fonte: Autoria própria, 2024.

Ainda vale destacar que as variáveis referentes às amplitudes térmicas e higrométricas máximas, apesar relevantes na análise rítmica realizada em unidade horária nas vilas e comunidades, não obtiveram participação satisfatória na ACP e nem se correlacionaram significativamente com nenhuma outra variável, recebendo, por essa razão, os menores fatores de ponderação, juntamente das variáveis “temperatura de superfície média” e “densidade demográfica”.

As últimas variáveis citadas guardam relação, respectivamente, com a menor compatibilidade com a escala de trabalho da pesquisa e com a superestimação que poderiam promover aos resultados, ainda mais por se tratar de variável de participação indireta na compreensão dos aspectos do clima em favelas, no caso da “densidade demográfica”. Em outras palavras, foram importantes para a compreensão geral do contexto local em que as favelas estão inseridas, mas contribuem em menor grau ao indicador sintético do nível de antropização climática das áreas de estudo.

Uma vez definidos os pesos do IACF, cabe destacar que, anteriormente ao cálculo da média ponderada que dá origem ao modelo, os valores originais das

variáveis consideradas na matriz de análise multicritério também foram alvos de exercícios de padronização e normalização, tendo em vista suas distintas unidades de medida e escalas de grandeza.

Entretanto, a padronização é uma métrica estatística baseada na razão da diferença entre o dado original e a média do conjunto de dados, pelo desvio padrão populacional, tal como exibido na equação 7 abaixo. Dessa forma, a técnica sempre irá resultar em média com valor zero, o que inviabilizaria seu emprego na transformação das variáveis originais da matriz de análise multicritério do IACF em um mesmo intervalo (0 a 1), tendo em vista que o cálculo final do indicador é baseado justamente na média ponderada das variáveis.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \qquad (7)$$

Onde:

X = Valor original da variável;
μ = Média do conjunto de dados;
σ = Desvio padrão do conjunto de dados.

A primeira tentativa de normalização das variáveis no intervalo de 0 a 1, porém, foi igualmente insatisfatória, por ter sido baseada na razão da diferença entre os valores máximos e mínimos do conjunto total de dados originais, vide equação 8. Isso resultou na atribuição sistemática dos valores nulos ou muito próximos de zero à variável “umidade relativa do ar máxima”, tendo em vista que, em função da sua participação no modelo com papel inversamente proporcional[49], essa variável foi a que registrou os menores valores normalizados, dentre todo o conjunto de dados.

Da mesma forma, os maiores valores reescalonados pela tentativa de normalização inicial foram integralmente atribuídos à variável “densidade demográfica”, o que resultou no considerável aumento da sua participação no cálculo do IACF, fato que não pôde ser corrigido simplesmente pela diminuição do peso atribuído, que já era o menor dentre as 17 variáveis.

[49] As variáveis com essa característica tiveram seus dados originais multiplicados por -1 para que desempenhassem contraponto ao modelo, ou seja, quanto maior o valor registrado, menor a influência no grau de antropização climática da Unidade Amostral.

$$X_{changed} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (8)$$

Onde:

X = Valor original da variável;
X_{min} = Menor valor global do conjunto de dados;
X_{max} = Maior valor global do conjunto de dados.

Dessa forma, criou-se típica condição em que foi necessário realizar o ajuste de *outliers*[50] para resolver o problema da influência dos valores extremos na normalização e ponderação dos dados, de forma com que todas as variáveis do modelo pudessem contribuir de maneira equilibrada ao cálculo do indicador.

Para isso, a equação de normalização foi novamente implementada, mas de maneira não mais baseada na razão dos valores mínimos e máximos do conjunto total de dados, e sim na sua distribuição interna em cada uma das variáveis do modelo. De tal modo, os intervalos de 0 a 1 foram reposicionados levando em conta o comportamento dos valores extremos dentro de cada variável, o que permitiu que os dados originais de entrada da matriz de análise multicritério do IACF fossem devidamente normalizados e ponderados de maneira mais equilibrada.

Vale destacar que os quantitativos assinalados em cor cinza na Tabela 13, a seguir, se referem às variáveis para as quais não foi possível a obtenção de dados empíricos (Vila Sumaré), sendo adotada a média das demais Unidades Amostrais para preenchimento de lacunas e cálculo da média ponderada final.

[50] Estatisticamente definido por Hawkins (1980) como sendo um valor que se diferencia significativamente dos demais valores de um conjunto de dados e que não se ajusta ao padrão geral observado. A presença de *outliers* em uma amostra pode influenciar substancialmente a análise estatística, sendo importante identificá-los e tratá-los de maneira adequada.

Tabela 13. Valores originais registrados pelas Unidades Amostrais em cada variável do modelo.

Variáveis	Pedreira Prado Lopes	Morro do Papagaio	Vila Novo São Lucas	Vila Sumaré	Cabana do Pai Tomás
Temp. do ar média do período seco (°C)	21,0	20,8	21,3	22,5	22,5
Temp. do ar média do período úmido (°C)	24,8	24,2	24,9	24,9	25,6
Umidade relativa do ar média do período seco (%)	-56,7	-57,2	-55,3	-52,4	-52,6
Umid. relativa do ar média do período úmido (%)	-68,4	-69,2	-67,0	-67,7	-66,0
Amplitude térmica máxima (°C)	10,5	12,6	12,5	12,0	10,9
Amplitude higrométrica máxima (%)	34,9	36,6	37,9	37,5	33,8
Temperatura do ar mínima absoluta (°C)	11,5	9,5	10,9	11,9	12,2
Temperatura do ar máxima absoluta (°C)	34,4	34,0	36,5	35,1	35,5
Umid. relativa do ar mínima absoluta (%)	-21,4	-22,1	-19,4	-17,9	-20,5
Umid. relativa do ar máxima absoluta (%)	-91,5	-90,4	-91,5	-91,1	-91,1
Temp. de superfície média - LST (°C)	27,1	25,4	25,3	25,9	26,8
Cobertura edificada média - NDBI (%)	0,159	0,095	0,106	0,185	0,197
Cobertura vegetal média - NDVI (%)	-0,129	-0,208	-0,198	-0,111	-0,118
Razão de área sombreada no inverno (%)	0,327	0,286	0,228	0,307	0,296
Declividade média do terreno (°)	-23,8	-27,2	-27,0	-22,4	-23,8
Rugosidade média da superfície (%)	0,387	0,455	0,502	0,332	0,394
Densidade demográfica (hab./ha)	313,9	327,1	256,0	418,1	368,1

Fonte: Autoria própria, 2024.

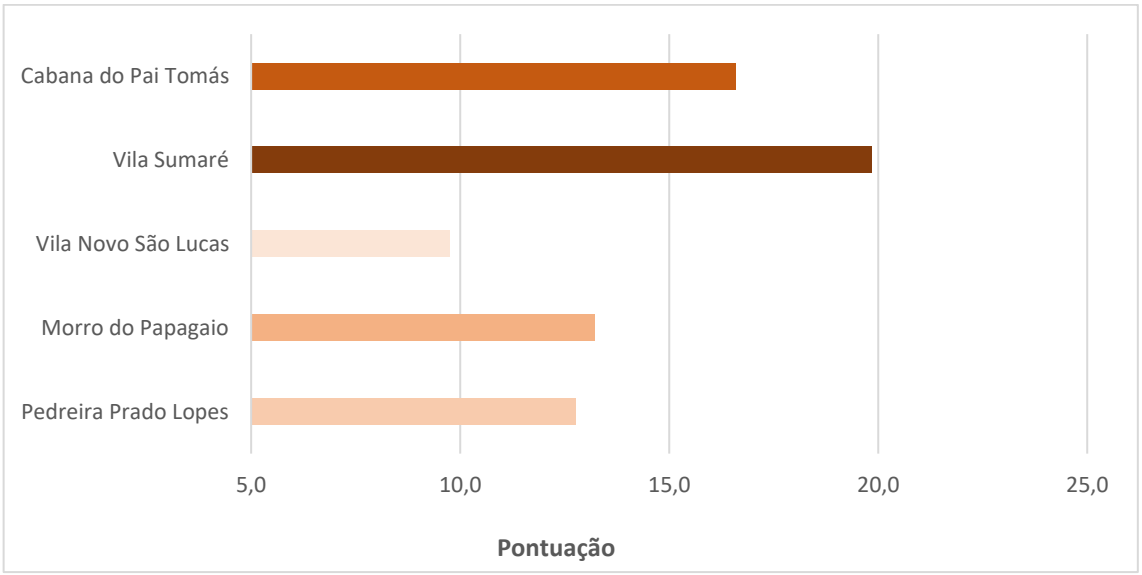
A pesquisa não retomará discussão sobre os valores apresentados na tabela anterior, porque nada mais são do que a organização de dados já apresentados e amplamente discutidos nos capítulos anteriores. Os valores normalizados estão disponíveis para consulta na seção de Apêndices.

Agora, parte-se finalmente para a apresentação do resultado do IACF, que sintetiza o grau de antropização climática em cada vila ou comunidade estudada na pesquisa, a partir da combinação média ponderada das variáveis. Importante dizer que, pelo fato de nem todas as variáveis empregadas no modelo serem passíveis de representação cartográfica na escala das Unidades Amostrais da pesquisa, o resultado da análise multicritério não se dará de maneira espacializada neste momento. Mais que isso, também não é objetivo da pesquisa apresentar a variação interna do IACF em cada comunidade, porque não há sentido nisso, visto que sua

função é sintetizar a combinação simultânea das variáveis como resposta individual ao grau de antropização.

Isso posto, torna-se importante exibir, primeiramente e com objetivos comparativos, o desempenho que o IACF alcançaria em contexto em que não foram aplicados quaisquer pesos sobre as variáveis, ou seja, o resultado da média aritmética simples do conjunto de dados que compõem o indicador (Figura 63), que resultam em valores adimensionais.

Figura 63. Pontuação não ponderada das Unidades Amostrais em relação ao Índice de Antropização Climática em Favelas.



Fonte: Autoria própria, 2024.

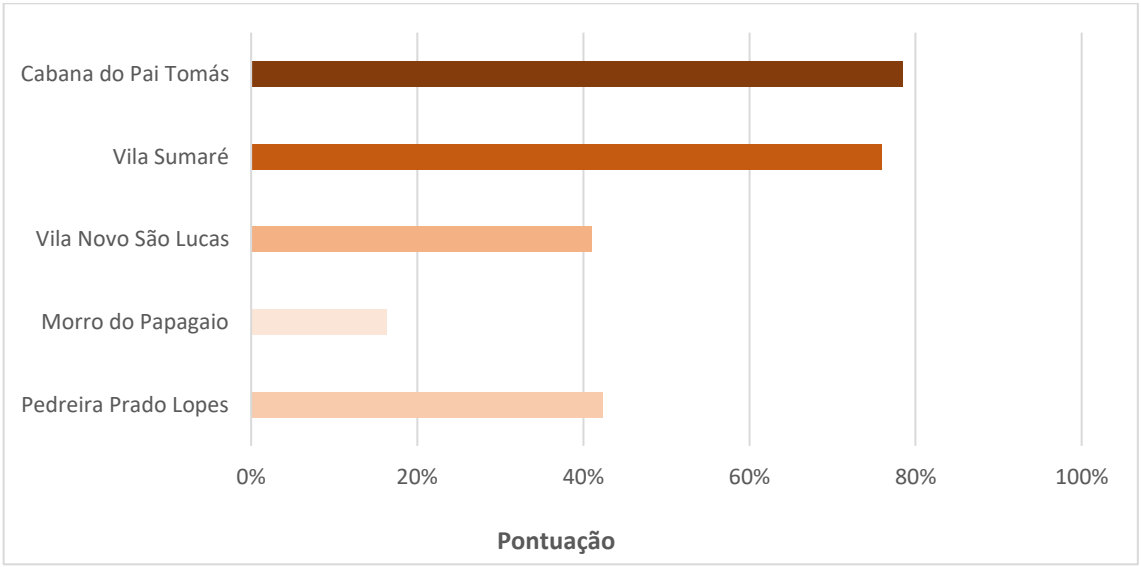
Como pode ser facilmente acima observado, se fosse tomado esse caminho para o cálculo do IACF, além de estatisticamente muito simplório e reducionista, além de climatologicamente equivocado do ponto de vista teórico e empírico, a superestimação de variáveis como a densidade demográfica e as diversas facetas da umidade relativa do ar responderiam por forte orientação do modelo em direção à Vila Sumaré como comunidade com maior grau de derivação topo ou microclimática, enquanto a Vila Novo São Lucas ocuparia a última colocação.

Esse fato não quer dizer que os resultados observados para a Vila Sumaré estejam em contrassenso com a dinâmica climática compreendida a partir da análise e interpretação dos dados de campo. Porém, a Vila Novo São Lucas certamente seria subestimada no modelo não ponderado, ao passo que o Morro do Papagaio, detentor das menores temperaturas médias e dos maiores valores de umidade

relativa do ar, tanto no período seco, quanto no período úmido, seria consideravelmente superestimado. De tal forma, a presente pesquisa emprega os fatores ponderadores apresentados para alinhar os pressupostos teórico-metodológicos com as condições observadas através da interação dos métodos de campo com os advindos da estatística multivariada, culminando em indicador com maior assertividade ao fenômeno sintetizado.

Como revela a Figura 64, o Índice de Antropização Climática em Favelas final da pesquisa elenca a Cabana do Pai Tomás como a comunidade de maior grau de derivação dos elementos atmosféricos por influência de seus fatores específicos de superfície, registrando pontuação de 78,4% (0,784 na média das variáveis ponderadas). Esse comportamento vai ao encontro de todo o esforço conduzido até aqui, que diante da integração dos mais diversos métodos e técnicas empregados ao longo da presente tese de doutorado, sempre culminou no posicionamento da Cabana do Pai Tomás como tal.

Figura 64. Pontuação final (ponderada) das Unidades Amostrais em relação ao Índice de Antropização Climática em Favelas.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Na sequência do ranqueamento aparece a Vila Sumaré (75,9%), que mesmo com a deficiência da ausência de dados empíricos durante o período hidrologicamente úmido da pesquisa, reuniu características do campo térmico e higrométrico do período seco, além do destacado papel do relevo no confinamento

topográfico da comunidade, que seguramente contribuíram para sua expressiva pontuação no IACF.

Com comportamento semelhante no ranqueamento, destacam-se a Vila Novo São Lucas (41%) e Pedreira Prado Lopes (42,3%), comunidades que, apesar da diferença realmente contrastante entre altitude e disposição da vertente, reuniram características de ocupação e edificação que foram responsáveis por desempenhos termo-higrométricos próximos, tanto no período seco, quanto no período úmido.

Por fim, e de maneira esperada em função de todos os aspectos meteorológicos ou geográficos que foram discutidos nas seções de resultados anteriores, aparece o Morro do Papagaio, comunidade detentora do menor percentual de antropização climática dentre as Unidades Amostrais da pesquisa, com pontuação de apenas 16,3% no IACF.

Como já discutido, não há qualquer evidência que corrobore para considerá-la como uma ilha de calor em Belo Horizonte, visto que em vasto número de episódios, seja no período seco ou úmido, apresentou temperaturas menores e umidades relativas maiores até mesmo do que as registradas no posto de controle do bairro Xangrilá e na estação INMET Pampulha, dada a imposição do fator relevo como controlador topoclimático.

4.5 Questões socioambientais derivadas e contribuições ao planejamento climático municipal

A pesquisa encerra com proposta de retomada das principais questões socioambientais derivadas da relação clima x paisagem, não somente nas vilas e comunidades selecionadas como Unidades Amostrais da pesquisa, mas em contexto mais amplo e representativo das 218 favelas que compõem Belo Horizonte. Diante das análises conduzidas e da compreensão da dinâmica do campo térmico e higrométrico dos locais de estudo, a presente seção é também o momento oportuno, ainda que brevemente, para se tratar de impactos[51] sobre as populações habitantes que, em primeira instância, são as maiores afetadas pelos fenômenos decorrentes.

Sem dúvida, o principal e de especial atenção nesta pesquisa são os advindos dos efeitos dos episódios de ondas de calor. Sem querer entrar na escala de trabalho da arquitetura ou na Geografia da Saúde, ainda é evidente perceber que as formas e materiais urbanos explorados na presente pesquisa, somadas à fragmentação de áreas verdes (principalmente de espécies de porte arbóreo) e à topografia onde estão instaladas, contribuem significativamente para que comunidades como a Cabana do Pai Tomás, Vila Sumaré ou Vila Novo São Lucas experimentem situações de picos térmicos mais agudos do que em bairros de Belo Horizonte com melhor ordenamento territorial.

A variabilidade natural do clima, somada às intensas transformações urbanas da superfície belo-horizontina ao longo dos anos, têm culminado em episódios de ondas de calor recorrentes, com recordes de temperatura sendo quebrados em curto intervalo de tempo, o que de certa forma contribuiu para a atenção da mídia e dos governos locais quanto à necessidade de se pensar o território de maneira alinhada à dinâmica atmosférica.

