



Uema
UNIVERSIDADE ESTADUAL
DO MARANHÃO



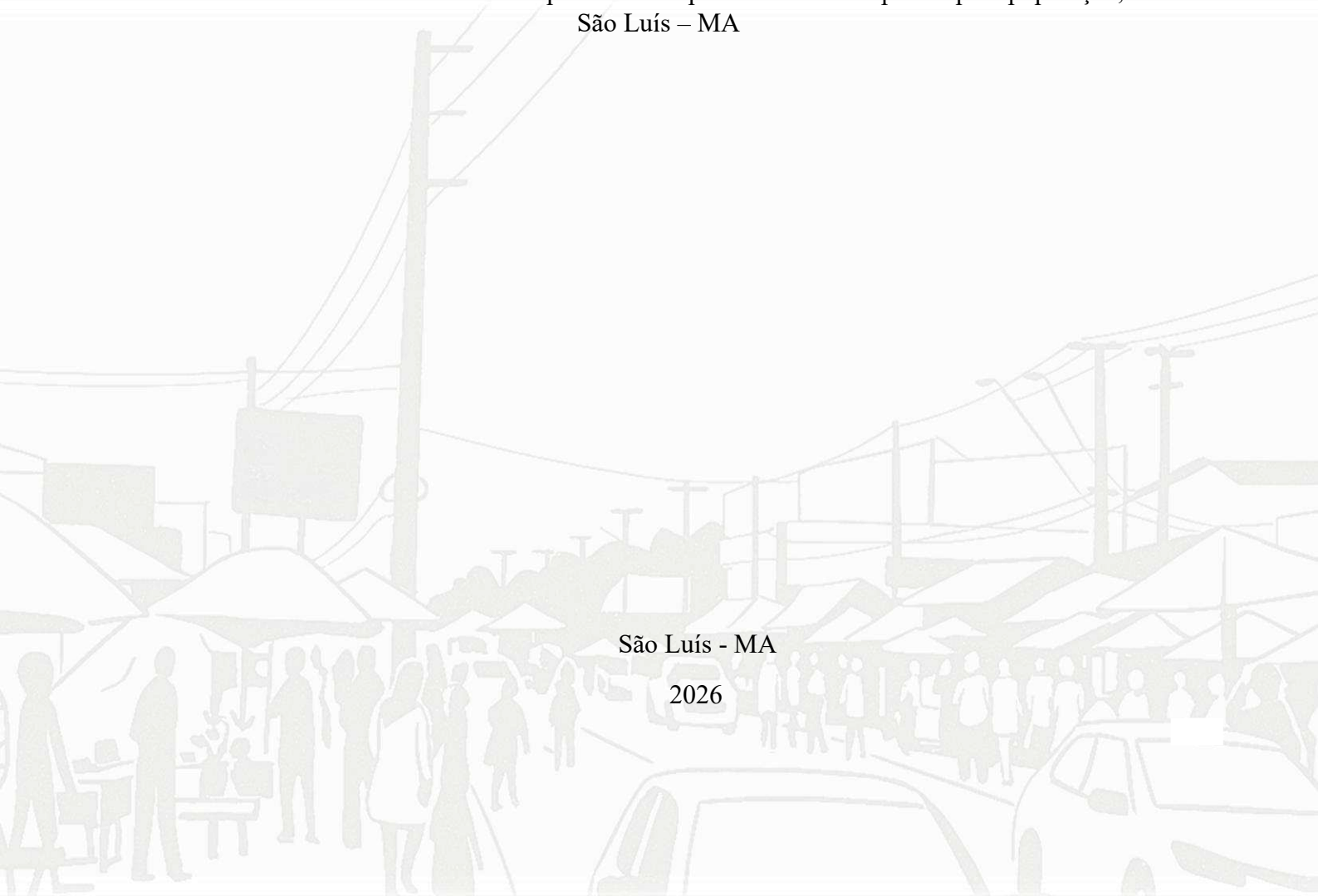
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS – CECEN
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO – PPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, NATUREZA E DINÂMICA
DO ESPAÇO – PPGEO

BRENDA GRAZIELA PEREIRA MADEIRA

**CONFORTO TÉRMICO EM ÁREAS DE INTENSA ATIVIDADE
COMERCIAL:** Variabilidade espacial da temperatura e seus impactos para população,
São Luís – MA

São Luís - MA

2026



BRENDA GRAZIELA PEREIRA MADEIRA

**CONFORTO TÉRMICO EM ÁREAS DE INTENSA ATIVIDADE
COMERCIAL: Variabilidade espacial da temperatura e seus impactos para população,
São Luís – MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço (PPGEO) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Linha de pesquisa: Dinâmica da Natureza e Conservação

Orientadora: Profa. Dra. Priscilla Venâncio Ikefuti.

São Luís - MA

2026

Madeira, Brenda Graziela Pereira.

Conforto térmico em áreas de intensa atividade comercial: Variabilidade espacial da temperatura e seus impactos para população, São Luís - MA./ Brenda Graziela Pereira Madeira. São Luís - MA, 2026.

181p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço - PPGeo) Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, 2026.

Orientadora: Profa. Dra. Priscilla Venâncio Ikefuti.

Elaborado por Luciana de Araújo - CRB 13/445


BRENDA GRAZIELA PEREIRA MADEIRA

**CONFORTO TÉRMICO EM ÁREAS DE INTENSA ATIVIDADE
COMERCIAL: Variabilidade espacial da temperatura e seus impactos para população,
São Luís – MA**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia, Natureza e Dinâmica do Espaço (PPGeo) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Aprovado em 03 /02 /2026


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **PRISCILLA VENANCIO IKEFUTI**
Data: 28/02/2026 15:11:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Priscilla Venâncio Ikefuti (Orientadora)
Universidade Estadual do Maranhão

Documento assinado digitalmente
 **JULIANA RAMALHO BARROS**
Data: 02/03/2026 13:33:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Juliana Ramalho Barros
Universidade Federal de Goiás (UFG)
Examinador(a) Externo à Instituição

Documento assinado digitalmente
 **SILAS NOGUEIRA DE MELO**
Data: 28/02/2026 21:42:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Silas Nogueira de Melo
Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Examinador(a) Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder saúde e perseverança para iniciar e concluir o Mestrado. Desde o início, eu tinha consciência de que se tratava de um trabalho árduo e exigente e justamente por isso reconheço e valorizo todas as pessoas e instituições que caminharam comigo ao longo desse processo. Dessa forma, agradeço:

Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGEO) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pela formação acadêmica e pelo suporte institucional.

De forma especial, à Profa. Dra. Priscilla Venâncio Ikefuti, minha orientadora, cuja forma de fazer ciência foi profundamente inspiradora. Sua postura como pesquisadora me motivou a buscar continuamente conhecimento, inovação e aprofundamento, mesmo diante dos desafios. Para além da orientação acadêmica, esteve presente de forma ativa no trabalho de campo, inclusive com sua própria família, desde os transectos móveis até a produção e utilização dos equipamentos. Sua disponibilidade e comprometimento, mesmo diante de inúmeras responsabilidades, constituíram um exemplo de atuação docente e científica.

À minha família, que esteve presente e envolvida na pesquisa, inclusive participando de algumas atividades de campo, muitas vezes sem saber exatamente quais seriam as demandas e os desafios do trabalho. À minha mãe, Vitória de Jesus; à minha tia, Maria; aos meus tios, Rosivaldo e Vitória; e à minha prima, Vivian, pela participação e apoio durante a pesquisa. Ao meu avô, Batista, e ao meu tio, Gonçalo, pelo incentivo constante.

Em especial, à minha mãe, que me acompanhou diariamente durante todo esse processo, confiando em mim, muitas vezes mais do que eu mesma. Sempre que eu saía do quarto após horas de estudo, ela perguntava: “Já terminou?” como se a pesquisa fosse uma atividade da graduação. Esse comentário foi marcante e responsável por arrancar sorrisos mesmo após dias longos e exaustivos de estudo.

À minha avó (*in memoriam*), cuja presença foi fundamental para a minha formação e permanece viva em minha trajetória. Sua ausência trouxe um momento de pausa e reflexão, no qual me senti estagnada, mas também fortalecida por tudo o que ela representou. Suas palavras “minha cheirosa, estude” me fizeram ser resistente e acompanharam até aqui.

Ao Edson Rodrigues, pela companhia nos silêncios produtivos: momentos em que cada um estava imerso em seus próprios estudos, mas sempre juntos, oferecendo presença, apoio e positividade.

Sem transformar este trecho em um tópico, deixo meus mais sinceros agradecimentos aos amigos que se provaram verdadeiros geógrafos e oceanógrafos resistentes ao campo: Karina

Gouvêa, Lucas Carvalho, Deuzanir Amorim, Taynara Marques e Gabriel Moreira; aos colegas de apoio técnico Ana Carolina, Daiany Lopes, Kaleb Passos e Anderson Amorim; a Yasmim Keite, Yasmine Luna, Giulia Kaliny e Vinícius Sousa, que gentilmente ofereceram suas residências para a instalação dos equipamentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de mestrado, fundamental para a realização desta pesquisa.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta trajetória fosse possível, deixo meu sincero reconhecimento.

RESUMO

Esta pesquisa analisou a relação entre conforto térmico e qualidade do ar nos municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar (MA), com foco em áreas comerciais dos bairros João Paulo, Cohab, Cidade Operária e Estrada de Ribamar. Os dados foram coletados por meio de transectos móveis e sensores fixos, utilizando termo-higrômetros para medir temperatura e umidade relativa, além do monitoramento de material particulado fino (PM_{2,5}) e da aplicação de questionários estruturados com usuários das áreas estudadas, nos períodos seco (2024) e chuvoso (2025). A análise espacial, realizada por meio de interpolação IDW no QGIS, evidenciou ilhas de calor urbanas independentemente da sazonalidade, bem como pequenas variações térmicas entre dias úteis e finais de semana, indicando a influência do uso do espaço urbano sobre o microclima local. Os índices de conforto térmico, *Heat Index* (HI) e Temperatura Efetiva (TE) apontaram risco recorrente à saúde, predominando as classes “Perigo” e “Perigo Extremo”, especialmente nos bairros João Paulo e Cohab, enquanto Cidade Operária e Maiobão apresentaram valores inferiores. A percepção térmica dos usuários esteve em conformidade com os índices, relatando desconforto e sintomas como dor de cabeça, cansaço e tontura. Quanto à qualidade do ar, os níveis de PM_{2,5} apresentaram variação sazonal, com picos superiores a 20 µg/m³ no período seco e redução durante o período chuvoso. Análises estatísticas mostraram correlação negativa com umidade relativa e fraca associação com precipitação, vento e temperatura. O modelo *Distributed Lag Nonlinear Model* (DLNM) indicou que o PM_{2,5} exerce efeito significativo apenas em níveis elevados de exposição, superiores a 20 µg/m³, com defasagem temporal aproximada de 10 dias, momento em que se observou aumento de cerca de 150% no risco relativo de internação por causas respiratórias. A regressão múltipla *stepwise* identificou a umidade relativa ($p = 0,000337$) e a velocidade do vento ($p = 0,00177$) como variáveis mais explicativas, embora o baixo R² evidencie o caráter multifatorial das internações. Os resultados reforçam a influência do clima urbano e da qualidade do ar sobre a saúde, destacando a necessidade de estratégias integradas de planejamento urbano, como mitigação do desconforto térmico, ampliação de áreas verdes, reorganização do mobiliário urbano e controle da poluição veicular, visando ambientes comerciais mais saudáveis, resilientes e socialmente justos.

Palavras-chave: clima urbano; área de intensa atividade; conforto térmico; qualidade do ar; saúde urbana.