Ainda que em tom sensacionalista, veículos de imprensa cumprem papel importante ao noticiar os eventos climáticos e sua repercussão espacial. Em investigação das publicações recentes, não foi tarefa difícil encontrar dezenas de

[51] Conceito entendido nos moldes da Resolução Conama n° 01/1986, como sendo "*qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; e a qualidade dos recursos ambientais*".

reportagens que destaquem a atuação de sistemas atmosféricos na criação de situações de bloqueio e seu impacto sobre as populações, inclusive aquelas em condições de vulnerabilidade social. No segundo semestre de 2023, por exemplo, veículos tradicionais do rádio e jornal (Figuras 65 a 67) noticiaram o já citado recorde de temperatura do ar registrado pela estação INMET Pampulha à época, bem como a recorrência de episódios de ondas de calor e o risco associado à saúde humana, especialmente em favelas, locais cuja falta de estrutura urbana e de recursos financeiros maximiza os impactos negativos.

Figura 65. Manchete destacando o recorde de temperatura do ar alcançado pela estação INMET Pampulha em 25/09/2023.

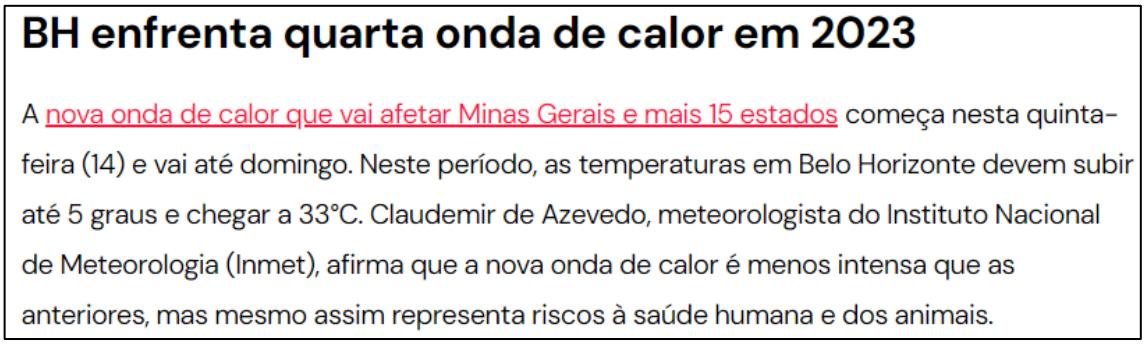
ONDA DE CALOR

BH registra o dia mais quente da história: 38,6 °C

A temperatura foi registrada na Estação Pampulha entre 13h e 14h, mas pode aumentar até o fim do dia

Fonte: Jornal Estado de Minas. Disponível em: https://bitlybr.com/tLpK.

Figura 66. Manchete de 13/12/2023, destacando a ocorrência do quarto episódio de onda de calor naquele ano.


BH enfrenta quarta onda de calor em 2023

A nova onda de calor que vai afetar Minas Gerais e mais 15 estados começa nesta quinta-feira (14) e vai até domingo. Neste período, as temperaturas em Belo Horizonte devem subir até 5 graus e chegar a 33°C. Claudemir de Azevedo, meteorologista do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), afirma que a nova onda de calor é menos intensa que as anteriores, mas mesmo assim representa riscos à saúde humana e dos animais.

Fonte: Rádio Itatiaia (portal online). Disponível em: https://bitlybr.com/SmiF.

Figura 67. Manchete de 16/11/2023, destacando condições microclimáticas comuns às vilas e comunidades de Belo Horizonte que impactam em recordes de temperatura do ar.

CALOR DESIGUAL

Calor em aglomerados de BH bate 43°C; falta de estrutura põe população em risco

Risco de complicações como estresse térmico é 40% maior para população em áreas vulneráveis

Fonte: Jornal O Tempo. Disponível em: https://bitlybr.com/mLEJ.

É importante destacar que a última matéria, apesar de bem elaborada, incorporando entrevistas com professores universitários, médicos e pesquisadores

especialistas na temática, cita que os dados climáticos apresentados são oriundos de estudo publicado na revista AGU Earth's Future, em 2022. Porém, foi realizado esforço de verificação de todos os volumes do periódico publicados naquele ano e não foram encontradas referências à temática de ilhas de calor em vilas, comunidades ou favelas de Belo Horizonte[52]. Os diálogos com moradores e informações apresentadas, entretanto, destacam aspectos importantes da realidade de grande parcela dos habitantes nesses espaços, que têm de lidar com meios improvisados para diminuição do estresse térmico, muitas vezes sem a garantia de acesso ao meio mais básico e universal: a água.

Nas palavras literais da matéria: "*Onde os cômodos são apertados, ventilador é luxo e falta de água é rotina*", retrato dessa parcela da população que reforça a importância do abrigo e da qualidade do descanso na saúde e bem-estar do trabalhador habitante de favela.

Muitos governos locais possuem planos de enfrentamento e/ou adaptação às mudanças climáticas globais, mas pouco questionam sobre a aplicabilidade das propostas aos espaços climáticos organizados em escalas inferiores, que são alvos diretos dos principais impactos socioambientais desencadeados pela relação superfície-atmosfera, tais como descritos nos exemplos envolvendo vilas e comunidades.

No caso da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), está instituído desde 2006, através de Decreto Municipal, o Comitê de Mudanças Climáticas e Ecoeficiência, com objetivo, tal como descrito no site oficial, de "*apoiar a implementação da política municipal da Cidade de Belo Horizonte para as mudanças climáticas, atuando na articulação das políticas públicas e da iniciativa privada que visem à redução das emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos, à redução na produção de resíduos sólidos e maior eficiência nos processos de reutilização e reciclagem de resíduos; ao incentivo a utilização de fontes de energia renováveis, melhoria da eficiência energética e uso racional de energia e ao aumento da consciência ambiental dos cidadãos*".

[52] Inclusive foram utilizados recursos avançados de inteligência artificial, provenientes da linguagem GPT-4o, para busca do artigo na *web*, mas sem sucesso.

Em termos práticos, da constituição do Comitê aos dias atuais foram desenvolvidos diversos estudos de cunho técnico que endossaram a criação de políticas, planos e programas pela PBH, em que se destacam os Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa e, principalmente, o relatório técnico de Análise de Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas do município, elaborado por equipe de consultores da iniciativa privada com apoio da PBH, em 2016. A partir dos resultados obtidos e lições aprendidas, anos depois foi desenvolvido o Plano Local de Ação Climática de Belo Horizonte (2023), sob coordenadoria do *International Council for Local Environmental Initiatives* (ICLEI) e participação de setores diversos da sociedade.

O Plano aponta ações estratégicas interessantes para que a cidade possa enfrentar a intitulada “crise climática” e seus impactos adversos, minimizando as possíveis perdas materiais e imateriais causadas por eventos climáticos extremos e fomentando o desenvolvimento sustentável. Para cada ação estratégica descrita, que envolvem comunicação, governança, monitoramento, prevenção, entre outras, também foram definidas metas, prazos, atores envolvidos e indicadores para mensurar a efetividade da ação.

Ainda que, enquanto plano, funcione como papel norteador das ações do poder público municipal, há de se destacar fator preocupante associado ao relatório que mapeou as áreas mais vulneráveis às mudanças climáticas na capital mineira, documento que serviu como um dos panos de fundo técnicos ao desenvolvimento do Plano.

Isso porque sua proposta metodológica previu o desenvolvimento de série de modelos para dimensionar o impacto climático sobre as populações, sendo um deles associado às ondas de calor. De maneira consideravelmente reducionista, o modelo levou em consideração apenas variáveis populacionais como idade, renda e densidade para avaliação da sensibilidade dos grupos ao fenômeno, e, do ponto de vista climático, considerou somente o Mapa Climático Analítico de Belo Horizonte,

produzido por Ferreira *et al.* (2017), além do produto matricial do monitoramento via satélite dos episódios de ondas de calor[53], conduzido pelo INPE.

Ocorre que, por mais que o mapa municipal citado tenha sido construído sobre bases teórico-metodológicas sólidas e escala adequada, oriundo de análise multicritério que considerou variáveis como volume edificado, presença de áreas verdes, declividade, presença de áreas não permeáveis e rugosidade, o WSDI, por outro lado, possui resolução espacial extremamente grosseira[54], que nem de longe se adapta à escala geográfica em que o fenômeno dos núcleos ou "ilhas de calor" se manifesta em ambiente intraurbano, prejudicando seu emprego em modelagem que utilize a técnica de álgebra de mapas.

Além disso, o relatório técnico também não observou os controles atmosféricos e tipos de tempo predominantes nas diferentes épocas do ano, assim como também não analisou o comportamento de dados empíricos oriundos de monitoramento sistemático no interior das localidades, principalmente das vilas e comunidades de Belo Horizonte. Isso pode estar relacionado à limitação dos dados disponíveis à época e/ou ao perfil da equipe de consultores responsável pelo documento, o que reforça a importância de estudos mais detalhados e multidisciplinares para balizar as políticas públicas.

Ainda sobre as variáveis empregadas no relatório técnico, vale destacar que a variável "densidade populacional", utilizada no modelo para cálculo dos impactos associados às ondas de calor, foi a que na presente pesquisa recebeu o menor peso no âmbito do Índice de Antropização Climática em Favelas (IACF), justamente pela sua característica indireta de explicação do fenômeno e pelo desempenho mediano, com baixa correlação, obtido na Análise de Componentes Principais.

A proposta desta seção da pesquisa não é criticar desmedidamente os esforços das políticas, planos e programas voltados à agenda climática desenvolvidos pela Prefeitura de Belo Horizonte e/ou iniciativa privada, mas ilustrar aspectos imprescindíveis à compreensão de sistemas complexos como o climático, que não necessariamente foram observados quando da elaboração dos estudos

[53] Trata-se do *Warm Spell Duration Index* (WSDI), que representa a soma de dias de ondas de calor consecutivas no ano.
[54] Tamanho do pixel de 20 km, com escala temporal anual.

citados. Busca-se, na verdade, apoiar o poder público municipal com contribuições de natureza científica, que possam se somar aos esforços já realizados e fortalecer a agenda do clima no nível local.

Particularmente, este pesquisador também foi servidor público estadual durante quase uma década, responsável pela pasta de gestão territorial e de geotecnologias da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD). Dentre as parcerias formatadas nos anos sob sua gestão, destaca-se justamente a realizada com a Secretaria de Meio Ambiente da Prefeitura de Belo Horizonte, no âmbito de projeto também coordenado pelo ICLEI, entre 2017 e 2020, o Interact-Bio[55]. Considera-se importante trazer essa informação ao contexto da pesquisa para ilustrar que o *modus operandi* do ICLEI é de conhecimento do pesquisador, que pôde contribuir com iniciativas conduzidas pela instituição à época, inclusive as de interface com a agenda climática municipal, bem como apontar gargalos ou lacunas metodológicas.

Isso é especialmente importante porque o momento atual da humanidade volta seus olhos cada vez mais à questão climática, cobrando ações de enfrentamento e/ou adaptação por parte do poder público, que levem a multidisciplinaridade e a diversidade de atores como premissas básicas à construção de qualquer projeto. Os estudos de vulnerabilidade citados, por exemplo, inclusive ganharam recente notoriedade na mídia (Figura 68), reforçando a necessidade de atualizações e melhorias técnicas constantes.

Figura 68. Manchete de 05/10/2023, destacando resultados do estudo conduzido pela Prefeitura de Belo Horizonte.

CLIMA

PBH mapeia 63 bairros com alta vulnerabilidade ao calor

Ondas de altas temperaturas serão mais intensas e duradoras na capital até 2030, aponta estudo. Venda Nova já ferve e é a região mais preocupante

Fonte: Jornal Estado de Minas. Disponível em: https://bitlybr.com/cVHz.

[55] Metodologia de mapeamento voltada à priorização de oportunidades no território para implementação de soluções baseadas na natureza. Mais detalhes em Accioly *et al*. (2022).

Curioso destacar que a equipe responsável pela matéria acima inclusive chegou a percorrer diferentes bairros da capital mineira de posse de um aparelho termo-higrômetro, para registrar diferenças de temperatura e umidade relativa do ar nos locais considerados como de maior vulnerabilidade às ondas de calor segundo os estudos da Prefeitura de Belo Horizonte. Evidentemente, a equipe composta por profissionais com formação em jornalismo não observou protocolos técnico-científicos para tanto, mas registraram situações episódicas interessantes, como a temperatura do asfalto em um cruzamento de avenidas relevantes da capital superior aos 55°C.

Para concluir, torna-se importante destacar que todo e qualquer plano de ação climática, precisa levar em consideração a estrutura de organização das escalas do clima. Ainda mais em contextos que envolvam populações em vulnerabilidade social, aspectos dos topoclimas e microclimas devem ser rigorosamente observados, sob risco de se construir políticas a partir de resultados que não reflitam a realidade escalar das áreas afetadas. Essa é a principal preocupação, e, acredita-se, devolutiva social da presente pesquisa.

Do ponto de vista dos impactos da relação entre clima e sociedade, a organização escalar ainda guarda relação clara com a desigualdade social. Há diferenças óbvias entre o padrão de construção das edificações nas favelas e em bairros de maior poder aquisitivo, que contribuem diretamente para a atenuação do calor no interior das moradias e no aumento do conforto térmico. A gênese do fenômeno é multiescalar, mas as primeiras respostas são eminentemente microclimáticas, condicionadas pela capacidade que o rico e o pobre possuem de agir sobre elas.

4.5.1 Indo (um pouco) além

De maneira complementar e em caráter estritamente exploratório, cujos resultados serão sabidamente mais incipientes que os derivados dos métodos e técnicas conduzidos até aqui, a pesquisa dará sua última contribuição. Com objetivo de promover mais um passo em direção ao diagnóstico (ou visão geral) do(s) clima(s) produzidos pelas vilas e comunidades de Belo Horizonte, trata-se de esforço para replicar versão simplificada do IACF, diminuindo o número de variáveis,

mas mantendo a proporcionalidade dos pesos que foram definidos nas seções de resultados anteriores.

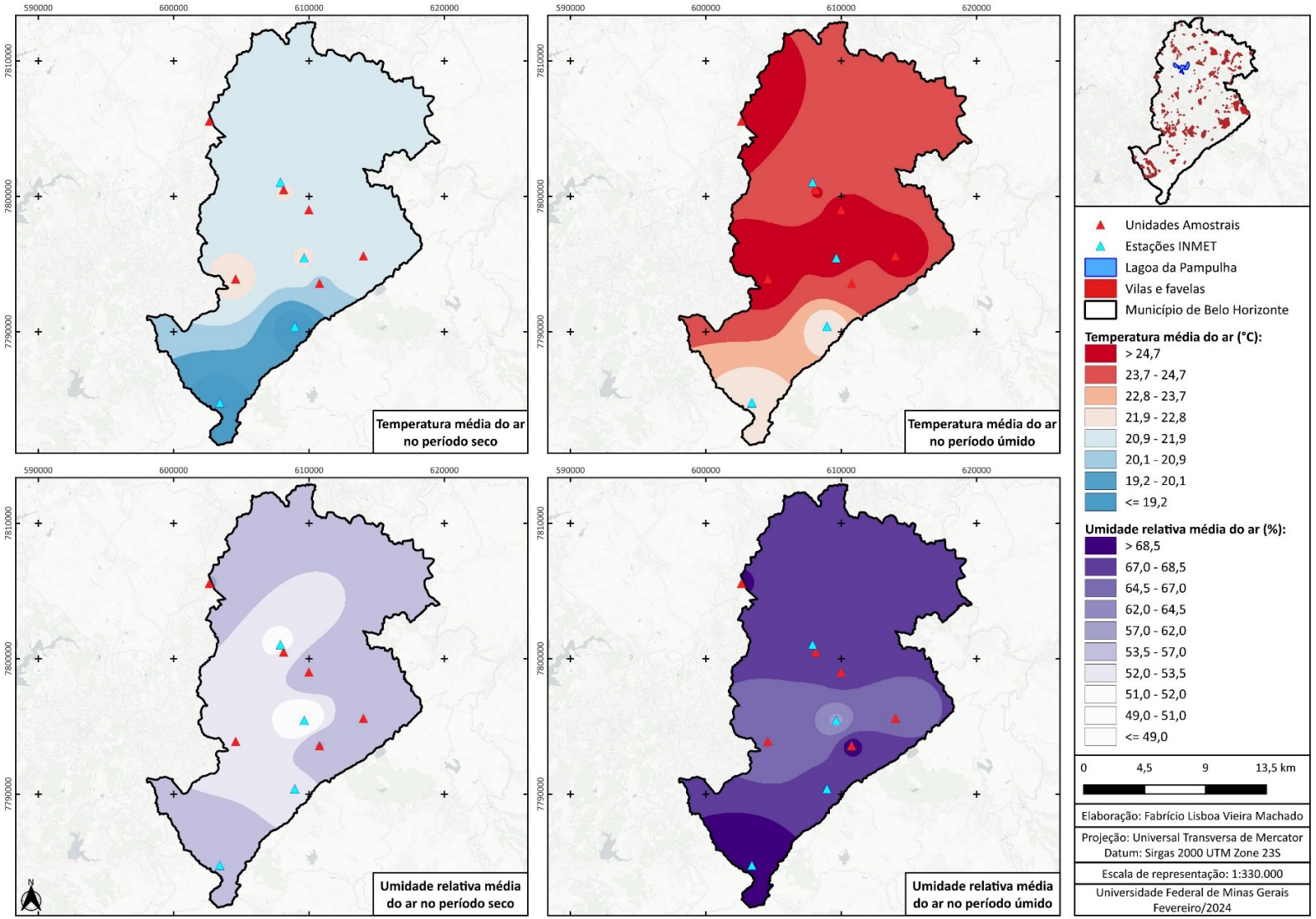
Para tanto, os dados médios de temperatura e umidade relativa do ar coletados nas Unidades Amostrais nos períodos seco e úmido foram integrados aos das estações oficiais do INMET Belo Horizonte, Pampulha, Cercadinho e Rola Moça e interpolados para a extensão territorial completa da capital mineira, de modo que todas as 218 favelas oficiais do município pudessem ter isotermas e isoígras associadas. Definiu-se como método geoestatístico para interpolação o Inverso da Distância Ponderada (do inglês, IDW), tendo em vista o baixo número de amostras disponíveis, que inviabilizariam o emprego de métodos mais refinados, como a krigagem (BARBOSA, 2006; JAKOB *et al.*, 2006). Os resultados, considerados satisfatórios, podem ser observados na Figura 69 apresentada a seguir.