ABSTRACT

This study investigates the interplay between thermal comfort and air quality in commercial areas of São Luís, Paço do Lumiar, and São José de Ribamar (MA), focusing on the neighborhoods of João Paulo, Cohab, Cidade Operária, and Estrada de Ribamar. Data were collected through mobile transects and fixed sensors, including thermo-hygrometers for temperature and relative humidity measurements, PM_{2.5} monitoring, and structured questionnaires administered to area users during the dry (2024) and rainy (2025) seasons. Spatial analysis using IDW interpolation in QGIS revealed persistent urban heat islands regardless of season, along with minor thermal fluctuations between weekdays and weekends, highlighting the influence of urban land use on local microclimates. Thermal comfort indices, namely the Heat Index (HI) and Effective Temperature (TE), indicated recurrent health risks, with “Danger” and “Extreme Danger” levels predominating in João Paulo and Cohab, while Cidade Operária and Maiobão exhibited comparatively lower values. Users’ subjective thermal perception aligned with these metrics, reporting discomfort and symptoms such as headaches, fatigue, and dizziness. PM_{2.5} concentrations exhibited clear seasonal variability, peaking above 20 µg/m³ during the dry season and decreasing in the rainy season. Statistical analyses revealed a negative correlation with relative humidity and weak associations with precipitation, wind, and temperature. The Distributed Lag Nonlinear Model (DLNM) showed that PM_{2.5} exerted a significant effect only at elevated exposure levels (>20 µg/m³), with a lag of approximately 10 days, corresponding to an estimated 150% increase in the relative risk of respiratory hospitalizations. Stepwise multiple regression identified relative humidity ($p = 0.000337$) and wind speed ($p = 0.00177$) as the most explanatory factors, although the low R² highlights the multifactorial nature of hospitalizations. These findings underscore the critical influence of urban climate and air quality on public health and emphasize the need for integrated urban planning strategies, including thermal comfort mitigation, expansion of green infrastructure, redesign of urban furniture, and regulation of vehicular emissions, to foster healthier, more resilient, and socially equitable commercial environments.

Keywords: urban climate; area of intense activity; thermal comfort; air pollution; urban health.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da atmosfera urbana ilustrando uma classificação em duas camadas da modificação urbana.....	26
Figura 2 - Comparação entre os tamanhos de partículas de material particulado (PM_{10} e $PM_{2,5}$), fio de cabelo humano e grão de areia	43
Figura 3 - Penetração e deposição do material particulado no sistema respiratório humano..	43
Figura 4 - Mapa de localização área de estudo.....	48
Figura 5 - Interface da ferramenta Raster Calculator	53
Figura 6 - Mapa de localização dos pontos comerciais de análise e rota percorrida por transecto móvel	55
Figura 7 - Termo-higrômetro da marca Minipa MT-241 ^a	56
Figura 8 - a) Abrigo do termo-higrômetro; b) Registro das medições por transecto móvel (18/10/2024)	56
Figura 9 - Termo-higrometro datalogger “Elitech-USB.”.....	58
Figura 10 - Delimitação perimetral de instalação do Termo-higrometro.....	58
Figura 11 - a) Imagem aérea da APA Itapiracó; b) estação meteorológica (INMET-SLZ A203)	59
Figura 12 - Planilha adquirida pelo INMET estação convencional (82992).....	60
Figura 13 - Relação entre Temperatura do ar e da Umidade Relativa e o Índice de Calor (Heat Index).....	62
Figura 14 - Classificação do Índice de Calor (Heat Index) e seus efeitos no corpo humano..	64
Figura 15 - Classes de conforto térmico Araújo (2014) adaptação de Santos e Andrade (2008)	64
Figura 16 - Plataforma de monitoramento Qlair	65
Figura 17 - Equipamento Air Quality Monitor.....	66
Figura 18 - Situação Sinótica recorte para o Brasil: a) 04/11/2024; b) 28/10/2024.....	75
Figura 19 - Situação sinótica - recorte para o Brasil: a) 22/04/2025; b) 24/04/2025	77
Figura 20 - Situação sinótica - recorte para o Brasil: a) 15/05/2025; b) 31/05/2025	79
Figura 21 - Uso e cobertura do solo da Ilha do Maranhão (2024)	82
Figura 22 - Cobertura da vegetação através do índice (NDVI) da Ilha do Maranhão – MA (2024)	83
Figura 23 - Variação da Temperatura da Superfície da Ilha do Maranhão (2024).....	84
Figura 24 - Recorte do uso e cobertura do solo da área de pesquisa (2024)	85

Figura 25 - Recorte cobertura da vegetação através do índice (NDVI) da área de pesquisa (2024)	86
Figura 26 - Recorte de estudo variação da Temperatura da Superfície da área de pesquisa (2024)	87
Figura 27 - Temperatura do ar na semana no dia 18, out. 2024 (15 h) (período seco)	89
Figura 28 - Umidade relativa do ar na semana no dia 18, out. 2024 (15 h) (período seco)	90
Figura 29 - Temperatura do ar na semana no dia 18, out. 2024 (20h) (período seco)	91
Figura 30 - Umidade relativa do ar na semana no dia 18, out. 2024 (20h) (período seco)	92
Figura 31 - Temperatura do ar final de semana no dia 27, out. 2024 (15 h) (período seco)...	94
Figura 32 - Umidade relativa do ar final de semana no dia 27, out. 2024 (15 h) (período seco)	95
Figura 33 - Temperatura do ar final de semana no dia 27, out. 2024 (20 h) (período seco)...	96
Figura 34 - Umidade relativa do ar na semana no dia 27, out. 2024 (20h) (período seco)	97
Figura 35 - Temperatura do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (15 h) (período chuvoso)	99
Figura 36 - Umidade relativa do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (15 h) (período chuvoso)	100
Figura 37 - Temperatura do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (20 h) (período chuvoso) ...	101
Figura 38 - Umidade relativa do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (20 h) (período chuvoso)	102
Figura 39 - Temperatura do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (15 h) (período chuvoso)	104
Figura 40 - Umidade relativa do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (15 h) (período chuvoso)	105
Figura 41 - Temperatura do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (20 h) (período chuvoso)	106
Figura 42 - Temperatura do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (20 h) (período chuvoso)	107
Figura 43 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial	136
Figura 44 - Área comercial do João Paulo, São Luís - MA	140
Figura 45 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial-Cohab.....	142
Figura 46 - Área comercial da Cohab, São Luís - MA.....	144
Figura 47 - Área comercial da Cohab, São Luís- MA.....	145