Através do Sistema de Informação Geográfica QGIS versão 3.34, os dados matriciais gerados foram utilizados para extração dos valores médios dos elementos climáticos para cada uma das 218 vilas e comunidades de Belo Horizonte, através do emprego da sua máscara vetorial (polígono) na ferramenta de cálculo de estatísticas zonais. O procedimento também foi realizado para os dados advindos da carta de temperatura de superfície, NDVI e NDBI (representativos da média entre os anos de 2013 e 2021, para o produto derivado do Landsat-8, e entre 2015 e 2021, para os índices espectrais derivados do Sentinel-2).

A mesma etapa foi realizada, ainda, para o raster de declividade, que dessa vez foi calculado a partir do Modelo Digital de Elevação SRTM, com resolução espacial de 30 metros, tendo em vista que não foi realizado levantamento aerofotogramétrico para a totalidade das favelas belo-horizontinas.

Os dados médios gerados para cada uma das 218 vilas e comunidades oficiais foram organizados em tabela de atributos de arquivo vetorial do tipo ESRI Shapefile, a partir do qual foi possível empregar os pesos proporcionais a cada variável do IACF mantida e/ou adaptada, bem como representar espacialmente os resultados.

Figura 69. Interpolação das variáveis temperatura e umidade relativa do ar a partir dos dados médios coletados nas Unidades Amostrais e estações INMET.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Com isso, o IACF simplificado foi composto por 10 variáveis, conforme descritas na Tabela 14, acompanhadas dos respectivos pesos. A variável “altitude” foi incluída ao indicador em virtude da ausência de Modelos Digitais de Superfície que possibilitassem o cálculo da rugosidade da superfície urbana em escala compatível com as 218 vilas e comunidades oficiais de Belo Horizonte, visto que no IACF original essa variável foi oriunda de produtos do levantamento aerofotogramétrico com altíssima resolução espacial. Aqui, porém, a altitude foi considerada com papel inversamente proporcional, em função do gradiente barométrico que influencia na variação da temperatura e umidade (AYOADE, 1996), e, principalmente, pelo seu papel como fator controlador de macroescala, que pode atenuar aspectos do clima urbano.

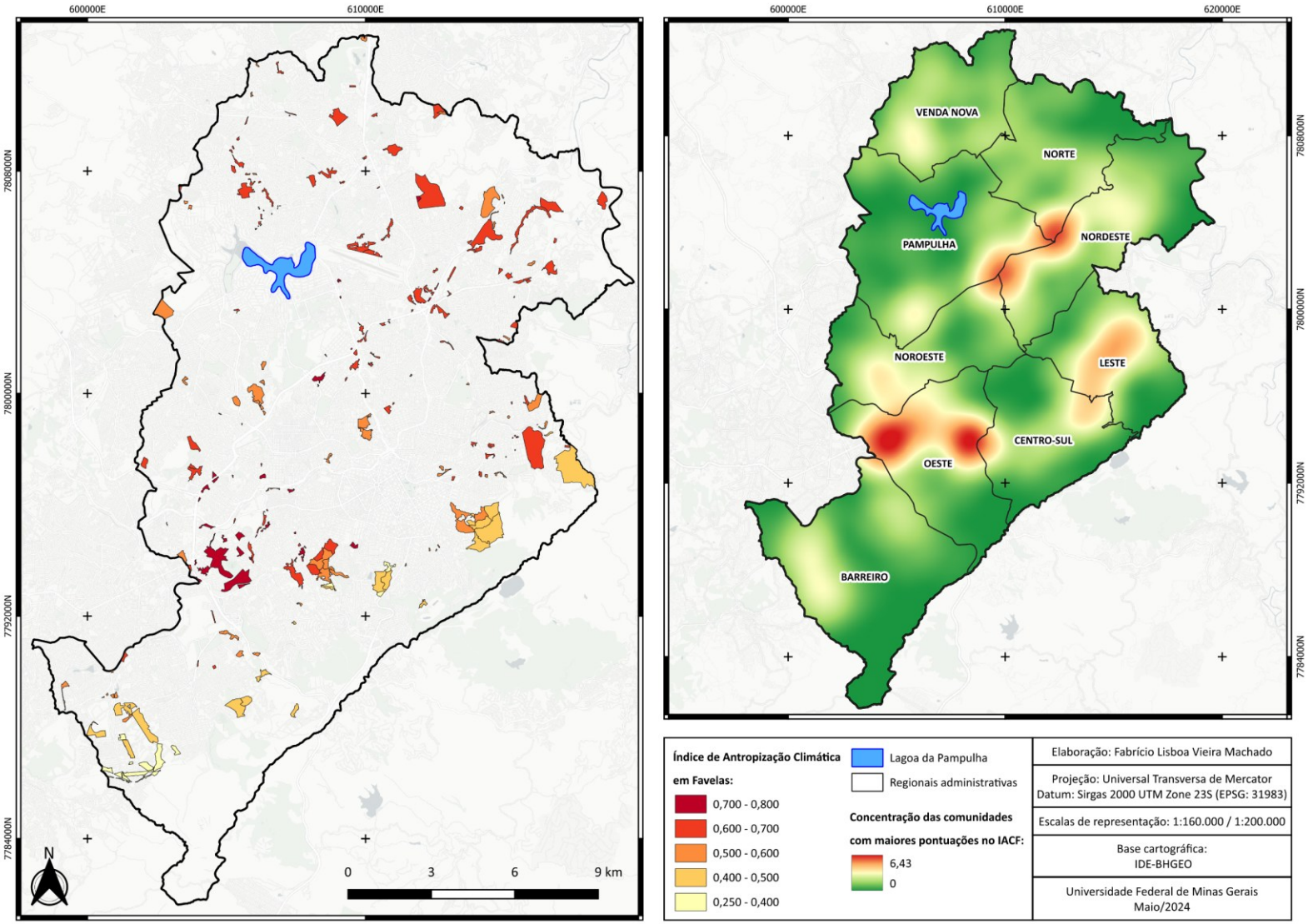
Tabela 14. Nova matriz de pesos proposta para as variáveis de cálculo da versão simplificada do Índice de Antropização Climática em Favelas.

Variáveis	Peso
Temperatura média do período seco	15,0
Temperatura média do período úmido	10,0
UR média do período seco	12,5
UR média do período úmido	10,0
LST média	5,0
NDBI médio	12,5
NDVI médio	12,5
Altitude	10,0
Declividade média	7,5
Densidade demográfica	5,0

Fonte: Autoria própria, 2024.

Após procedimento de normalização dos dados e aplicação dos pesos na média ponderada, os resultados indicaram padrão de concentração espacial das comunidades com maiores pontuações no IACF associado à Regional Oeste de Belo Horizonte, onde se encontra a Cabana do Pai Tomás e as comunidades envoltas à Vila Ventosa e ao Conjunto Santa Maria (Figura 70). Apesar de não terem recebido especial atenção nesta pesquisa, enquanto Unidades Amostrais, as últimas favelas citadas obtiveram grau de antropização climática muito semelhante ao observado na Cabana, o que direciona o olhar à necessidade de investigá-las com maior profundidade, sobretudo do ponto de vista do seu campo termo-higrométrico e impactos ambientais associados.

Figura 70. Distribuição espacial do Índice de Antropização Climática simplificado nas favelas de Belo Horizonte.



Fonte: Autoria própria, 2024.

A Tabela 15 apresenta o ranqueamento das 10 comunidades com maiores pontuações obtidas no âmbito do IACF simplificado, ao passo que a relação completa para as 218 favelas, incluindo as variáveis de entrada do modelo, poderá ser visualizada na seção de Apêndices. A Vila Sumaré, que também foi destaque no IACF completo, aparece na 14ª colocação.

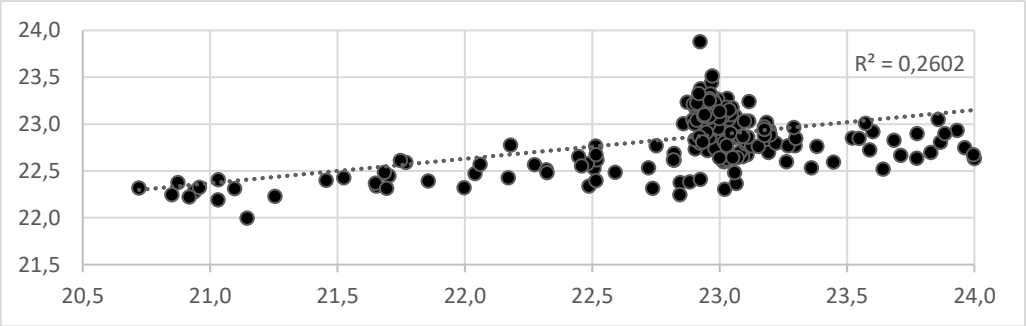
Tabela 15. Ranqueamento das vilas e comunidades belo-horizontinas com maiores níveis de antropização climática.

Ranking	IACF	Comunidade
1º	0,779	Vila Madre Gertrudes II
2º	0,767	Vila Vista Alegre
3º	0,765	Vila Oeste
4º	0,765	Cabana do Pai Tomás
5º	0,753	Vila Nova Cintra
6º	0,748	Vila Nova Gameleira II
7º	0,744	Vila Madre Gertrudes IV
8º	0,743	Barão Homem de Melo I
9º	0,743	Vila Aeroporto Jaragupa
10º	0,739	Imbaúbas

Fonte: Autoria própria, 2024.

Assumindo a média da temperatura geral do ar interpolada como variável dependente, também foi rodado modelo de regressão linear múltipla para estimar o quanto do comportamento desse elemento pôde ser explicado, do ponto de vista estatístico, pela variação das variáveis geográficas combinadas disponíveis para as 218 vilas e comunidades. Como pode ser visto na Figura 71, o coeficiente de determinação foi de apenas 0,260, o que reforça a complexidade do sistema climático nas escalas inferiores e as limitações de buscá-lo compreender a partir de variáveis remotamente obtidas.

Figura 71. Regressão linear múltipla calculada entre a temperatura média geral dos períodos de campo e as variáveis geográficas remotamente obtidas.



Fonte: Autoria própria, 2024.

Ainda que reconhecidas as limitações do modelo simplificado do IACF, os resultados obtidos permitem sugerir linhas de ação ao poder público municipal baseadas no estabelecimento de intervalos para as pontuações de cada vila ou comunidade no indicador, contribuindo para a orientação adequada de tipologias de obras de intervenção no território. É um exercício de síntese, que leva em consideração a característica climática geral das comunidades ranqueadas para recomendar medidas que visem à melhoria da qualidade do ambiente e diminuição dos impactos socioambientais adversos.

Em outras palavras, o Quadro 06 apresenta breve cartilha de caráter sugestivo e orientativo ao município, que sintetiza os resultados alcançados pelo pesquisador e posiciona as comunidades em cinco faixas de pontuação no IACF simplificado, tais como divididas no mapa anterior. Para cada uma delas, são apresentadas a temperatura e umidade relativa média do ar obtidas pelas técnicas de interpolação dos dados empíricos, bem como a altitude média das comunidades enquadradas nos intervalos.

Para aproximar a cartilha do principal público sobre os quais os efeitos negativos da relação entre clima e favela se desdobram, foram listadas comunidades de exemplo em cada intervalo, adotando, sempre que possível, seu nome popular.

É importante que, não somente as diretrizes gerais sugeridas pela cartilha, mas todos os esforços conduzidos nesta pesquisa para avaliação do(s) clima(s) produzidos pelas vilas e comunidades de Belo Horizonte, sejam levados em consideração quando da construção de políticas públicas voltadas às populações habitantes, que são de fato aquelas que experimentam a ausência de estruturas para superar episódios de extremos climáticos.

Quadro 06. Recomendações de intervenção no território das vilas e comunidades de Belo Horizonte de acordo com seus níveis de antropização climática.

Nível de antropização climática[56]	Comunidades de exemplo	Temperatura média do ar	Umidade relativa média do ar	Altitude média	Sugestões de intervenção no território
25 a 40%	Vila São Bento, Chácara Leonina, Vila Independência, Vila Estrela.	21,3°C	62,2%	999 m	Disposição de estruturas públicas que favoreçam a ventilação natural dos espaços.
40 a 50%	Morro do Papagaio, Conjunto Taquaril, Vila Cemig, Nossa Senhora de Fátima, Acaba Mundo, Vila Marçola.	22,3°C	61,2%	980 m	Arborização urbana suplementar para fornecimento de sombreamento.
50 a 60%	Pedreira Prado Lopes, Pindura Saia, Conjunto Santa Maria, Vila do Confisco, Conjunto Helena Greco.	22,9°C	60,6%	893 m	Arborização urbana sistemática para fornecimento de sombreamento e melhoria do saldo de umidade, abertura de vias públicas com dimensionamento padronizado.
60 a 70%	Vila Ventosa, Vila Nova Cachoeirinha, Jardim Felicidade, Conjunto Ribeiro de Abreu.	23°C	60,4%	829 m	Potencial remoção de moradias para instalação de espaços verdes abertos significativos, redesenho parcial da estrutura viária irregular.
Acima de 70%	Cabana do Pai Tomás, Vila Sumaré, Vila Oeste, Vila Nova Cintra, Vila Vista Alegre.	23,5°C	59,5%	886 m	Instalação de grandes obras estruturantes, com potencial remoção sistemática de moradias, redesenho da estrutura viária irregular e criação de parques municipais com plantio prioritário de espécies vegetais de rápido e expressivo desenvolvimento.

Fonte: Autoria própria, 2024.

[56] Resultado do Índice de Antropização Climática em Favelas simplificado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo compreender a dinâmica do canal termodinâmico do clima urbano em favelas de Belo Horizonte, visando a construção de modelo de investigação de seus fenômenos em escala compatível com os espaços e com as repercussões socioambientais derivadas.

Diferentemente das hipóteses inicialmente levantadas, nem todas as comunidades selecionadas como Unidades Amostrais da pesquisa figuraram como núcleos de calor no município de Belo Horizonte, tanto do ponto de vista superficial, quanto da temperatura do ar no interior da camada do dossel urbano. Sobre o primeiro ponto, ficou evidente que o sistema sensor adotado não é sensível às variações microclimáticas internas do conjunto de vilas e comunidades, especialmente no horário de captura das imagens, resultando em *hotspots* muito mais associados a grandes galpões com estruturas metálicas de cobertura.

A partir dos distintos métodos e técnicas empregados para avaliação empírica do campo térmico, com base no comportamento da temperatura e umidade relativa do ar, foi de fato verificado que a densidade e a proximidade de edificações nas Unidades Amostrais reúnem propriedades físicas que favorecem a retenção de calor e organizam escalas climáticas específicas, especialmente sob condições atmosféricas estáveis, impostas pelo predomínio do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. No entanto, isso precisa ser relativizado face à atuação de sistemas atmosféricos instáveis, como Frentes Frias e Zonas de Convergência de Umidade, que responderam por 19% dos tipos de tempo no período hidrologicamente seco da pesquisa e por 33% no período úmido.

A Cabana do Pai Tomás foi a comunidade que registrou as maiores temperaturas médias do ar, em ambos os períodos de monitoramento, com valores respectivos de 22,5°C e 25,6°C, entre inverno e verão. Sob diferentes sistemas atmosféricos, essa Unidade Amostral também experimentou, consistentemente, temperaturas noturnas superiores às demais investigadas, à exceção da Vila Sumaré, cujo padrão de variação do elemento foi bastante semelhante. São indícios contundentes da configuração das comunidades citadas como núcleos de calor urbanos em Belo Horizonte.

Em relação às favelas Pedreira Prado Lopes, Novo São Lucas e, principalmente, Morro do Papagaio, não foram reunidas evidências que comprovam seu funcionamento como núcleos de calor. Pelo contrário, a imposição de padrões de circulação de ar associados ao relevo contribuíram para que a comunidade destacada registrasse os maiores valores médios de umidade relativa do ar, da ordem de 57,2% no período seco e de 69,2% no período úmido, corroborando com as hipóteses iniciais da pesquisa.