Figura 48 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial - Estrada Ribamar	147
Figura 49 - a) Área comercial Estrada Ribamar; b) meio fio sem arborização e c) barraca para abrigo térmico (Bairro Maiobão) - MA	149
Figura 50 - Área comercial Estrada Ribamar (Bairro Maiobão) - MA	150
Figura 51 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial – Cidade Operária.....	152
Figura 52 - Área comercial da Cidade Operária, São Luís - MA.....	155
Figura 53 - Área comercial da Cidade Operária, São Luís - MA.....	156
Figura 54 - Medições nas áreas comerciais do João Paulo, da Cohab, do Maiobão e da Cidade Operária, 30 abr.	162
Figura 55 - Imagens de campo a) Monitoramento da qualidade do ar; b) Registro aéreo de queima de biomassa; c) Emissões veiculares	164
Figura 56 - Internações por doenças respiratórias em São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar (set. de 2024 a mai. de 2025).....	166
Figura 57 - Seleção de variáveis por <i>Stepwise</i> (set. de 2024 a mai. de 2025).....	170
Figura 58 - Modelo Final de Regressão Múltipla.....	171

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sistema Clima Urbano (S.C.U.) articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção	28
Quadro 2 - Características gerais e situação sinótica das massas de ar atuantes no Nordeste brasileiro	33
Quadro 3 - Funções da Arborização Urbana e Suas Implicações Ecológicas e Sociais	39
Quadro 4 - Áreas de estudo e suas descrições.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de Qualidade do Ar e Poluentes Atmosféricos	42
Tabela 2 - Índice de qualidade do ar para os poluentes	44
Tabela 3 - Codificação da direção do vento (INMET)	60
Tabela 4 - Classificação do Índice de Calor (Heat Index) e seus efeitos no corpo humano ...	63
Tabela 5 - Diferença das variações nos horários da semana e nos fins de semana (período seco 2024).....	108
Tabela 6 - Diferença das variações nos horários da semana e nos fins de semana (período seco 2024).....	108
Tabela 7 - Comparação temperatura e umidade relativa do ar por período a partir da média dos transectos	109
Tabela 8 - Classes de conforto térmico no período seco (out. e nov. de 2024).....	131
Tabela 9 - Classes de conforto térmico no período chuvoso (abr. e mai. de 2025).....	132
Tabela 10 - Comparação das categorias de conforto térmico HI e TE.....	133

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Série climatológica da precipitação e temperatura do ar de 1994 a 2025 (INMET)	69
Gráfico 2 - Normal climatológica mensal de temperatura e precipitação (INMET 1994-2025)	70
Gráfico 3 - Variação da temperatura e precipitação (set. 2024 a mai.2025) (INMET)	71
Gráfico 4 - Matriz de dispersão - precipitação, temperatura e umidade relativa do ar (INMET)	71
Gráfico 5 - Análise rítmica, outubro 2024 (Período seco)	74
Gráfico 6 - Análise rítmica, novembro 2024 (Período seco)	76
Gráfico 7 - Análise rítmica, abril de 2025 (Período chuvoso)	78
Gráfico 8 - Análise rítmica, maio de 2025 (Período chuvoso)	80
Gráfico 9 - Diferença entre a semana (18/10) e o fim de semana (27/20) (período seco, 2024)	109
Gráfico 10 - Diferença entre a semana (10/04) e o fim de semana (17/05) (período chuvoso, 2025)	110
Gráfico 11 - Variação no <i>Heat Index</i> nos pontos comerciais de análise (período seco)	112
Gráfico 12 - Variação máxima e mínima <i>Heat Index</i> (Período seco)	113
Gráfico 13 - <i>Boxplot Heat Index</i> dos quatro pontos comerciais (período seco)	116
Gráfico 14 - Variação do desconforto térmico em pontos comerciais com base na escala NOAA (período seco)	118
Gráfico 15 - Frequência de classes de desconforto térmico por ponto comercial (período seco)	119
Gráfico 16 - <i>Heat Index</i> nos pontos comerciais de análise (período chuvoso)	121
Gráfico 17 - Variação máxima e mínima no <i>Heat Index</i> (período chuvoso)	122
Gráfico 18 - Variação máxima e mínima do <i>Heat Index</i> (período chuvoso)	124
Gráfico 19 - Variação do desconforto térmico em pontos comerciais, com base na escala NOAA (período chuvoso)	126
Gráfico 20 - Frequência de classes de desconforto térmico por ponto comercial (período chuvoso)	127
Gráfico 21 - Média da temperatura horária nas áreas comerciais da Ilha do Maranhão - MA	129
Gráfico 22 - Média da umidade relativa do ar nas áreas comerciais da Ilha do Maranhão - MA	130

Gráfico 23 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – João Paulo.....	135
Gráfico 24 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – João Paulo.....	135
Gráfico 25 - Principal atividade exercida e a sua intensidade – João Paulo.....	138
Gráfico 26 - Tempo de permanência e vestimenta –João Paulo.....	138
Gráfico 27 - Nível de conforto térmico e sintomas recorrentes.....	139
Gráfico 28 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – Cohab.....	141
Gráfico 29 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – Cohab.....	141
Gráfico 30 - Principal atividade exercida e a sua intensidade - Cohab.....	143
Gráfico 31 - Tempo de permanência e vestimenta – Cohab.....	143
Gráfico 32 - Nível de conforto térmico e sintomas recorrentes – Cohab.....	144
Gráfico 33 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – Estrada Ribamar.....	146
Gráfico 34 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – Estrada Ribamar.....	146
Gráfico 35 - Principal atividade exercida e a sua intensidade – Estrada Ribamar.....	148
Gráfico 36 - Tempo de permanência e vestimenta - Estrada Ribamar.....	148
Gráfico 37 - Nível de conforto térmico e sintomas recorrentes - Estrada Ribamar.....	149
Gráfico 38 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – Cidade Operária.....	151
Gráfico 39 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – Cidade Operária.....	151
Gráfico 40 - Principal atividade exercida e a sua intensidade – Cidade Operária.....	153
Gráfico 41 - Tempo de permanência e vestimenta, Cidade Operária.....	154
Gráfico 42 - Tempo de permanência e vestimenta, Cidade Operária.....	154
Gráfico 43 - Concentrações de PM _{2,5} na Ilha do Maranhão (set. de 2024 a mai. de 2025)...	158
Gráfico 44 - Concentrações de PM _{2,5} em relação à precipitação na Ilha do Maranhão (set. de 2024 a mai. de 2025).....	159
Gráfico 45 - Dispersão entre PM _{2,5} e variáveis climáticas na Ilha do Maranhão (2024-2025).....	160
Gráfico 46 - Esquema de correlação entre PM _{2,5} e variáveis climáticas na Ilha do Maranhão (2024-2025).....	161
Gráfico 47 - Registro da qualidade do ar, 30 abr. 2025.....	163
Gráfico 48 - Internações e obtidos por doenças respiratórias - DATASUS (set. de 2024 a mai. de 2025).....	165
Gráfico 49 - Top 3 Diagnósticos Respiratórios Predominantes - DATASUS (set. de 2024 a mai. de 2025).....	167
Gráfico 50 - DLNM PM _{2,5} (set. de 2024 a mai. de 2025).....	168

LISTA DE SIGLAS

AIH - Autorização de Internação Hospitalar
APA - Área de Preservação Ambiental
AVC - Acidente Vascular Cerebral
BNDO - Banco Nacional de Dados Oceanográficos
CHM - Centro de Hidrografia da Marinha
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente
DATASUS - Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
DLNM - *Distributed Lag Nonlinear Model*
HI - *Heat Index*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC - Índice de Calor
ICU - Ilha de Calor Urbana
IDW - *Inverse Distance Weighting*
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
IQAR - Índice de Qualidade do Ar
LST - *Land Surface Temperature*
NDVI - Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NOAA - *National Weather Service Weather Forecast Office*
OMM - Organização Meteorológica Mundial
ONU - Organização das Nações Unidas
PNMA - Política Nacional do Meio Ambiente
SCU - Sistema Clima Urbano
SIG - Sistemas de Informação Geográfica
SIH/SUS - Sistema de Informações Hospitalares do SUS
SMTT - Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes
TE - Temperatura Efetiva
UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*
UTCI - *Universal Thermal Climate Index*
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Objetivos	20
1.1.1 Geral.....	20
1.1.2 Específico	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Urbanização e produção do espaço urbano.....	21
2.2 Clima Urbano	24
2.3 Análise rítmica como abordagem da Climatologia Geográfica	30
2.3.1 Articulação de escalas e o ritmo climático.....	30
2.3.2 Dinâmicas do ritmo e sua análise diária.....	31
2.3.3 Rítmico climático e Sistemas Atmosféricos.....	32
2.4 Geotecnologias aplicadas à Climatologia Urbana.....	34
2.5 Conforto térmico	35
2.6 Função das áreas verdes na regulação microclimática.....	37
2.7 Poluição do ar	39
2.7.1 Repercussões Globais e marcos normativos no Brasil.....	40
2.7.2 Poluentes atmosféricos, saúde urbana e abordagem geográfica	45
3. MÉTODOS E METODOLOGIAS.....	47
3.1 Área de pesquisa.....	47
3.2 Procedimentos metodológicos	51
3.2.1 Processamento de imagens de satélite	51
3.2.2 Aquisição e análise de dados por meio de transectos móveis	54
3.2.3 Aquisição e análise de dados fixos.....	57
3.2.4 Índices de conforto térmico e percepção térmica da população	62
3.2.5 Aferição de poluentes.....	65
3.2.6 Análise de interações por doenças respiratórias (DATASUS)	66

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 Caracterização climática da Ilha do Maranhão	68
4.1.1 Variabilidade climática durante a pesquisa	70
4.1.2 Análise rítmica das condições atmosféricas nos períodos seco e chuvoso	72
4.2 Análise espacial: uso do solo, cobertura vegetal e temperatura da superfície da Ilha do Maranhão	81
4.3 Temperatura e umidade relativa do ar por transecto móvel nos períodos seco (2024) e chuvoso (2025)	88
4.3.1 Variação na semana 15h e 20h, 18 out. 2024 (período seco)	88
4.3.2 Variação no final de semana 15h e 20h, 27 out. 2024 (período seco).....	93
4.3.3 Variação na semana 15h e 20h, 10 abr. 2025 (período chuvoso)	98
4.3.4 Variação no final de semana 15h e 20h, 17 mai. 2025 (período chuvoso).....	103
4.3.5 Análise comparativa das variações dos transectos entre dias úteis e finais de semana, e entre os períodos seco e chuvoso	108
4.4 Análises estatísticas, conforme pontos fixos das áreas comerciais.....	111
4.4.1 Conforto térmico por meio do <i>Heat Index</i> no período seco.....	111
4.4.2 Conforto térmico por meio do <i>Heat Index</i> no período chuvoso	120
4.4.3 Conforto térmico por meio do Índice de Temperatura Efetiva (TE).....	128
4.4.4 Conforto Térmico <i>Heat Index</i> (HI) vs Temperatura Efetiva (TE)	133
4.5 Percepção térmica conforme os entrevistados.....	134
4.6 A poluição do ar e suas implicações para a saúde da população	157
4.6.1 Análise integrada das doenças respiratórias e das concentrações de PM _{2.5}	165
4.6.2 Avaliação do DLNM e da Regressão Múltipla <i>Stepwise</i> para validação do PM _{2.5} ..	168
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	172
REFERÊNCIAS	174
ANEXO I - QUESTIONÁRIO CONFORTO TÉRMICO.....	181

1. INTRODUÇÃO

O ambiente urbano promove alterações na dinâmica climática das cidades. Os efeitos causados pela variabilidade dos elementos climáticos, como radiação, temperatura, umidade e velocidade do ar, são uma questão preocupante, ainda mais quando somados às concentrações de substâncias prejudiciais à qualidade do ar.

“Do ponto de vista da saúde, o ambiente térmico, em áreas urbanas, apresenta forte relação entre a termorregulação e a regulação circulatória, que levam à sobrecarga do organismo e ao comprometimento da saúde” (Ribeiro *et al.*, 2016, p. 67).