O emprego de método de Análise de Componentes Principais definiu a temperatura mínima absoluta como variável que melhor explicou o comportamento climático das vilas e comunidades da pesquisa, fortemente associada à Cabana do Pai Tomás. O indicador sintético construído a partir de 17 variáveis meteorológicas e geográficas, de características empíricas e remotamente obtidas, também elencou a comunidade citada como detentora do maior grau de antropização do clima dentre as Unidades Amostrais estudadas (78,4%), onde os problemas socioambientais derivados requerem especial observação por parte dos agentes públicos.

É evidente que todo e qualquer modelo, por mais ajustado que seja, apresenta série de limitações na tentativa de sintetizar o comportamento de fenômenos naturais, especialmente os climáticos. Mais que isso, podem ser capazes de explicar grande parte dos eventos e episódios observados, mas nunca a totalidade dos sistemas aos quais estão vinculados.

Esforços de síntese como o aqui apresentado, sem dúvida, contribuem para a compreensão da dinâmica climática das favelas de Belo Horizonte e permitem sugerir onde as políticas públicas municipais, voltadas à agenda do clima, devem de fato voltar sua atenção. Ainda assim é reconhecido que novas pesquisas e modelos, explorando as lacunas aqui deixadas, podem e devem ser desenvolvidos para os mesmos objetos e/ou locais de estudo, levando em consideração fatores e elementos que não foram observados de modo satisfatório por este pesquisador, tanto no campo de estudo da ciência geográfica, quanto da arquitetura e urbanismo.

REFERÊNCIAS

ABDI, H., & WILLIAMS, L. J. **Principal component analysis**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2(4), 433–459, 2010.

ABREU, M. L. **Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais**: de Nimer (1977) à Zona de Convergência do Atlântico Sul. Revista Geonomos, v. 6, nº 2, Belo Horizonte, 1998.

ACCIOLY, S. M. L.; AMARAL, D. S. S. L. & MACHADO, F. L. V. **Iniciativas interinstitucionais para o planejamento urbano a partir de serviços ecossistêmicos**: estudo de caso do Projeto Interact-Bio. Workshop Climate in the City: subsídios e instrumentos para sustentabilidade e resiliência no planejamento e desenhos urbanos. Belo Horizonte, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial**: Requisitos gerais para aeronaves não tripuladas de uso civil. RBAC-E nº 94, Emenda nº 01. Brasília, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DA AVIAÇÃO CIVIL. **Procedimentos para elaboração e utilização de avaliação de risco operacional para operadores de aeronaves não tripuladas**. IS-E nº 94-003, Revisão A. Brasília, 2017.

ALVES, E. D. L., BIUDES, M. S. & VECCHIA, F. A. S. **Interpolação espacial na climatologia:** análise dos critérios que precedem sua aplicação**.** Revista Geonorte, Edição Especial 2, vol.1, nº5, p. 606-618, 2012.

ALVES, J. M. B.; FERREIRA, F. F.; CAMPOS, J. N. **Movimento vertical e índices atmosféricos associados às células de Hadley e Walker em anos de contrastes climáticos**: relação com chuvas no setor norte do nordeste do Brasil - SNNEB. Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.1, p. 15-36, 2005.

AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor urbanas:** métodos e técnicas de análise. Revista Brasileira de Climatologia. Ano 15. Edição Especial, 2019.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; CARDOSO, R. S. **Modelagem espacial da ilha de calor urbana em Presidente Prudente (SP)**. Revista. Brasileira de Climatologia, v. 16, p. 29-45, 2015.

ARNFIELD, A. J. **Two decades of urban climate research**: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology, 23(1), p. 1-26, 2003.

ARRAIS, C. A. **A construção de Belo Horizonte e o projeto de Memória de Aarão Reis**. Diálogos. Revista do Departamento de História e do Programa de Pós-Graduação em História, vol.14, nº3. Universidade Estadual de Maringá, 2010.

ARREGUY, C. A. C. & RIBEIRO, R. R. **História de bairros de Belo Horizonte**: Regional Centro-Sul. Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte. ACAP-BH, 2008.

_____. **História de bairros de Belo Horizonte**: Regional Leste. Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte. ACAP-BH, 2008.

_____. **História de bairros de Belo Horizonte**: Regional Venda Nova. Arquivo Público da Cidade de Belo Horizonte. ACAP-BH, 2008.

ARTIS, D. A., & CARNAHAN, W. H. **Survey of emissivity variability in thermography of urban areas**. Remote Sensing of Environment, vol. 12(4), 1982.

ASSIS, E. S. **A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade**: reflexões sobre uma trajetória. ENCAC – ELACAC. Maceió, 2005.

ASSIS, W. L. **Estudos preliminares para um programa de diagnóstico de ilhas de calor para a mancha urbana de Belo Horizonte**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia). Departamento de Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1997.

_____. **Análise do campo térmico e hígrico em Belo Horizonte**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Departamento de Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001.

_____. **Variações temporais e espaciais da precipitação em áreas urbanas**: estudo de caso na região oeste do município de Belo Horizonte. Revista GeoSul, vol.24, nº48, pág. 177-196. Florianópolis, 2009.

_____. **O sistema clima urbano do município de Belo Horizonte na perspectiva têmporo-espacial**. Tese (Doutorado). Departamento de Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

ASSIS, D. C. & JARDIM, C. H. **Relação entre componentes naturais e urbanos e características do campo térmico para definição de topoclimas no município de Juiz de Fora - MG**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 26, 2020.

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. São Paulo: Bertrand Brasil, 1996.

AZEVEDO, T. R. **O fluxo de calor gerado pelas atividades humanas**. In: TARIFA, J. R. & AZEVEDO, T. R. Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática. Revista GeoUSP. Volume 4. 2001.

BARBOSA, H. P., DUBREUIL, V. & AMORIM, M. C. C. T. **Utilização de imagens do satélite Landsat 8 para a análise da emissividade e da temperatura de superfície da aglomeração urbana de Rennes (França)**. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Santos, 2017.

BARBOSA, J. P. M. **Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos**: o SIG como ferramenta. Revista Caminhos de Geografia, v.9, n.17, p. 85-96. Uberlândia, 2006.

BARBOZA, E. N.; BEZERRA NETO, F. das C.; CAIANA, C. R. A**. Remote Sensing applied to the analysis of the phenomenon of Urban Heat Islands in the City of Vitória, Espírito Santo**. Research, Society and Development, [S. l.], v. 9, n. 6, p. e187963655, 2020.

BARRY R. G. & CHORLEY R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. Porto Alegre: Bookman, ed.9, 2013.

BAUMGRATZ, S. S. **O planejamento urbano de Belo Horizonte e seus problemas geomorfológicos**. Geografia, Rio Claro, v. 13, n. 25, p.117-131, 1988.

BECHTEL, B. **A new global climatology of annual Land Surface Temperature**. Remote Sensing, n. 7(3), p. 2850-2870, 2015.

BELO HORIZONTE. **Mapa interativo**: IDE BHGeo. Disponível em: https://bhmap.pbh.gov.br/v2/mapa/idebhgeo. Acesso em 30 de novembro de 2020.

_____. **Lei nº 11.181, de 8 de agosto de 2019**. Aprova o Plano Diretor do Município de Belo Horizonte e dá outras providências. Disponível em: https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/meio-ambiente/lei11181-atual.pdf.

BERGAMASCHI, R. B. **SIG aplicado à segurança no trânsito**: estudo de caso no município de Vitória – ES. 74 f. (Monografia de Graduação). Universidade Federal do Espírito Santo: Vitória, 2010.

BERTRAND, G. **Paisagem e geografia física global**: esboço metodológico. Caderno de Ciências da Terra, n. 13, 1972.

BEZERRA, P. E. S., MORAES, E. T. I. & SOARES, I. R. C. **Análise da temperatura de superfície e do índice de vegetação no município de Belém na identificação das ilhas de calor**. Revista Brasileira de Cartografia, 2018.

BIAS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M.; LOMBARDO, M. A. **Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos**. Anais do XI SBSR, pg. 1741-1748. Belo Horizonte, 2003.

BRANDÃO, A. M. P. M. **O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro.** Tese (Doutorado em Geografia Física). Faculdade de Filosofia letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996.

BRASIL. **Lei nº 9.985/2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, 2000.

CAMPOS, G. A. C. **Análise da influência do sombreamento causado pelos edifícios na Zona Central de Curitiba**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

CARACRISTI, I. **A natureza complexa da *poiésis* climática**: contribuições teóricas ao estudo geográfico do clima. Tese (doutorado em Geografia). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

CARRIVICK, J., QUINCEY, D. & SMITH, M. **New analytical methods in earth and environmental science**: Structure from Motion in the Geosciences. Publisher: Wiley Blackwell, 2016.

CARVALHO, D. F.; FARIA, R. A.; SOUSA, S. A. V.; BORGES, H. Q. **Espacialização do período de veranico para diferentes níveis de perda de produção na cultura do milho, na bacia do Rio Verde Grande, MG**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 4, n. 2, pág. 172-176. Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 2000.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J. F.; JUSTI DA SILVA, M. G. A.; DIAS, M. A. F. S. (org.). **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

CUNHA, A. V. **A favela Cabana do Pai Tomás**: a ocupação consentida - memória e história. Dissertação: Mestrado em História. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2003.

ERELL, E., & WILLIAMSON, T. **Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city**. International Journal of Climatology, 27(9), pg. 1243–1255, 2007.

FÁVERO, L. P. & BELFIORE, P. **Manual de análise de dados**. 1. ed. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FERNANDES, H. A. **Os impactos do desenvolvimento urbano na drenagem do bairro Caiçaras - Belo Horizonte - MG**. Monografia: Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Belo Horizonte, 2010.

FERNANDES, P. C. A. **Transcendências da forma**: o projetado, o induzido e o espontâneo em Belo Horizonte. XVII Enanpur. Sessões temáticas 7: Cidade e História. São Paulo, 2017.

FERREIRA, V. O. **Eventos pluviais concentrados em Belo Horizonte - MG**: caracterização genética e impactos físico-ambientais. Dissertação: Mestrado em Geografia e Análise Ambiental. Instituto de Geociências. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1996.

FERREIRA, D. G..; ASSIS, E. S. & KATZSCHNER, L. **Construção de um mapa climático analítico para a cidade de Belo Horizonte**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, pg. 255-270, 2017.

FERREIRA, D. G. **A influência da superfície urbana na variação da temperatura de superfície**: uma proposta metodológica de análise. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Escola de Arquitetura. Universidade Federal de Minas Gerais, 2021.

FIALHO, E. S. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte**: caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira. Tese (doutorado em Geografia). Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, 2009.

FOISSARD, X. **L´îlot de chaleur urbain et le changement climatique**: application à l´agglomération rennaise. These (Docteur) - Université de Rennes II, Rennes, 2015.

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

GEIGER, R. **Manual de microclimatologia**: o clima da camada de ar junto ao solo. São Paulo: Ed. Fundação Calouste Gulbenkian, 1961.

GONÇALVES, F. L. T.; NEDEL, A. S.; ALVES, M. R. C. **Uma análise da umidade relativa do ar em ambientes internos e externos na cidade de São Paulo**: deve-se umidificar ou secar os ambientes internos? Revista Brasileira de Medicina, v. 69, n. 7, p. 197-202, 2012.

GRIMMOND, C. S. B.; KING, T. S.; ROTH, M.; OKE, T. R. **Aerodynamic Roughness of Urban Areas Derived from Wind Observations**. Boundary-Layer Meteorology, v89(1), p. 1-24, 1998.

GRONDONA, A. & ROLIM, S. B. A. **Separação de temperatura e emissividade a partir de imagens do infravermelho termal**: análise de suas aplicações/restrições. Boletim de Ciências Geodésicas, Vol. 22, nº 1, pg. 16-34, Curitiba, 2016.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST**: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica, 4(1), 2001.

HASSAN, T.; ZHANG, J.; PRODHAN, F.A.; PANGALI SHARMA, T.P.; BASHIR, B. **Surface Urban Heat Islands Dynamics in Response to LULC and Vegetation across South Asia (2000–2019)**. Remote Sensing, v13, 3177, 2021.

HAWKINS, D. M. **Identification of Outliers**. London: Chapman and Hall, 1980.

HOWARD, L. **The Climate of London**: Deduced from meteorological observations, made in the Metropolis and at various places around it. Vol I. Ireland: International Association for Urban Climate – IAUC edition, 1833.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da População**. Diretoria de Pesquisas. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Favelas e Comunidades Urbanas**: Notas metodológicas n. 01 - Sobre a mudança de Aglomerados Subnormais para Favelas e Comunidades Urbanas. Rio de Janeiro, 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Edição Digital. Brasília, 2022.

JACKSON, D. A. **Stopping rules in principal components analysis**: a comparison of heuristical and statistical approaches. Ecology 74: 2204–2214, 1993.

JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. **O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas**. XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais. Caxambu, 2006.

JARDIM, C. H. **Construção e avaliação de desempenho de modelo de mini-abrigo meteorológico de ventilação passiva para experimentos em campo de climatologia**. In: Emerson Galvani; João Paulo Assis Gobo; Nadia Gilma Beserra de Lima. (Org.). Climatologia Aplicada II. 1ed.Curitiba: CRV, v. 2, p. 221-232, 2018.

JARDIM, C. H. & SILVA, M. R. **Extremos de temperatura do ar em Belo Horizonte**: variabilidade natural e influência do clima urbano. Revista do Departamento de Geografia, v. Especial, p. 83-97, 2016.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C. e SOBRINO, J.A. **A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data**. Journal of Geophysical Research, 108(D22), 2003.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C., CRISTÓBAL, J., SOBRINO, J.A., SÒRIA, G., NINYEROLA, M. e PONS, X. **Revision of the Single-Channel Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Thermal-Infrared Data**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(1), p. 339-349, 2009.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C., SOBRINO, J. A., SKOKOVIC, D., MATTAR, C. E. e CRISTÓBAL, J. **Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data**. IEEE Geoscience and remote sensing letters, v. 11, n. 10, p.1840-1843, 2014.

KÄFFER, P. S., HEINZ, L. V. O., ROCHA, N. S., ROLIM, S. B. A. **Recuperação da emissividade da superfície (LSE) a partir de dados Landsat 8 com uso do método do NDVI Threshold**. 6º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves, Brasil, 2018.

KAPLAN, G., AVDAN, U., & AVDAN, Z. Y. **Urban Heat Island Analysis Using the Landsat 8 Satellite Data**: A Case Study in Skopje, Macedonia. Proceedings, 2(7), 358, 2018.

KOTHARKAR, R., & BAGADE, A. **Local Climate Zone classification for Indian cities**: A case study of Nagpur. Urban Climate, 24, 369–392, 2018.

LINDBERG F., GRIMMOND C. S. B., GABEY A., HUANG B., KENT C. W., SUN T., THEEUWES N., JÄRVI L., WARD H., CAPEL-TIMMS I., CHANG Y. Y., JONSSON P., KRAVE N., LIU D., MEYER D., OLOFSON F., TAN J. G., WÄSTBERG D., XUE L., ZHANG Z. **Urban Multiscale Environmental Predictor (UMEP)**: An integrated tool for city-based climate services. Environmental Modelling and Software v. 99, pg. 70-87, 2018.

LOMBARDO, M. A. **Ilhas de Calor nas Metrópoles**: o exemplo de São Paulo. São Paulo: HUCITEC, 244p, 1985.

LUCAS, T. P. B. **Gênese e espacialidades das precipitações nas estações chuvosas de 2010/2011 e 2011/2012 em Belo Horizonte, Minas Gerais, e suas correlações com os impactos hidrológicos**. Tese: Doutorado em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2015.

MACAROF, P. & STATESCU, F. **Comparasion of NDBI and NDVI as indicators of surface urban Heat Island effect in Landsat 8 imagery**: a case study of Iasi. Present Environment and Sustainable Development, v.11 (2), 2017.

MACHADO, A. J. & AZEVEDO, T. R. **A distribuição espacial dos termos do balanço de energia em superfície a partir de imagem orbital e observação de campo**. Revista do Departamento de Geografia, n.19, p. 81-91, 2006.

MACHADO, F. L. V. **Desempenho térmico e higrométrico do ar em ambiente urbano: estudo de caso no Aglomerado da Serra - Belo Horizonte**. Monografia de conclusão de curso. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2013.

_____. **O clima de Teófilo Otoni (MG)**: integração escalar, tipos de tempo e impactos ambientais. Dissertação: Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2016.

_____. **Análise da temperatura de superfície de vilas e aglomerados de Belo Horizonte através de série temporal de imagens de sensoriamento remoto**. Cadernos do Leste, v. 20, n. 20. Belo Horizonte, 2021.

MACHADO, F. L. V.; COSTA, P. G., JARDIM, C. H., BARRETO, A. A. **Variações intraurbanas de temperatura e umidade relativa do ar em Belo Horizonte - MG**: o segmento temporal de outubro/novembro de 2012. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, p.29-38, Vitória, 2013.

MACHADO, F. L. V. & JARDIM, C. H. **Indicadores climáticos de degradação ambiental em áreas urbanas**: o Aglomerado da Serra em Belo Horizonte. 2014. In: SILVA, C. A.; FIALHO, E. S.; STEINKE, E. T. Experimentos em Climatologia Geográfica. Dourados: Ed. UFGD, 2014.

MACHADO, L. A. & ASSIS, W. L. **Implicações da verticalização na circulação atmosférica local**: o caso do município de Nova Lima/MG – Brasil. 2014. In: SILVA, C. A.; FIALHO, E. S.; STEINKE, E. T. Experimentos em Climatologia Geográfica. Dourados: Ed. UFGD, 2014.

MACIEL, S. A. & OLIVEIRA, L. A. **Avaliação dos valores gerados de temperatura de superfície dos sensores TIRs do satélite Landsat 8 aplicados ao perímetro urbano do município de Uberlândia - MG.** Revista Ambiência Guarapuava. Vol.12. Ed. Especial pg. 821-830, 2016.

MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. **A Pacific interdecadal climate oscilation climate oscilation with impacts on salmon products**. Bulletin of the American Meteorological Society, v.78, pág. 1069-1079, 1997.

MARENGO, J. A. & OLIVEIRA, G. S. **Impactos do fenômeno La Niña no tempo e clima do Brasil**: Desenvolvimento e intensificação do La Niña 1988/1989. Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia. Brasília, 1998.

MARTINS, T. V. **Habitação ecoeficiente para o Vila Viva**. Monografia: Especialização em Construção Civil. Universidade Federal de Minas, Escola de Engenharia, 2012.

MATTIVI, P.; PAPPALARDO, S. E.; NIKOLIC, N.; MANDOLESI, L.; PERSICHETTI, A.; DE MARCHI, M.; MASIN, R. **Can Commercial Low-Cost Drones and Open-Source GIS Technologies Be Suitable for Semi-Automatic Weed Mapping for Smart Farming?** A Case Study in NE Italy. Remote Sens. 13, 1869p, 2021.

MATOS, D. A. S. & RODRIGUES, E. C. **Análise fatorial**. Escola Nacional de Administração Pública. Brasília: Enap, 2019.

MEIER, U. **A note on the power of Fisher's least significant difference procedure**. Pharmaceutical Statistics, 5(4), 253–263, 2006.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Texto, 206p, 2007.

MILLS, G. **Luke Howard and The Climate of London**. Weather, Vol. 63, nº 6. Royal Meteorological Society, 2008.

MINAS GERAIS. **Constituição do Estado de Minas Gerais**. Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1989.

MIRANDA-RIBEIRO, A; GARCIA, R. A. **Segregação socioespacial em Belo Horizonte**: uma aplicação de modelos difusos. Revista Geografias 01 (1), 2005, p. 86-97.

MONTEIRO, C. A. F. **Análise rítmica em climatologia**: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho. Climatologia, São Paulo, n.1, 1971.

_____. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: IG06-USP. Série Teses e Monografias, n.25, 1976.

_____. **Derivações antropogenéticas dos geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas**: Perspectivas urbanas e agrárias ao problema da elaboração de modelos de avaliação, 1978. In: Revista RA'EGA, n.9, Curitiba, 2001.

_____. **Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura**. Revista GEOSUL, nº 9, ano V, 1990.

_____. **Clima e excepcionalismo**: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.

_____. **Geossistemas**: a história de uma procura. São Paulo: Contexto, 2001.

_____. **Teoria e clima urbano: um projeto e seus caminhos**, 2003. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. Clima urbano. São Paulo: Ed. Contexto, 2003.

_____. **A climatologia geográfica no Brasil e a proposta de um novo paradigma**. In: MONTEIRO, C. A. F.; SANT'ANNA-NETO, J. L.; MENDONÇA, F. A.; ZAVATTINI, J. A (org). A construção da climatologia geográfica no Brasil. Editora Alínea: Campinas, 2015.

MOURA, A. C. M. & JANKOWSKI, P. **Contribuições aos estudos de análises de incertezas como complementação às análises multicritérios**. Revista Brasileira de Cartografia, nº 68/4, pg. 665-684. Rio de Janeiro, 2016.

NAKATA-OSAKI, C. M., SOUZA, L. C. L. DE, & RODRIGUES, D. S. **Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna**: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. Ambiente Construído, 16(3), pg. 73–87, 2016.

NASCIMENTO, D. T. F. & BARROS, J. R. **Identificação de ilhas de calor por meio de sensoriamento remoto**: estudo de caso no município de Goiânia. Boletim Goiano de Geografia, Goiânia, v. 29, n. 1, p. 119–134, 2009.

NERY, J. C. **O IAPI de Belo Horizonte**: entre proposta social e propaganda ideológica. 6º Seminário Docomomo Brasil: Arquitetura e Urbanismo, Moderno e Nacional. Niterói, 2005.

NIMER, E. **Circulação atmosférica do Brasil**. Revista Brasileira de Geografia. n. 3, ano XXVIII, p. 232 – 250,1966.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto**: princípios e aplicações. 4ª ed., São Paulo, Editora Blucher, 2010.

OKE, T. R. **The distinction between canopy and boundary layer urban heat island**. Atmosphere, 14:4, p. 268-277. University of British Columbia, Vancouver, 1976.

_____. **Boundary layer climates**. London and New York: Ed. Methuen, 1978.

_____. **The energetic basis of the urban heat island**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), p. 1–24, 1982.

_____. **Street Design and Urban Canopy Layer Climate**. Energy and Buildings, v. 11, n. 1/3, p. 103-113, 1988.

OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A. & VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

OLIVEIRA, G. S; SATYAMURTY, P. **O El Nino de 1997/98**: evolução e impactos no Brasil. Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia. Brasília, 1998.

OLIVEIRA, S. S. **O "desfavelamento" em Belo Horizonte**: política urbana, habitação popular e assistência social no âmbito municipal (1940-1959). Revista de História Regional, v. 27, n. 1, 2022.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981.

PARIZZI, M. G. **Riscos geológicos e hidrogeológicos no município de Belo Horizonte, MG**. Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, p. 145-161, 2021.

PAZ, O. L. S. & SAMPAIO, T. V. M. **Aeronaves remotamente pilotadas na pesquisa geográfica**: uma análise dos usos, aplicações e desenvolvimento

tecnológico associado entre os anos de 2014 e 2017. Revista Interface, nº 17, p. 23-31, 2019.

PÉDÉLABORDE, P. ***Introduction à l'etude scientifique du climat***. Centre de Documentation Universitaire, 1959.

PERCHÉ, E. A. & AMARAL, L. P. **Simulação hidrológica da bacia de detenção Santa Lúcia na cidade de Belo Horizonte**. XI Encontro Nacional de Águas Urbanas. Belo Horizonte, 2017.

PEREYRA-IRUJO, G.; BERNALDO, P.; VELÁZQUEZ, L.; PÉREZ, A.; MOLINA-FAVERO, C.; EGOZCUE, A. **Open Science Drone Toolkit**: Open source hardware and software for aerial data capture. PLoS ONE 18(4): e0284184, 2023.

PINTO, J. L. C.; SILVA, F. S.; ELMIRO, M. A. T., NÓBREGA, R. A. A. **Análise comparativa dos mapeamentos de temperaturas obtidos por imagens termais e medidas de campo em Belo Horizonte – MG**. Revista Geografias, Edição Especial, Belo Horizonte, 2017

PRINA, B. Z. & TRENTIN, R. **Análise da temperatura da superfície por meio de imagens Landsat-8**: estudo de caso para o município de Jaguari/RS/Brasil. Revista Formação, v. 3, n. 23, 2016.

RIBEIRO, A. G. **As escalas do clima**. Boletim de Geografia Teorética, 23(45-46):288-294, Rio Claro, 1993.

RILEY, S.; DEGLORIA, S.; ELLIOT, S. D. **A Terrain Ruggedness Index that Quantifies Topographic Heterogeneity**. Internation Journal of Science. 5. 23-27, 1999.

RINGNÉR, M. **What is principal component analysis?** Nature Biotechnology, 26(3), 303–304, 2008.

ROMERO, M. A. B. **Arquitetura do lugar**: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília. 1a. Edição. Nova Técnica Editorial: São Paulo, 2011.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York, McGraw-Hill, 1980.

SANT'ANNA NETO, J. L. **Clima e organização do espaço**. Boletim de Geografia. v.16, nº1. Universidade Estadual de Maringá, 1998.

_____. **História da Climatologia no Brasil**: gênese, paradigmas e a construção de uma Geografia do Clima. Tese de Livre Docência. Presidente Prudente: FCT/UNESP, 2001.

SANTIAGO, D.; GOMES, H. B. **Estudo de Ilhas de Calor no Município de Maceió/AL, por meio de Dados Orbitais do Landsat 5**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 9, nº 3, pg. 793-803, 2016.

SILVA, A. B. **Estudo hidrogeológico do município de Belo Horizonte – MG**. Revista Águas Subterrâneas, p. 481-490, 1994.

SILVA, E. N. & RIBEIRO, H. **Alterações microclimáticas em ambientes de favela**: Metodologia de avaliação empregada na favela de Paraisópolis – São Paulo. Revista GEOUSP - Espaço e Tempo. n.18, p. 171-186. São Paulo, 2005.

SILVA, V. J.; SILVA; C. R., ALMEIDA; L. D. S.; SILVA, C. R.; CARVALHO, H. D. P.; CAMARGO, R. **Mobile transect for identification of intra-urban heat islands in Uberlandia, Brazil**. Revista Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, v. 13(4), nº1, 2018.

SOARES, M. M. **Da barragem ao Parque Santa Lúcia**: um estudo da transformação da paisagem urbana. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2001.

SORRE, M. **Adaptação ao Meio Climático e Biossocial**: geografia psicológica (1951). In: MEGALE, J. F. (org.) Max Sorre: geografia. São Paulo: Ática, p.30 – 86. (Série Grandes Cientistas Sociais), 1984.

SOUTO, L. **Análise Multivariada**: Análise de Componentes Principais PCA UFS, 2017.

SOTCHAVA, V. B. **O estudo dos geossistemas**. Métodos em Questão. São Paulo, n. 6, 1977.

STEWART, I. D. **The relevance of history in contemporary urban heat island research**. Urban Climate News, n. 74. International Association for Urban Climate, 2019.

TARIFA, J. R. & ARMANI, G. **Os climas naturais**. In: TARIFA, J. R. & AZEVEDO, T. R. (Org.). Os climas na cidade de São Paulo: teoria e prática. São Paulo: GEOUSP, 2001.

TAVARES, A. C. **O clima local de Campinas**: introdução ao estudo do clima urbano. Dissertação: Mestrado em Geografia. Departamento de Geografia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Universidade de São Paulo, 1974.

TOLENTINO, N. F. & DINIZ, A. M. A. **A distribuição geográfica do tráfico de drogas em Belo Horizonte e suas correlações espaciais**. Revista do Instituto de Ciências Humanas, vol.9, nº 12. Belo Horizonte, 2014.

TOMLINSON, C. J., CHAPMAN, L., THORNES, J. E., & BAKER, C. **Remote sensing land surface temperature for meteorology and climatology**: a review. Meteorological Applications, 18(3), pg. 296–306, 2011.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Superintendência de Recursos Naturais e Meio ambiente. Diretoria Técnica, 1977.

TRICART, J. & CAILLEUX A. **Le problème de la classification des faits géomorphologiques**. Annales de Géographie, 65e Année, n. 349, pg. 162-186, Paris, 1956.

TSOU, J., ZHUANG, J., LI, Y., & ZHANG, Y. **Urban Heat Island Assessment Using the Landsat 8 Data**: A Case Study in Shenzhen and Hong Kong. Urban Science, 1(1), 10, 2017.

TUBELIS, A. & NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia Descritiva**: fundamentos e aplicações brasileiras. São Paulo: Nobel, 1984.

TUCKER, C. J. **Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation**. Remote Sensing of Environment, 8, 127–150, 1979.

UTIMURA, I. **Conforto térmico em habitações de favelas e possíveis correlações com sintomas respiratórios**: o caso do "Assentamento Futuro Melhor" - SP. Tese (Doutorado). Universidade de São de Paulo. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, 2010.

VACCA, G. **Web Open Drone Map (WebODM)**: a Software Open Source to Photogrammetry Process. FIG Working Week 2020. Smart surveyors for land and water management Amsterdam, the Netherlands, 10–14 May, 2020.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital nº 02. Recife, 2006.

VIANNA, E. O. & ROMERO, M. A. B. **A relação entre os materiais de superfície, a temperatura e a geometria urbana na formação das Ilhas de Calor**: uso de classificação supervisionada, imagens de satélite e fator W/H/L para o diagnóstico. VIII Congresso luso-brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável. Coimbra, Portugal: 2018.

VIDE, J. M. **Fundamentos de climatologia analítica**. Madrid: Sínteses, 1999.

VIDIGAL, L. **Cores dão cara nova ao IAPI**. Jornal O Estado de Minas. Belo Horizonte, 22 de junho de 2011. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2011/06/22/interna_gerais,235498/cores-dao-cara-nova-ao-iapi.shtml.

VIEIRA, L. C., SILVA, T. F. G., MAILLARD, P. **Using remote sensing for long term monitoring of water surface temperature in a tropical reservoir**. In: E-proceedings of the 38th IAHR World Congress, ISSN 2521-716X, September 1-6, Panama City, Panama, 2019.

VOOGT, J. A.; T. R. OKE. **Complete urban surface temperatures**. Journal of Applied Meteorology, v.36, p.1117-1132, 1997.

WENG, Q., LU, D., & SCHUBRING, J. **Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies**. Remote Sensing of Environment, 89(4), 467–483, 2004.

WOLF. P. R. **Elements of Photogrammetry**. Second ed., New York, MacGraw-Hill Book Company, 627p, 1983.

ZHA, Y. GAO, J., NI, S. **Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery**. International Journal of Remote Sensing, v. 24, 2003.

ZHAO, Q.; YU, L.; LI, X.; PENG, D.; ZHANG, Y.; GONG, P. **Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine**. Remote Sensing, v. 13, 3778, 2021.

ZHOU, D., XIAO, J., BONAFONI, S., BERGER, C., DEILAMI, K., ZHOU, Y., SOBRINO, J. **Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands**: Progress, Challenges, and Perspectives. Remote Sensing, v. 11(1), 48, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Disposição do beco de acesso à residência onde está instalada a miniestação meteorológica da Unidade Amostral 1, na Pedreira Prado Lopes. Potencial situação de cânion urbano.

Fonte: Autoria própria, 2022.

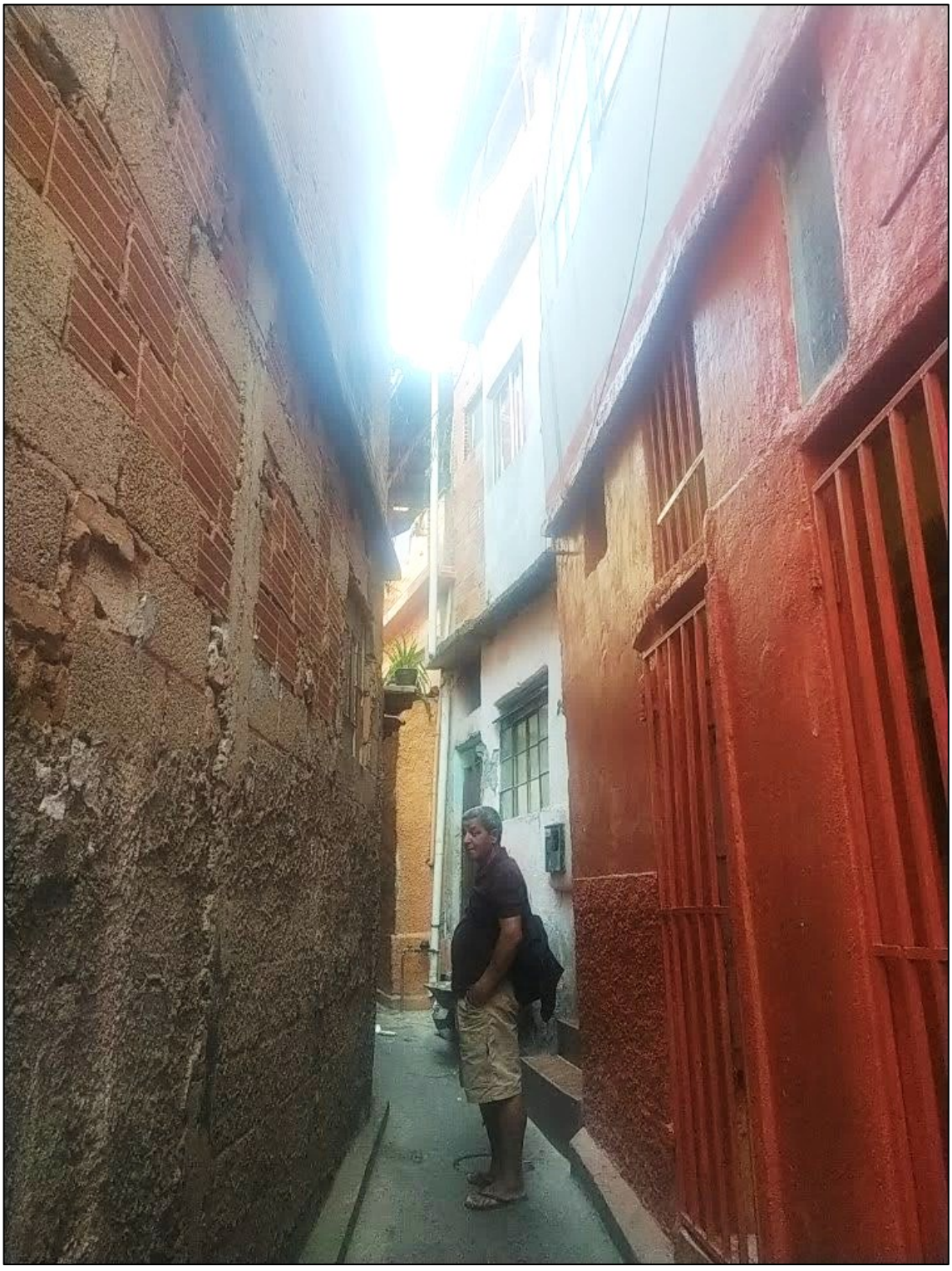
APÊNDICE B – Fachada da Associação dos Moradores da Vila Sumaré, local onde se encontra instalada a miniestação meteorológica da Unidade Amostral 4.