O conforto térmico é fundamental para a saúde e o bem-estar das pessoas e pode ser afetado por alguns elementos climáticos, como a temperatura e a umidade do ar. Por isso, estudos que envolvam o clima urbano e o conforto térmico, principalmente em áreas de atividade comercial, onde há um intenso fluxo de pessoas, são cruciais para compreender a grandeza desses fenômenos nessas áreas das cidades.

O presente estudo abrange três municípios localizados na Ilha do Maranhão: São Luís, a capital, São José de Ribamar e Paço do Lumiar, todos pertencentes à região metropolitana do Estado. Segundo dados do IBGE (2022), São Luís possui cerca de 1.037.775 habitantes; São José de Ribamar, 244.579; e Paço do Lumiar, 145.643.

O clima predominante da região é do tipo tropical úmido, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo de todo o ano, em função da baixa latitude e da proximidade com a Linha do Equador. O regime pluviométrico apresenta dois períodos sazonais bem definidos: um período chuvoso, concentrado principalmente entre os meses de janeiro e junho, e um período seco, entre julho e dezembro, conforme a classificação climática do IBGE (1978).

A presente pesquisa teve como objetivo analisar a dinâmica dos elementos climáticos e a concentração de poluentes atmosféricos em pontos estratégicos da Ilha do Maranhão, com ênfase em áreas de intensa atividade comercial. Esses espaços se caracterizam por elevada densidade de edificações, reduzida cobertura vegetal e intenso fluxo de veículos, o que torna essencial a avaliação do conforto térmico da população que circula e desenvolve atividades laborais nessas regiões.

A avaliação dessas áreas seguiu com análise de dados de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, velocidade do vento e investigação dos níveis de material particulado, a fim de compreender como esses fatores influenciam o microclima urbano e afetam o bem-estar humano. A partir da análise dos dados coletados, foi possível identificar os riscos potenciais à saúde decorrentes da exposição prolongada a temperaturas elevadas e à poluição atmosférica,

especialmente entre indivíduos com permanência diária nesses ambientes.

Diante desse contexto, a pesquisa evidencia uma temática essencial para a saúde e o bem-estar da população. Seus resultados contribuem para o aprofundamento do debate sobre o clima urbano e seus efeitos no conforto térmico, subsidiando a formulação de ações de adaptação e mitigação por meio de políticas públicas voltadas à melhoria da qualidade de vida e do bem-estar nas cidades.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Analisar o conforto térmico e a qualidade do ar em espaços urbanos de intensa atividade comercial, bem como suas implicações para a população das cidades metropolitanas de São Luís, São José de Ribamar e Paço do Lumiar, no Maranhão.

1.1.2 Específico

- Espacializar a variabilidade da temperatura e da umidade por meio de transectos móveis e fixos, aplicados em pontos e trajetos específicos de áreas comerciais;
- Analisar o conforto térmico por meio de índices, utilizando dados primários obtidos em pontos fixos durante os períodos chuvoso e seco;
- Entender a percepção de conforto térmico da população por meio questionários;
- Analisar a concentração estimada de $PM_{2,5}$ e a aferição pontual de outros poluentes, classificando a qualidade do ar segundo o CONAMA (Brasil, 2024) e relacionando-a às interações por doenças respiratórias.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico exprime os fundamentos teóricos que contribuíram para a análise da variabilidade da temperatura e da umidade relativa em ambientes de intensa atividade comercial e suas consequências ao bem-estar humano. Esse embasamento teórico foi necessário para orientar os procedimentos metodológicos e as técnicas que foram adotadas para a análise dos resultados da pesquisa. As referências consistem em livros, artigos, teses, dissertações e outras fontes de cunho acadêmico.

2.1 Urbanização e produção do espaço urbano

A urbanização constitui um processo histórico vinculado à industrialização e à modernização econômica, responsável pela crescente concentração populacional nas cidades e por profundas transformações socioespaciais (Corrêa, 1989; Santos, 1993; Moura, 2003), produzindo impactos que repercutem, inclusive, sobre o clima urbano. Trata-se, portanto, de uma temática essencial para a compreensão das dinâmicas sociais e ambientais nas cidades.

De acordo com Corrêa (1989), a urbanização está diretamente relacionada à organização e à transformação do espaço urbano, entendido como um conjunto de diferentes usos da terra que expressam as relações sociais e econômicas da sociedade capitalista.

O espaço urbano, portanto, não é neutro, trata-se de uma construção histórica e social produzida por agentes que atuam de forma desigual, resultando em fragmentação, articulação e profundas desigualdades socioespaciais (ibidem).

Essa perspectiva converge diretamente com as ideias de Milton Santos, para quem a urbanização não pode ser reduzida a um dado estatístico ou ao aumento da população urbana, devendo ser expressa a partir dos processos históricos e econômicos que influenciam na organização espacial e redefinem a vida social (Santos, 1993).

No contexto brasileiro, esse processo assume características particulares. Ao final do século XX, o país alcançou a “urbanização da sociedade e a urbanização do território” (ibidem, p. 9), superando uma fase anterior marcada por forte seletividade espacial.

Isso significa que a lógica urbana passou a organizar e comandar todo o território nacional, inclusive o espaço rural, integrando-o à racionalidade técnico-científica própria do meio urbano (ibidem). Em outras palavras, não se trata apenas do crescimento das cidades, mas da difusão de valores, técnicas e formas de organização por todo o território.

Contudo, ressalta-se que esse processo não ocorreu de forma homogênea, sendo desigual e beneficiando determinadas regiões e grupos sociais, o que contribuiu para a manutenção e o aprofundamento das disparidades socioespaciais no país (ibidem).

Já para Moura (2003), o processo de urbanização brasileiro é caracterizado pela rapidez e forte concentração espacial, que contribuiu para essas profundas desigualdades na organização do espaço urbano, conforme citado:

O processo de urbanização brasileiro caracteriza-se pela rapidez com que se deu e pela forte concentração espacial, resultante da articulação entre a dinâmica econômica e a ação do Estado, o que produziu profundas desigualdades na organização do espaço urbano e regional (Moura, 2003, p. 27-28).