Fonte: Autoria própria, 2022.

APÊNDICE C – Vista panorâmica da vizinhança imediata do local onde se encontra instalada a miniestação meteorológica da Unidade Amostral 5, na Cabana do Pai Tomás.

Fonte: Autoria própria, 2022.

APÊNDICE D – Disposição do beco de acesso à residência onde está instalada a miniestação meteorológica da Unidade Amostral 5, na Cabana do Pai Tomás. Potencial situação de cânion urbano.



Fonte: Autoria própria, 2022.

APÊNDICE E – Postagem em rede social de empresa apoiadora da pesquisa, destacando o pesquisador em diálogo com liderança comunitária na Vila Sumaré.

Fonte: Autoria própria, 2022.

APÊNDICE F – Crianças das comunidades Cabana do Pai Tomás (a) e Pedreira Prado Lopes (b) em interação com o pesquisador durante trabalhos de campo para mapeamento com RPA.

Fonte: Autoria própria, 2023.

APÊNDICE G – Matriz de correlação das variáveis da Análise de Componentes Principais implementada.

	Temperatura média do período seco	Temperatura média do período úmido	UR média do período seco	UR média do período úmido	Amplitude térmica máxima diária	Amplitude higrométrica máxima diária	Temperatura mínima absoluta	Temperatura máxima absoluta	UR mínima absoluta	UR máxima absoluta	LST média	NDBI médio	NDVI médio	Razão de área sombreada	Declividade média	Rugosidade média	Densidade demográfica
Temp. média do período seco	1,00000	0,75049	-0,99136	-0,71872	-0,24558	-0,18477	0,80580	0,36631	-0,69263	0,15316	0,26215	0,84444	-0,75420	0,19377	-0,73696	-0,64541	0,74955
Temp. média do período úmido	0,75049	1,00000	-0,75988	-0,95427	-0,52107	-0,49688	0,85478	0,61052	-0,37448	0,50445	0,50609	0,73639	-0,61773	-0,00849	-0,49155	-0,25950	0,22284
UR média do período seco	-0,99136	-0,75988	1,00000	0,76373	0,15934	0,09318	-0,78665	-0,47540	0,75300	-0,19634	-0,17109	-0,78351	0,68648	-0,06953	0,67054	0,55844	-0,67697
UR média do período úmido	-0,71872	-0,95427	0,76373	1,00000	0,25072	0,26852	-0,72623	-0,79118	0,47330	-0,46716	-0,23032	-0,55326	0,40926	0,29153	0,29386	0,05152	-0,10103
Amp. térmica máxima diária	-0,24558	-0,52107	0,15934	0,25072	1,00000	0,85356	-0,66224	0,20306	-0,21559	-0,42682	-0,99845	-0,70779	0,74101	-0,70867	0,64209	0,54234	-0,22754
Amp. higrom. máxima diária	-0,18477	-0,49688	0,09318	0,26852	0,85356	1,00000	-0,40716	0,29122	-0,50955	-0,01974	-0,86007	-0,54825	0,49260	-0,57965	0,35172	0,31756	-0,19589
Temp. mínima absoluta	0,80580	0,85478	-0,78665	-0,72623	-0,66224	-0,40716	1,00000	0,39294	-0,55500	0,62926	0,65753	0,92085	-0,90111	0,34205	-0,84374	-0,64697	0,47108
Temp. máxima absoluta	0,36631	0,61052	-0,47540	-0,79118	0,20306	0,29122	0,39294	1,00000	-0,60484	0,59784	-0,24156	0,06340	0,02922	-0,72752	0,08566	0,34643	-0,31106
UR mínima absoluta	-0,69263	-0,37448	0,75300	0,47330	-0,21559	-0,50955	-0,55500	-0,60484	1,00000	-0,41340	0,21763	-0,40682	0,40789	0,19976	0,48303	0,36088	-0,39388
UR máxima absoluta	0,15316	0,50445	-0,19634	-0,46716	-0,42682	-0,01974	0,62926	0,59784	-0,41340	1,00000	0,38551	0,30937	-0,37318	-0,09899	-0,32924	-0,05376	-0,29904
LST média	0,26215	0,50609	-0,17109	-0,23032	-0,99845	-0,86007	0,65753	-0,24156	0,21763	0,38551	1,00000	0,72381	-0,75704	0,74258	-0,66267	-0,57701	0,27349
NDBI médio	0,84444	0,73639	-0,78351	-0,55326	-0,70779	-0,54825	0,92085	0,06340	-0,40682	0,30937	0,72381	1,00000	-0,97645	0,60547	-0,93400	-0,84185	0,73415
NDVI médio	-0,75420	-0,61773	0,68648	0,40926	0,74101	0,49260	-0,90111	0,02922	0,40789	-0,37318	-0,75704	-0,97645	1,00000	-0,69774	0,98215	0,90219	-0,72159
Razão de área sombreada	0,19377	-0,00849	-0,06953	0,29153	-0,70867	-0,57965	0,34205	-0,72752	0,19976	-0,09899	0,74258	0,60547	-0,69774	1,00000	-0,71667	-0,83077	0,63791
Decliv. média	-0,73696	-0,49155	0,67054	0,29386	0,64209	0,35172	-0,84374	0,08566	0,48303	-0,32924	-0,66267	-0,93400	0,98215	-0,71667	1,00000	0,95144	-0,77862
Rugos. média	-0,64541	-0,25950	0,55844	0,05152	0,54234	0,31756	-0,64697	0,34643	0,36088	-0,05376	-0,57701	-0,84185	0,90219	-0,83077	0,95144	1,00000	-0,88873
Densidade demográfica	0,74955	0,22284	-0,67697	-0,10103	-0,22754	-0,19589	0,47108	-0,31106	-0,39388	-0,29904	0,27349	0,73415	-0,72159	0,63791	-0,77862	-0,88873	1,00000

APÊNDICE H – Valores normalizados das Unidades Amostrais da pesquisa empregados na matriz de análise multicritério do IACF.

Variáveis	Pedreira Prado Lopes	Morro do Papagaio	Vila Novo São Lucas	Vila Sumaré	Cabana do Pai Tomás
Temperatura do ar média do período seco (°C)	0,118	0,000	0,294	1,000	1,000
Temperatura do ar média do período úmido (°C)	0,429	0,000	0,500	0,500	1,000
Umidade relativa do ar média do período seco (%)	0,104	0,000	0,396	1,000	0,958
Umidade relativa do ar média do período úmido (%)	0,250	0,000	0,688	0,469	1,000
Amplitude térmica máxima (°C)	0,000	1,000	0,952	0,714	0,190
Amplitude higrométrica máxima (%)	0,268	0,683	1,000	0,902	0,000
Temperatura do ar mínima absoluta (°C)	0,741	0,000	0,519	0,889	1,000
Temperatura do ar máxima absoluta (°C)	0,160	0,000	1,000	0,440	0,600
Umidade relativa do ar mínima absoluta (%)	0,167	0,000	0,643	1,000	0,381
Umidade relativa do ar máxima absoluta (%)	0,000	1,000	0,000	0,364	0,364
Temperatura de superfície média da série - LST (°C)	1,000	0,056	0,000	0,333	0,833
Cobertura edificada média - NDBI (%)	0,627	0,000	0,108	0,882	1,000
Cobertura vegetal média - NDVI (%)	0,814	0,000	0,103	1,000	0,928
Razão de área sombreada no solstício de inverno (%)	1,000	0,586	0,000	0,798	0,687
Declividade média do terreno (°)	0,704	0,000	0,044	1,000	0,704
Rugosidade média da superfície (%)	0,324	0,724	1,000	0,000	0,365
Densidade demográfica (hab./ha)	0,357	0,438	0,000	1,000	0,692

APÊNDICE I – Variáveis de entrada do modelo IACF simplificado. Valores que participaram de maneira inversamente proporcional estão multiplicados por -1.

Ranking	IACF	Comunidade	Densidade demográfica (hab./km²)	Altitude média (m)	Declividade média (°)	LST média (°C)	NDBI médio (%)	NDVI médio (%)	Temperatura média no período seco (°C)	Temperatura média no período úmido (°C)	Umidade relativa do ar média no período seco (%)	Umidade relativa do ar média no período úmido (%)
1º	0,779	Vila Madre Gertrudes II	765,5	-945,5	-5,5	27,4	0,178	-0,116	22,4	25,5	-52,6	-66,1
2º	0,767	Vila Vista Alegre	349,0	-909,8	-6,2	27,9	0,210	-0,080	22,1	25,3	-52,7	-66,1
3º	0,765	Vila Oeste	380,5	-885,8	-5,5	28,9	0,179	-0,104	22,1	25,3	-52,7	-66,2
4º	0,765	Cabana do Pai Tomás	368,1	-921,3	-8,5	27,8	0,194	-0,117	22,4	25,6	-52,6	-66,0
5º	0,753	Vila Nova Cintra	469,1	-894,8	-10,1	29,4	0,202	-0,126	22,0	25,2	-52,7	-66,1
6º	0,748	Vila Nova Gameleira II	288,5	-937,6	-5,8	28,3	0,202	-0,103	22,1	25,2	-52,7	-66,1
7º	0,744	Vila Madre Gertrudes IV	278,6	-889,3	-6,3	29,6	0,081	-0,097	22,3	25,4	-52,7	-66,1
8º	0,743	Barão Homem de Melo I	559,5	-873,3	-7,3	28,3	0,172	-0,131	21,5	24,8	-51,9	-65,4
9º	0,743	Vila Aeroporto Jaragupa	664,5	-794,9	-4,0	28,2	0,229	-0,093	21,4	24,5	-52,9	-67,5
10º	0,739	Imbaúbas	423,4	-909,9	-13,4	27,9	0,200	-0,108	22,2	25,3	-52,6	-66,1
11º	0,737	Vila Madre Gertrudes V	195,2	-888,1	-8,6	28,1	0,126	-0,096	22,3	25,4	-52,7	-66,1
12º	0,737	Vila Calafate	309,4	-855,1	-3,4	28,8	0,116	-0,077	21,5	24,8	-52,2	-65,8
13º	0,736	Vila Madre Gertrudes I	339,2	-936,2	-9,9	27,7	0,172	-0,152	22,4	25,6	-52,6	-66,0
14º	0,729	Vila Sumaré	418,1	-860,9	-6,8	26,7	0,185	-0,110	22,3	24,8	-52,3	-67,7
15º	0,729	Vila Nova Gameleira I	413,6	-926,8	-8,2	27,5	0,157	-0,144	22,3	25,4	-52,6	-66,1
16º	0,725	Real I	495,5	-864,0	-5,6	29,2	0,169	-0,034	21,5	24,5	-52,6	-67,5
17º	0,724	Trinta e Um de Março	448,5	-913,0	-7,1	29,1	0,201	-0,093	21,6	24,8	-52,8	-66,6
18º	0,722	Vila Santo Antônio	765,5	-797,3	-1,4	28,0	0,165	-0,142	21,4	24,5	-52,7	-67,5
19º	0,721	Conjunto H2 - Prosam	303,9	-881,4	-4,9	28,0	0,145	-0,162	22,0	25,2	-52,7	-66,2
20º	0,719	Boa União I	272,3	-776,9	-1,5	29,1	0,164	-0,067	21,3	24,6	-53,5	-67,3
21º	0,719	Custodinha	449,3	-922,4	-9,4	28,8	0,095	-0,169	22,4	25,5	-52,6	-66,1
22º	0,715	Marmiteiros	310,4	-859,4	-2,8	28,3	0,163	-0,133	21,5	24,8	-52,7	-66,5
23º	0,714	Conjunto Floramar	418,3	-789,8	-5,6	28,3	0,223	-0,085	21,3	24,6	-53,6	-67,4
24º	0,709	Barão Homem de Melo IV	396,9	-906,2	-10,9	29,3	0,179	-0,129	21,4	24,7	-52,1	-65,5
25º	0,704	Vila Alto dos Pinheiros	277,6	-925,7	-6,9	28,6	0,143	-0,088	21,8	25,0	-52,8	-66,5
26º	0,703	Monte São José	326,8	-961,0	-9,4	26,7	0,105	-0,209	21,7	25,1	-50,6	-63,9
27º	0,701	Delta	316,9	-925,1	-8,1	29,2	0,165	-0,109	21,7	24,9	-52,8	-66,5
28º	0,700	Ambrosina	315,6	-876,0	-12,2	27,9	0,174	-0,117	21,7	24,9	-52,5	-66,0
29º	0,699	Barão Homem de Melo III	313,8	-891,3	-11,0	28,9	0,168	-0,164	21,4	24,8	-52,0	-65,4
30º	0,699	Vila Maloca	417,0	-864,2	-7,2	29,8	0,150	-0,076	21,5	24,5	-52,8	-67,5
31º	0,693	Vila Paquetá	732,3	-841,5	-4,8	26,7	0,180	-0,094	21,4	24,6	-53,4	-67,6
32º	0,692	Vila Vera Cruz I	558,0	-813,3	-4,7	28,4	0,197	-0,125	21,2	24,7	-54,3	-67,0
33º	0,690	Vila Suzana I	159,6	-779,2	-4,3	28,7	0,159	-0,097	21,4	24,6	-53,4	-67,4
34º	0,690	Vila da Paz Anel Rodoviário	864,7	-814,8	-4,9	29,6	0,091	-0,144	21,4	24,6	-53,2	-67,4
35º	0,687	Vila Esplanada	322,5	-774,8	-3,4	28,2	0,186	-0,163	21,3	24,6	-53,5	-67,3
36º	0,686	Vila Piratinga A	475,0	-798,9	-5,0	29,2	0,194	-0,095	21,3	24,8	-54,9	-67,8
37º	0,684	Vila Rica São José	333,3	-840,5	-5,6	28,4	0,119	-0,094	21,5	24,6	-52,9	-67,2
38º	0,683	São Dimas	255,3	-774,2	-3,0	28,8	0,145	-0,135	21,3	24,6	-53,6	-67,3