Santos (1993) interpreta essa articulação com a dinâmica econômica e ação estatal como um processo de caráter “corporativo”, moldado pelos interesses de grandes agentes hegemônicos. Nessa perspectiva, rompe-se com a ideia de que o crescimento desordenado decorre da ausência de planejamento; ao contrário, ele resulta da própria forma como o território é estruturado para atender às demandas do capital.

Nesse processo, os investimentos concentram-se em áreas estratégicas à acumulação, enquanto amplos segmentos da população são empurrados para espaços precarizados. Assim, como afirma Santos (1993, p. 16), “a urbanização caótica é, na realidade, um aspecto da urbanização corporativa e uma resposta à constituição, no território, de um meio técnico-científico”.

Como consequência, consolidaram-se cidades estruturalmente heterogêneas, marcadas pela distribuição desigual de infraestrutura e serviços:

A urbanização brasileira produziu cidades marcadas por profundas diferenças socioespaciais, nas quais coexistem áreas amplamente atendidas em infraestrutura e extensas porções urbanas precarizadas, evidenciando os limites do planejamento e das políticas urbanas no país (Moura, 2003, p. 32).

Essa lógica de organização territorial não produz apenas desigualdades sociais, mas também profundas transformações ambientais. Ao priorizar a expansão urbana orientada pelo crescimento econômico, intensificam-se as intervenções sobre a paisagem, com a impermeabilização do solo, a supressão da vegetação e a ocupação de áreas ambientalmente frágeis (Fialho, 2012).

Nesse sentido, a expansão urbana, frequentemente associada à ideia de progresso, revela seu caráter contraditório, pois altera elementos fundamentais à vida, como o solo, a água e o ar, produzindo modificações que repercutem diretamente no ambiente e nas pessoas (ibidem).

No contexto maranhense, o processo de urbanização dialoga diretamente com os debates de Corrêa (1989), Santos (1993) e Moura (2003), para os quais esse fenômeno não é neutro nem homogêneo, mas sim resultante da expressão da produção desigual do espaço.

A reorganização do espaço maranhense é, segundo Ferreira (2008, p. 8), “resultante da atuação do Estado e dos agentes econômicos sobre os fundos territoriais”. Além disso, essas políticas “expressam contradições, pois ao mesmo tempo em que disciplinam o uso do território, geram conflitos decorrentes das pressões exercidas por diferentes segmentos da sociedade” (ibidem), isto é, esse processo no Maranhão combinou elementos de planejamento com desigualdades e tensões socioespaciais, mostrando que, mesmo organizada formalmente, a ocupação não ocorreu de forma homogênea ou isenta de conflitos.

Ferreira (2008) aponta que as políticas implementadas após a década de 1920 promoveram a implantação de grandes empreendimentos e a expansão da infraestrutura energética, portuária e viária, o que contribuiu para consolidar novas centralidades e intensificar a atuação estatal e empresarial no território, reorganizando o espaço maranhense.

Uma dessas centralidades é percebida na Ilha do Maranhão, composta pelos municípios de São Luís (capital do estado), Paço do Lumiar, São José de Ribamar e Raposa. Conforme Masullo *et al.* (2013), até a década de 1950, a expansão urbana nessa região ocorreu de maneira lenta e relativamente linear, no entanto, a partir da década de 1960, houve um período de crescimento acelerado, marcado por grandes intervenções territoriais e intensificação demográfica.

Após esse período, a expansão urbana passa a se articular de forma mais evidente ao crescimento imobiliário e habitacional, com a ocupação progressiva de áreas periféricas da ilha. Como destaca Matos (2014, p. 137), “a década de 1970 representou o boom do crescimento imobiliário ludovicense”, período em que a urbanização deixa de se concentrar predominantemente no núcleo histórico, como Centro, João Paulo e Anil, e se direciona para novas frentes de ocupação.

Nesse contexto, a malha urbana avança para bairros como Turu, Cohab, Cohatrac, Cidade Operária e São Cristóvão, ao mesmo tempo em que ultrapassa os limites administrativos de São Luís, influenciando a urbanização dos demais municípios da Ilha do Maranhão, especialmente com a implantação de conjuntos habitacionais em áreas como o Maiobão, em Paço do Lumiar (Matos, 2014). Tal dinâmica revela não apenas o adensamento populacional, mas também a formação de novas centralidades intraurbanas, associadas à expansão do tecido urbano e à reestruturação socioespacial da ilha.

Esse processo conecta-se, ainda, a acontecimentos estruturantes que redefiniram os vetores de expansão urbana. Conforme Araújo (2014), a construção da Ponte Governador José Sarney, em 1969, direcionou o crescimento para o setor norte-nordeste da ilha, enquanto, na década de 1980, a instalação da Alumínios Maranhenses S/A (ALUMAR) e a implantação do Projeto Ferro Carajás reforçaram a ocupação do setor oeste, intensificando a concentração demográfica e contribuindo para o surgimento de bairros populares com déficits de infraestrutura básica, ampliando as vulnerabilidades socioespaciais.

De forma articulada a essa dinâmica, as transformações territoriais na Ilha do Maranhão ocorreram em um curto intervalo temporal, tornando-se perceptíveis no decorrer de uma única geração (CPRM, 2020). Nesse cenário, a ocupação urbana passou a incidir sobre áreas ambientalmente frágeis, como manguezais, planícies fluviais, zonas ‘intertidais’ e terrenos suscetíveis à erosão, acompanhada da retirada da cobertura vegetal e da realização de aterros em planícies de maré e fluviais, resultando na crescente artificialização do espaço e no aumento do controle antrópico sobre os sistemas naturais (ibidem).

Assim, com base nas contribuições aqui discutidas, entende-se que a urbanização promove profundas transformações socioespaciais e territoriais e, conforme indicado por Fialho (2012), tais transformações não se restringem à dimensão social e espacial, alcançando também os elementos ambientais. Desse modo, a produção e a reorganização do espaço urbano passam a interferir nas condições ambientais das cidades e, conseqüentemente, nas dinâmicas do clima urbano, o que evidencia a necessidade de aprofundar essa discussão no tópico seguinte.