39º	0,682	Real II	604,4	-859,0	-9,3	27,9	0,145	-0,075	21,4	24,5	-52,8	-67,5
40º	0,681	Vila PUC	356,0	-922,3	-7,7	28,3	0,164	-0,140	21,6	24,8	-52,8	-66,6
41º	0,679	São Jorge I	227,6	-934,1	-11,5	28,0	0,168	-0,155	21,4	24,7	-51,9	-65,2
42º	0,679	Vila São Paulo	290,7	-802,8	-5,3	27,9	0,179	-0,117	21,3	24,6	-53,6	-67,3
43º	0,678	Vila da Paz	398,5	-820,3	-6,2	28,0	0,168	-0,115	21,4	24,6	-53,4	-67,5
44º	0,678	Vila Vera Cruz II	990,9	-831,5	-12,5	27,8	0,205	-0,123	21,2	24,7	-54,4	-67,0
45º	0,677	Vila Nova	428,3	-798,7	-7,2	27,7	0,196	-0,112	21,3	24,6	-53,9	-67,5
46º	0,677	Conjunto H5 - Prosam	159,5	-871,0	-11,1	28,6	0,088	-0,169	22,0	25,2	-52,6	-66,1
47º	0,673	Vila Sesc I	350,0	-770,8	-4,1	28,2	0,163	-0,121	21,3	24,7	-54,3	-67,6
48º	0,672	Várzea da Palma	297,6	-791,3	-3,7	29,0	0,176	-0,122	21,3	24,8	-54,7	-67,8
49º	0,671	Vila Califórnia	297,2	-875,4	-9,9	27,6	0,159	-0,132	21,6	24,8	-52,9	-66,7
50º	0,671	São Jorge II	187,0	-946,9	-14,5	25,6	0,132	-0,171	21,6	25,0	-50,9	-64,3
51º	0,670	Vila Nova Cachoeirinha IV	533,1	-830,9	-8,0	27,6	0,179	-0,134	21,4	24,6	-53,5	-67,6
52º	0,669	Vila Maria	427,6	-812,5	-8,1	25,8	0,213	-0,085	21,2	24,6	-53,7	-67,2
53º	0,669	Vila São João Batista	306,2	-772,2	-5,8	27,9	0,176	-0,143	21,3	24,6	-53,9	-67,5
54º	0,668	Brasília	435,0	-815,2	-9,2	26,6	0,214	-0,105	21,3	24,6	-53,8	-67,2
55º	0,667	Guaratá	176,3	-864,2	-8,7	28,1	0,111	-0,194	21,7	24,9	-52,5	-66,1
56º	0,666	Vila Satélite	192,3	-786,5	-8,3	28,7	0,180	-0,122	21,3	24,6	-53,8	-67,5
57º	0,666	Conjunto Jardim Filadélfia	287,7	-905,7	-10,9	28,4	0,185	-0,126	21,5	24,7	-53,0	-66,9
58º	0,665	Andiroba	363,3	-787,2	-9,2	28,0	0,159	-0,123	21,3	24,6	-53,5	-67,3
59º	0,664	Vila Suzana II	187,5	-796,5	-11,7	28,9	0,163	-0,097	21,4	24,6	-53,4	-67,4
60º	0,663	Maravilha	276,5	-958,6	-5,9	27,7	0,093	-0,141	21,9	25,0	-52,9	-66,4
61º	0,662	Vila Primeiro de Maio	283,8	-792,5	-9,3	27,1	0,173	-0,105	21,3	24,6	-53,4	-67,4
62º	0,662	Vila São Geraldo	464,5	-824,0	-4,9	28,2	0,180	-0,183	21,2	24,7	-54,0	-67,1
63º	0,662	São Sebastião	304,3	-841,1	-8,7	29,0	0,145	-0,123	21,4	24,6	-53,2	-67,5
64º	0,662	Vila União	666,7	-838,6	-7,4	28,3	0,154	-0,146	21,3	24,8	-54,5	-66,8
65º	0,661	Vila Santa Rosa	511,3	-859,4	-10,0	27,1	0,159	-0,108	21,4	24,5	-52,8	-67,5
66º	0,661	Belém	560,0	-820,5	-4,4	28,2	0,150	-0,163	21,2	24,7	-54,5	-67,0
67º	0,660	Alta Tensão	303,1	-918,2	-10,8	29,2	0,146	-0,195	21,7	24,9	-52,9	-66,5
68º	0,659	Três Marias	277,0	-748,2	-8,1	28,1	0,156	-0,161	21,3	24,6	-53,7	-67,2
69º	0,658	Guanabara	950,0	-766,5	-17,2	27,6	0,155	-0,132	21,3	24,6	-53,7	-67,2
70º	0,658	Canto do Sabiá	168,8	-770,4	-11,4	27,8	0,171	-0,082	21,3	24,6	-53,8	-67,5
71º	0,658	Morro dos Macacos	326,9	-821,5	-6,9	28,4	0,149	-0,122	21,3	24,6	-53,8	-67,2
72º	0,657	Vila Inestan	497,2	-875,2	-8,5	28,3	0,129	-0,122	21,4	24,5	-52,9	-67,5
73º	0,657	Biquinhas	259,8	-769,7	-5,2	28,2	0,145	-0,191	21,3	24,6	-53,4	-67,4
74º	0,655	João Alfredo	223,4	-810,5	-3,3	28,5	0,165	-0,184	21,3	24,7	-54,3	-67,0
75º	0,655	Cônego Pinheiro	289,6	-826,1	-5,8	28,1	0,196	-0,157	21,3	24,8	-54,7	-66,9
76º	0,655	Vila Átila de Paiva	473,2	-929,3	-3,8	29,4	0,196	-0,097	20,9	24,2	-53,5	-67,4
77º	0,654	Boa Esperança	352,3	-770,7	-14,6	27,7	0,193	-0,123	21,3	24,6	-53,7	-67,3
78º	0,653	Vila São Tomaz	265,3	-797,9	-6,8	27,8	0,137	-0,147	21,4	24,6	-53,3	-67,4
79º	0,653	São Rafael	445,8	-827,4	-6,2	27,5	0,175	-0,153	21,3	24,7	-54,4	-66,9
80º	0,651	Vila Nova Cachoeirinha I	398,8	-866,3	-15,6	27,6	0,182	-0,095	21,5	24,6	-52,9	-67,6
81º	0,648	Conjunto Novo Dom Bosco	326,6	-891,8	-15,1	26,2	0,190	-0,119	21,6	24,8	-53,0	-66,8
82º	0,647	Mirante	579,1	-842,3	-12,1	25,6	0,182	-0,080	21,3	24,6	-53,6	-67,3
83º	0,646	Boa União II	214,5	-797,5	-11,8	28,3	0,155	-0,123	21,3	24,6	-53,5	-67,3

84º	0,646	Ventosa	350,5	-962,2	-9,7	28,1	0,166	-0,125	21,1	24,5	-52,7	-66,2
85º	0,646	Jardim Felicidade	192,9	-765,1	-7,7	27,4	0,155	-0,161	21,3	24,6	-53,6	-67,4
86º	0,646	Vila Santa Mônica	393,1	-818,4	-7,4	28,4	0,198	-0,146	21,3	24,8	-55,0	-67,9
87º	0,643	Vila Sesc II	250,0	-767,9	-7,5	28,5	0,134	-0,136	21,3	24,7	-54,3	-67,6
88º	0,643	Bacuraus	325,0	-753,5	-7,1	27,9	0,095	-0,151	21,3	24,6	-53,6	-67,4
89º	0,642	Novo Aarão Reis	186,1	-737,2	-7,5	27,5	0,127	-0,167	21,3	24,6	-53,6	-67,3
90º	0,641	Conjunto Capitão Eduardo	203,2	-744,9	-10,9	26,9	0,176	-0,145	21,2	24,5	-53,7	-67,2
91º	0,640	Lorena	243,3	-895,3	-8,7	28,4	0,118	-0,198	21,5	24,7	-52,7	-66,7
92º	0,639	Conjunto Minascaixa	220,9	-809,7	-9,8	28,5	0,167	-0,144	21,3	24,6	-54,0	-67,5
93º	0,639	Universo	347,2	-785,3	-5,8	28,2	0,157	-0,193	21,3	24,8	-54,5	-67,8
94º	0,636	Mariquinhas	168,6	-789,9	-9,4	27,3	0,160	-0,139	21,3	24,6	-53,7	-67,4
95º	0,635	Vila Ouro Minas	217,9	-735,6	-8,3	26,7	0,132	-0,170	21,3	24,6	-53,6	-67,3
96º	0,634	Vila São Gabriel	243,3	-768,6	-10,8	27,8	0,134	-0,155	21,3	24,6	-53,6	-67,3
97º	0,634	Vila da Luz	298,8	-759,8	-4,8	27,6	0,089	-0,181	21,3	24,6	-53,7	-67,2
98º	0,634	Vila Nossa Senhora Aparecida	245,9	-786,1	-10,4	27,9	0,184	-0,187	21,3	24,7	-54,0	-67,6
99º	0,633	Vila da Amizade	372,2	-858,2	-4,5	27,9	0,027	-0,255	21,5	24,8	-52,5	-66,2
100º	0,633	Minas Solidária - Granja IV	292,2	-808,8	-12,2	27,6	0,161	-0,107	21,2	24,6	-54,2	-67,0
101º	0,633	Vila Nova Gameleira III	193,9	-882,5	-9,4	27,7	0,050	-0,244	21,9	25,1	-52,7	-66,2
102º	0,632	Conjunto Providência	237,8	-813,3	-12,8	27,4	0,155	-0,122	21,3	24,6	-53,5	-67,3
103º	0,631	Vila São Francisco	313,6	-840,5	-11,6	25,5	0,136	-0,142	21,4	24,3	-51,8	-67,5
104º	0,629	Vila Aeroporto	49,1	-782,5	-4,2	27,6	0,091	-0,175	21,4	24,6	-53,3	-67,4
105º	0,628	Flamengo	296,4	-778,1	-6,9	28,1	0,113	-0,132	21,3	24,8	-54,7	-67,8
106º	0,628	Vila Minaslândia	287,2	-808,4	-12,2	26,8	0,158	-0,147	21,3	24,6	-53,5	-67,4
107º	0,628	Zilah Spósito	245,2	-793,2	-8,8	26,7	0,156	-0,157	21,3	24,6	-53,8	-67,4
108º	0,627	Bispo de Maura	519,0	-871,6	-4,2	27,8	0,206	-0,138	21,3	25,1	-56,3	-68,3
109º	0,626	Vila Madre Gertrudes III	271,6	-897,1	-11,2	27,4	0,032	-0,316	22,3	25,4	-52,7	-66,1
110º	0,626	Conjunto Serra Verde	206,9	-793,8	-8,2	27,2	0,152	-0,164	21,3	24,6	-54,0	-67,5
111º	0,623	Apolônia	301,4	-818,7	-6,8	28,6	0,159	-0,178	21,3	24,8	-55,0	-67,9
112º	0,622	Vila do Pombal	473,3	-832,0	-11,3	29,0	0,161	-0,118	21,2	24,7	-55,2	-67,8
113º	0,620	Coqueiral	246,8	-924,0	-15,4	28,4	0,164	-0,169	21,5	24,7	-53,2	-66,9
114º	0,620	Vila Tiradentes	414,3	-857,1	-7,7	29,7	0,197	-0,166	21,1	24,8	-55,6	-68,0
115º	0,619	Vila Mantiqueira	270,2	-797,0	-5,3	27,7	0,140	-0,214	21,3	24,7	-54,3	-67,6
116º	0,619	Vila de Sá	545,6	-826,2	-10,4	28,5	0,092	-0,189	21,3	24,6	-53,7	-67,3
117º	0,618	Vila São José	409,1	-875,4	-12,4	27,8	0,095	-0,189	21,5	24,6	-52,7	-67,1
118º	0,617	Beira-Linha	208,8	-746,8	-8,8	26,8	0,130	-0,208	21,2	24,6	-53,7	-67,3
119º	0,615	Vila Ipiranga	596,7	-841,0	-13,0	27,3	0,148	-0,163	21,3	24,7	-54,1	-67,5
120º	0,614	Santa Sofia	229,4	-926,7	-12,4	27,0	0,141	-0,167	21,1	24,5	-52,5	-65,9
121º	0,613	Vila Copacabana	404,9	-803,7	-5,3	28,0	0,105	-0,213	21,3	24,8	-54,5	-67,8
122º	0,610	Vila Copasa	538,5	-967,8	-7,7	27,3	0,173	-0,090	20,8	24,1	-53,3	-67,3
123º	0,609	Alto Vera Cruz	258,1	-852,6	-10,3	26,7	0,169	-0,160	21,2	24,7	-54,3	-67,0
124º	0,607	Vila Boa Vista	348,9	-850,7	-11,5	26,4	0,162	-0,164	21,2	24,6	-54,0	-67,1
125º	0,607	Vila Nova dos Milionários	569,9	-1004,1	-5,1	27,9	0,173	-0,096	20,7	24,0	-53,3	-67,3
126º	0,605	Vila dos Anjos	288,6	-848,4	-7,8	28,0	0,161	-0,173	21,3	24,9	-55,1	-67,9
127º	0,605	Vila Nossa Senhora do Rosário	299,1	-860,0	-7,8	26,6	0,154	-0,196	21,2	24,7	-54,3	-67,0
128º	0,604	Conjunto Paulo VI	153,3	-782,6	-10,9	26,0	0,146	-0,174	21,2	24,6	-53,7	-67,3

129º	0,604	Vila Nova Cachoeirinha II	268,5	-835,6	-19,3	27,7	0,141	-0,187	21,6	24,6	-52,9	-67,6
130º	0,603	Mirtes	281,3	-755,5	-8,9	27,2	0,102	-0,238	21,2	24,6	-53,7	-67,2
131º	0,599	Grotinha	196,9	-786,7	-10,6	25,4	0,136	-0,175	21,2	24,6	-53,7	-67,2
132º	0,599	Vila Bandeirantes	338,0	-1033,7	-9,6	27,2	0,114	-0,155	21,1	24,5	-52,7	-65,9
133º	0,598	São Vicente	332,2	-859,3	-9,7	27,4	0,142	-0,242	21,3	24,8	-54,1	-66,8
134º	0,598	Vila Antena	246,5	-1018,9	-13,9	26,7	0,134	-0,169	21,2	24,6	-52,3	-65,6
135º	0,596	Castelo de Manacás	74,5	-896,9	-11,5	27,7	0,100	-0,189	21,5	24,6	-52,7	-67,3
136º	0,595	Alta Tensão I	285,5	-947,6	-12,0	29,0	0,119	-0,175	21,1	24,4	-53,0	-66,8
137º	0,595	São Francisco das Chagas	471,9	-874,3	-14,8	26,9	0,109	-0,242	21,4	24,8	-53,3	-66,6
138º	0,594	Cônego Pinheiro A	53,1	-837,7	-6,7	28,1	0,153	-0,252	21,3	24,8	-54,7	-66,9
139º	0,594	Confisco	173,5	-854,6	-4,8	27,3	0,143	-0,183	21,3	24,9	-55,2	-68,0
140º	0,594	Santa Isabel	397,1	-977,5	-4,9	26,0	0,154	-0,118	21,1	24,6	-54,6	-67,0
141º	0,593	Caetano Furquim	181,2	-807,2	-10,2	27,1	0,147	-0,233	21,2	24,6	-54,1	-67,0
142º	0,591	Vila Tirol	352,5	-932,9	-3,2	28,2	0,163	-0,145	20,7	24,0	-53,6	-67,7
143º	0,586	Santo Antônio Barroquinha	203,2	-847,7	-6,2	28,2	0,070	-0,287	21,4	24,6	-53,3	-67,3
144º	0,585	Camponesa III	90,1	-810,3	-3,6	27,6	0,060	-0,245	21,3	24,7	-54,1	-67,1
145º	0,585	Vila Jardim Leblon	153,5	-803,6	-4,9	28,5	0,108	-0,267	21,3	24,8	-54,8	-67,9
146º	0,584	Conjunto São Francisco de Assis	247,9	-841,8	-8,9	27,0	0,194	-0,150	21,3	25,1	-56,4	-68,4
147º	0,584	Vila Dias	366,3	-840,3	-11,8	27,2	0,087	-0,212	21,3	24,8	-54,2	-66,8
148º	0,578	Antena Montanhês	217,5	-953,6	-15,9	26,2	0,129	-0,178	21,5	24,5	-52,5	-67,3
149º	0,575	Marieta II	486,0	-968,5	-5,3	27,6	0,183	-0,069	20,4	23,7	-53,8	-68,1
150º	0,573	São Jorge III	128,5	-953,2	-15,1	27,4	0,066	-0,267	21,3	24,7	-52,0	-65,4
151º	0,573	Mariano de Abreu	217,1	-881,5	-12,4	26,5	0,133	-0,184	21,2	24,6	-54,0	-67,1
152º	0,572	Antônio Ribeiro de Abreu	175,0	-713,1	-7,7	26,4	0,063	-0,310	21,3	24,6	-53,6	-67,3
153º	0,570	Vila Jardim Montanhês	127,0	-943,7	-15,4	27,3	0,109	-0,220	21,6	24,6	-52,5	-67,3
154º	0,566	Grota	280,0	-822,0	-3,9	26,6	0,078	-0,321	21,2	24,7	-54,1	-67,0
155º	0,566	Nova América	179,5	-779,5	-5,2	27,2	0,071	-0,282	21,3	24,7	-54,5	-67,7
156º	0,566	Sport Club	186,3	-893,7	-5,8	27,5	-0,065	-0,439	22,2	25,3	-52,7	-66,2
157º	0,565	Conjunto Bonsucesso	229,8	-924,4	-6,5	26,9	0,130	-0,152	20,6	23,9	-53,1	-67,1
158º	0,565	Vila Fumec	327,3	-976,0	-4,2	25,8	0,143	-0,180	21,1	24,6	-54,7	-67,1
159º	0,563	Vila Piratininga	288,5	-952,9	-3,8	28,5	0,163	-0,150	20,5	23,8	-53,8	-68,0
160º	0,561	Conjunto Santa Maria	217,0	-1022,3	-9,2	27,1	0,105	-0,178	21,0	24,4	-53,2	-66,3
161º	0,559	Marieta I	285,3	-944,0	-4,9	28,4	0,181	-0,133	20,4	23,7	-53,8	-68,2
162º	0,552	Vila Jardim Alvorada	139,4	-928,1	-14,7	25,4	0,104	-0,232	21,5	24,5	-52,4	-67,4
163º	0,548	Ana Lúcia	176,1	-806,8	-9,0	25,6	0,090	-0,305	21,3	24,6	-53,8	-67,2
164º	0,542	Senhor dos Passos	242,7	-899,3	-10,4	29,0	0,146	-0,183	21,1	24,8	-56,3	-68,2
165º	0,541	Pedreira Prado Lopes	313,9	-905,3	-10,9	28,0	0,160	-0,130	21,0	24,8	-56,6	-68,4
166º	0,541	Vila Viveiro	176,5	-828,6	-10,0	27,0	0,068	-0,288	21,3	24,6	-54,0	-67,5
167º	0,541	Nossa Senhora da Aparecida	297,7	-959,0	-14,5	26,5	0,131	-0,184	21,3	24,9	-55,1	-66,9
168º	0,540	Nossa Senhora da Conceição	314,0	-1007,7	-13,7	24,9	0,164	-0,144	21,3	24,9	-55,1	-67,0
169º	0,535	Novo Ouro Preto	151,1	-892,2	-17,5	25,5	0,083	-0,257	21,4	24,4	-52,1	-67,4
170º	0,533	Novo Lajedo	36,2	-751,5	-15,8	27,0	0,047	-0,283	21,3	24,6	-53,6	-67,3
171º	0,532	Pindura Saia	450,0	-954,3	-8,2	25,1	0,083	-0,178	21,1	24,5	-54,7	-67,2
172º	0,527	Vila Trevo	223,9	-835,3	-10,4	27,0	0,108	-0,223	21,3	25,1	-56,4	-68,4
173º	0,527	Vila Formosa	459,9	-989,1	-6,2	28,1	0,201	-0,098	20,1	23,4	-54,1	-68,7

174º	0,524	Helena Greco	250,0	-795,7	-9,8	25,8	0,068	-0,373	21,3	24,6	-53,7	-67,4
175º	0,523	Vila Verde	187,5	-820,3	-11,4	26,5	0,067	-0,299	21,3	24,7	-54,4	-67,7
176º	0,523	Vila Nova Paraíso	338,5	-994,5	-7,1	26,3	0,138	-0,171	20,3	23,7	-53,1	-67,1
177º	0,522	Vila Novo São Lucas	256,0	-916,3	-16,5	26,0	0,105	-0,194	21,3	24,9	-55,3	-67,0
178º	0,521	Vila Engenho Nogueira	148,7	-914,6	-18,2	27,5	0,055	-0,317	21,5	24,5	-52,2	-67,4
179º	0,518	Vila Havaí	374,7	-904,6	-7,3	27,8	0,047	-0,278	20,5	23,9	-53,0	-66,7
180º	0,512	Vila Paraíso	167,2	-847,9	-6,0	27,7	0,041	-0,410	21,3	24,8	-54,7	-67,0
181º	0,512	Leonina	251,2	-985,6	-15,7	25,4	0,074	-0,246	21,0	24,4	-52,8	-66,1
182º	0,509	Vila Horto Florestal	384,1	-825,8	-9,2	25,5	-0,018	-0,318	21,3	24,7	-54,0	-67,2
183º	0,494	Mala e Cuia	250,0	-948,8	-7,5	27,6	0,129	-0,196	20,9	24,3	-56,2	-68,4
184º	0,493	Fazendinha	176,5	-929,7	-16,4	25,0	0,087	-0,221	21,3	24,9	-55,2	-67,0
185º	0,491	Santana do Cafezal	233,6	-964,4	-16,0	26,2	0,078	-0,237	21,3	24,9	-55,3	-67,0
186º	0,489	Teodomiro Cruz	402,3	-938,3	-18,6	26,2	0,042	-0,219	21,3	24,9	-55,3	-67,0
187º	0,488	Conjunto Jatobá	280,8	-1006,1	-9,2	28,2	0,192	-0,114	20,0	23,3	-54,2	-68,8
188º	0,486	Marçola	277,8	-1056,0	-17,3	24,5	0,124	-0,174	21,2	24,8	-55,0	-67,0
189º	0,479	Castanheira	111,5	-972,6	-8,8	27,9	0,142	-0,166	20,2	23,5	-54,0	-68,4
190º	0,476	Cristo Rei	213,8	-929,4	-14,9	25,8	0,146	-0,204	20,0	23,5	-53,0	-67,0
191º	0,464	Conjunto Taquaril	138,3	-921,8	-17,0	26,1	0,040	-0,312	21,2	24,6	-54,3	-67,0
192º	0,461	Vila Pinho	236,5	-964,9	-6,4	28,1	0,145	-0,163	19,9	23,2	-54,3	-69,0
193º	0,452	Acaba Mundo	344,0	-1032,5	-13,1	26,2	0,107	-0,227	20,8	24,2	-55,1	-67,8
194º	0,449	Vila da Área	226,2	-790,2	-13,9	26,8	-0,059	-0,445	21,2	24,6	-54,2	-67,0
195º	0,445	Santa Rita de Cássia	331,3	-1019,3	-14,0	27,1	0,142	-0,127	20,8	24,2	-57,0	-69,0
196º	0,442	Vila Batik	331,0	-995,9	-7,4	27,9	0,050	-0,174	20,1	23,4	-54,1	-68,6
197º	0,440	Bernadete	145,8	-983,4	-9,7	25,6	0,090	-0,207	20,0	23,4	-53,2	-67,3
198º	0,433	Esperança	211,9	-995,4	-12,4	27,5	0,086	-0,227	20,0	23,4	-53,5	-67,7
199º	0,431	Pantanal	264,1	-980,9	-14,9	24,7	0,004	-0,309	20,8	24,2	-53,3	-66,6
200º	0,423	Vila Cemig	219,4	-1029,0	-12,9	27,6	0,107	-0,241	20,0	23,4	-53,6	-67,9
201º	0,418	Nossa Senhora de Fátima	158,6	-1007,9	-19,0	25,0	0,028	-0,306	21,3	24,8	-55,1	-67,0
202º	0,415	Santa Rita	244,5	-1023,7	-7,3	27,1	0,157	-0,129	19,6	22,9	-54,6	-69,5
203º	0,408	Vila Santa Lúcia	372,8	-957,5	-17,4	25,8	0,101	-0,215	20,8	24,2	-56,7	-68,8
204º	0,403	Pomar do Cafezal	203,3	-970,4	-21,5	26,3	-0,030	-0,333	21,3	24,9	-55,3	-67,0
205º	0,402	São João	283,4	-1123,9	-10,8	27,0	0,125	-0,170	19,4	22,9	-53,2	-67,6
206º	0,399	Jardim do Vale	249,1	-997,7	-12,1	26,2	0,134	-0,174	19,8	23,1	-54,4	-69,1
207º	0,389	Vila Petrópolis	292,2	-1022,7	-9,8	26,6	0,202	-0,139	19,4	22,7	-54,8	-69,9
208º	0,383	Vila Mangueiras	236,4	-1001,1	-7,3	27,9	0,133	-0,186	19,5	22,7	-54,7	-69,8
209º	0,379	Estrela	253,7	-982,2	-16,0	26,2	0,072	-0,235	20,8	24,2	-57,0	-69,0
210º	0,377	Chácara Leonina	112,1	-992,3	-16,5	24,3	-0,036	-0,401	20,8	24,2	-53,3	-66,5
211º	0,375	Corumbiara	184,9	-988,4	-8,8	27,6	0,127	-0,160	19,4	22,7	-54,7	-69,8
212º	0,368	Vila Independência I	259,5	-1011,9	-9,0	27,1	0,184	-0,144	19,2	22,5	-55,0	-70,3
213º	0,337	Vitória da Conquista	129,1	-1022,9	-11,3	28,1	0,120	-0,153	19,2	22,5	-54,9	-70,2
214º	0,334	Vila Independência V	225,9	-1000,6	-11,4	28,4	0,133	-0,261	19,3	22,6	-54,9	-70,1
215º	0,296	Vila Ecológica	86,3	-981,4	-8,2	26,7	0,061	-0,277	19,3	22,6	-54,8	-70,1
216º	0,269	Vila Independência IV	154,9	-985,3	-6,2	26,8	0,019	-0,350	19,3	22,6	-54,9	-70,1
217º	0,258	Vila São Bento	128,8	-983,7	-16,5	26,3	-0,117	-0,486	20,8	24,2	-56,1	-68,5
218º	0,254	Vila Independência II	228,4	-1026,3	-13,0	27,0	0,074	-0,277	19,1	22,4	-55,1	-70,5

ANEXOS

ANEXO A – Estrutura de código da plataforma Google Earth Engine, em linguagem de programação Javascript, para acesso às imagens do satélite Landsat-8 e processamento da temperatura de superfície média para Belo Horizonte no período de recorte da pesquisa.

```
// Etapa 1 - Definir área de estudo:
var roi = ee.FeatureCollection('projects/ee-fabriciolvmgeo/assets/Limite_Belo_Horizonte_pol');

// Etapa 2 - Acessar e filtrar as coleções de imagens de interesse:
var collection = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1')
    .filterBounds(roi)
    .filterDate('2013-01-01', '2021-12-31')
    .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 1))
    .mean();

// Etapa 3 - Obter a banda 10 da imagem:
var banda10 = collection.select('B10').clip(roi);
Map.addLayer(banda10, {min:294.75390625 , max:306.87811279296875 }, 'Banda 10');

// Etapa 4 - Extrair o valor do pixel da banda 10:
var pixelValue = banda10.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.first(),
  geometry: roi,
  scale: 30
}).get('B10');

// Etapa 5 - Fornecer os parâmetros da equação, derivados dos metadados das imagens:
var c1 = 0.0003342;
var c2 = 0.1;
var k1 = 774.8853;
var k2 = 1321.0789;

// Etapa 6 - Converter os níveis de cinza em radiância:
var radiancia = banda10.expression('(banda10 * c1) + c2', {'banda10': banda10,'c1':c1,'c2': c2});
Map.addLayer(radiancia.clip(roi), {min: 0, max: 3000, palette: 'blue, lavender, yellow, red'},
'Radiancia');

// Etapa 7 - Calcular temperatura de brilho em Kelvin:
var tempK = radiancia.expression('k2 / (log((k1 / radiancia) + 1))',{'banda10': banda10,'radiancia':
radiancia,'k1': k1,'k2': k2,'c1': c1,'c2': c2});
Map.addLayer(tempK.clip(roi), {min: 0, max: 3000, palette: 'blue, lavender, yellow, red'}, 'Temperatura
em Kelvin');

// Etapa 8 - Converter para graus Celsius:
var tempC = tempK.subtract(273.15);

// Etapa 9 - Adicionar a imagem de temperatura de superfície ao mapa interativo:
Map.addLayer(tempC.clip(roi), {min: 15, max: 40, palette: 'blue, lavender, yellow, red'}, 'Temperatura
de Superfície');
Map.centerObject(roi, 11);

// Etapa 10 - Exportar a carta de temperatura de superfície média como arquivo GeoTIFF:
var tempC = tempC.clip(roi)
Export.image.toDrive({
  image: tempC,
  description: 'LST_Media_2013_2021_BH',
  scale: 30,
  region: roi.geometry().bounds(),
  fileFormat: 'GeoTIFF',});
```

ANEXO B – Estrutura de código da plataforma Google Earth Engine, em linguagem de programação Javascript, para acesso às imagens do satélite Sentinel-2 e processamento do NDVI e NDBI médio para Belo Horizonte no período de recorte da pesquisa.

```
// Etapa 1 - Definir área de estudo:
var roi = ee.FeatureCollection('projects/ee-fabriciolvmgeo/assets/Limite_Belo_Horizonte_pol');

// Etapa 2 - Acessar e filtrar as coleções de imagens de interesse:
var colecaoImagens = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED')
                .filterBounds(roi)
                .filterDate('2013-01-01','2021-12-31')
                .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',1))
                .mean();

// Etapa 3 - Calcular índices espectrais:
var ndvi = colecaoImagens.normalizedDifference(['B8','B4']) // Calculando o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada.
var ndbi = colecaoImagens.normalizedDifference(['B11','B8']); // Calculando o Índice de Urbanização por Diferença Normalizada.
var simbologias = ['red','orange','yellow','green','blue']; // Definindo uma paleta de cores padrão.

// Etapa 4 - Exibir resultados no mapa interativo:
Map.addLayer(ndvi.clip(roi), {min:-1, max:1, palette: simbologias}, 'NDVI');
Map.addLayer(ndbi.clip(roi), {min:-1, max:1, palette: simbologias}, 'NDBI');
Map.centerObject(roi,10);

// Etapa 5 - Recortar e exportar os índices gerados como arquivo GeoTIFF:
var ndviClip = ndvi.clip(roi)
var ndbiClip = ndbi.clip(roi)

Export.image.toDrive({
  image: ndvi,
  description: 'NDVI_Medio_2013_2021_BH',
  scale: 10,
  region: roi.geometry().bounds(),
  fileFormat: 'GeoTIFF',});
```

ANEXO C – Exemplo de Avaliação de Risco Operacional elaborado para sobrevoo com RPA na Vila Sumaré, segundo normas da RBAC-E nº94/ANAC e IS-E nº94-003.

IDENTIFICAÇÃO	
Cenário operacional:	Mapeamento Vila Sumaré
Operador:	Fabrício Lisboa Vieira Machado
CPF ou CNPJ:	***.***.***-**
Aeronave:	DJI Phantom 4 Pro
Registro da aeronave (SISANT/ANAC):	PP-991071150
Registro de voo (SARPAS/DECEA):	*****
Seguro de Responsabilidade Civil do Transportador Aéreo:	44651104785680735 (MAPFRE)
ASPECTOS GEOGRÁFICOS DO VOO	
Município:	Belo Horizonte - MG
Localidade/Bairro:	Vila Sumaré
Latitude de referência (Y):	
Longitude de referência (X):	
Altitude do terreno:	~860 metros
Condição do tempo:	Estável (sistema de alta pressão)
Velocidade do vento:	~8 km/h
Data de voo:	15/10/2022
Janela de voo:	11:00 AM a 14:00 PM
ANÁLISE DO RISCO	
Situação I:	**Perda do *link***
Probabilidade de ocorrência:	1
Severidade da ocorrência:	D
Risco:	Risco muito baixo
Tolerabilidade:	1D
Medidas de mitigação do risco:	Realizar carga de baterias na véspera do voo, com teste de funcionamento do equipamento e de seus acessórios antes da decolagem.
Situação II:	**Existência de tráfego aéreo local**
Probabilidade de ocorrência:	3
Severidade da ocorrência:	C
Risco:	Risco moderado
Tolerabilidade:	3C
Medidas de mitigação do risco:	Consultar a plataforma Flight Radar para assegurar inexistência de tráfego aéreo local durante a operação, bem como utilizar binóculo para inspeção.
Situação III:	**Presença de pessoas não anuentes**
Probabilidade de ocorrência:	3
Severidade da ocorrência:	D
Risco:	Baixo risco
Tolerabilidade:	3D
Medidas de mitigação do risco:	Informar às pessoas não anuentes de que se trata de operação realizada conforme procedimentos legais e pedir a não aproximação do operador em raio de 30 metros.

Probabilidade da ocorrência:

- Nível 5 (frequente): é provável que ocorra muitas vezes, ou historicamente tem ocorrido frequentemente;
- Nível 4 (ocasional): é provável que ocorra algumas vezes, ou historicamente tem ocorrido com pouca frequência;
- Nível 3 (remoto): é improvável, mas é possível que venha a ocorrer, ou ocorre raramente;
- Nível 2 (improvável): é bastante improvável que ocorra e não se tem notícia de que tenha alguma vez ocorrido;
- Nível 1 (muito improvável): é quase impossível que o evento ocorra.

Severidade da ocorrência:

- Nível A (catastrófico): morte de múltiplas pessoas;
- Nível B (crítico): morte de pessoa, lesões gravíssimas, capazes de deixar sequelas significativas e/ou incapacitantes, tais como cegueira, paralisia, amputações, etc.;
- Nível C (significativo): lesões sérias a pessoas, mas não incapacitantes nem com sequelas significativas;
- Nível D (pequeno): incidentes menores, danos a objetos, animais ou vegetação no solo, lesões leves;
- Nível E (insignificante): somente danos ao equipamento.

Tolerabilidade:

			Severidade				
			Catastrófico	Crítico	Signif.	Pequeno	Insignif.
			A	B	C	D	E
Probabilidade	Frequente	5	5A	5B	5C	5D	5E
	Ocasional	4	4A	4B	4C	4D	4E
	Remoto	3	3A	3B	3C	3D	3E
	Improvável	2	2A	2B	2C	2D	2E
	Muito improvável	1	1A	1B	1C	1D	1E

- **Risco extremo** (classificações 4A, 5A e 5B): a operação não deve ocorrer e, caso esteja ocorrendo, deve cessar imediatamente, enquanto persistir a condição ou até que medidas mitigadoras suficientes reduzam o risco para um nível aceitável pelo operador. Caso ainda se decida prosseguir com a operação, controles preventivos para mitigação do risco devem ser estabelecidos, devem estar em vigor e a aprovação da hierarquia mais alta da empresa (presidente) deve ser requerida.

- **Alto risco** (classificações 3A, 4B e 5C): a operação não deveria ocorrer e, caso esteja ocorrendo, deveria cessar imediatamente, enquanto persistir a condição ou até que medidas mitigadoras suficientes reduzam o risco para um nível aceitável pelo operador. Caso ainda se decida prosseguir com a operação, controles preventivos para mitigação do risco devem ser estabelecidos, devem estar em vigor e a aprovação da hierarquia de gestão da empresa (gerente ou diretor) deve ser requerida.

- **Risco moderado** (classificações 1A, 2A, 2B, 3B, 3C, 4C, 4D, 5D, 5E): a operação pode ocorrer com controles preventivos para mitigação do risco estabelecidos e que devem estar em vigor, conforme necessários. Operações neste nível de risco deveriam ser aprovadas por nível hierárquico imediatamente superior (chefia imediata).

- **Baixo risco** (classificações 1B, 1C, 2C, 2D, 3D, 3E, 4E): a operação pode ocorrer e controles preventivos para mitigação de risco e aprovação por nível hierárquico imediatamente superior (chefia imediata) são opcionais.

- **Risco muito baixo** (classificações 1D, 1E e 2E): a operação é aceitável como concebida, e nenhum controle preventivo para mitigação de risco e aprovação é requerida para que ela ocorra.