2.2 Clima Urbano

A compreensão do clima urbano parte da ideia de que as cidades não são apenas cenários físicos, mas produtos de escolhas sociais, econômicas e espaciais. Conforme afirmam Ugeda Júnior e Amorim (2016), “o clima urbano surge devido à forma como a cidade é construída e, sobretudo, em função dos interesses sociais e econômicos que direcionam a produção do espaço urbano” (p. 164). Assim, o clima urbano resulta da interação contínua entre os elementos naturais e as intervenções antrópicas que remodelam o ambiente.

No cenário internacional, os estudos pioneiros de Oke (1973) reforçam essa compreensão ao demonstrar que a capacidade das cidades de modificar o ambiente atmosférico constitui um dos efeitos mais amplamente documentados da ação humana sobre o clima local. Sua contribuição consolida a ideia de que o ambiente urbano atua como um sistema climático próprio, distintivo e dinâmico.

Oke (1974) parte do princípio de que o clima experimentado pelas pessoas ocorre predominantemente na camada limite da atmosfera, isto é, a porção mais baixa da atmosfera que sofre influência direta da superfície terrestre.

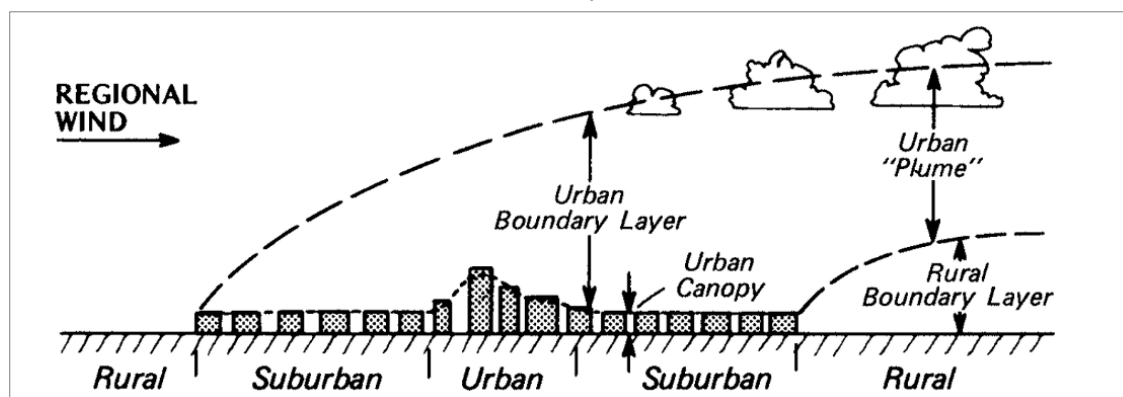
A urbanização representa uma das formas mais profundas de modificação da superfície terrestre, uma vez que substitui solos naturais e vegetação por materiais impermeáveis, como concreto, asfalto e edificações que alteram significativamente as propriedades térmicas da superfície, incluindo albedo, capacidade de armazenamento de energia térmica e rugosidade aerodinâmica (ibidem).

O autor ressalta que a urbanização altera o balanço de energia da superfície, fazendo com que as cidades passem a funcionar como superfícies climáticas artificializadas, capazes de produzir padrões próprios de temperatura, umidade e circulação do ar, distintos daqueles observados em áreas rurais adjacentes (ibidem).

O fenômeno da ilha de calor urbana é tratado como uma consequência direta das alterações no balanço de energia e na geometria urbana. A configuração dos edifícios e das ruas favorece o aprisionamento da radiação de onda longa, reduz a perda de energia térmica por ventilação e aumenta o armazenamento térmico. Além disso, as atividades humanas, como o transporte e o uso de energia, contribuem com fontes adicionais de calor antropogênico (ibidem).

A figura 1, representa a estrutura da atmosfera urbana dividida em duas camadas principais: a *Urban Canopy Layer* (UCL), que corresponde ao espaço entre as edificações e onde ocorrem processos “micrometeorológicos” decorrentes da geometria urbana, rugosidade, sombreamento, emissões antrópicas e trocas radiativas nas ruas; e a *Urban Boundary Layer* (UBL), a camada atmosférica mais espessa que se desenvolve acima dos telhados e resulta da modificação contínua das propriedades do ar à medida que o vento atravessa a cidade, ampliando a turbulência, o aquecimento e a mistura vertical (Oke, 1987).

Figura 1 - Representação esquemática da atmosfera urbana ilustrando uma classificação em duas camadas da modificação urbana



Fonte: Oke, 1987.

Observa-se a partir da figura 1 que o ar dentro da camada do “*Urban Canopy*” tende a ser mais quente do que o ar do campo ao redor, formando o fenômeno conhecido como Ilha de Calor Urbana (*Urban Heat Island - UHI*). Logo, a cidade modifica o clima de forma não intencional “*inadvertent climate modification*”. Tendo sua intensidade e forma variando conforme as condições meteorológicas, características da cidade e horário do dia (ibidem).

No contexto brasileiro, marcos teóricos fundamentais para a compreensão do clima urbano no Brasil são Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, que, em sua obra de 1976, sistematiza princípios essenciais da climatologia urbana a partir de uma síntese de Landsberg (1962), adaptada à realidade brasileira.

a) O clima urbano é a modificação substancial de um clima local, não sendo possível ainda decidir sobre o ponto de concentração populacional ou densidade de edificações em que essa notável mudança principia; b) Admite-se que o desenvolvimento urbano tende a acentuar ou eliminar as diferenças causadas pela posição ou sítio; c) Da comparação entre a cidade e o campo circundante emergiram os seguintes fatos fundamentais; 1) A cidade modifica o clima através de alterações em superfície; 2) A cidade produz um aumento de calor, complementada por modificações na ventilação na umidade e até na precipitação, que tende a ser mais acentuada; 3) A maior influência manifesta-se através da alteração na própria composição da atmosfera, atingindo condições adversas na maioria dos casos. A poluição atmosférica representa, no presente, o problema básico da climatologia das modernas cidades industrializadas (Monteiro, 1976, p.60).

A partir disso, Monteiro (1976, p. 116) compreende o clima urbano como “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”. Não buscando uma definição rígida, mas sim responder à questão: como denominar um sistema que integra fenômenos naturais e sociais?

Para isso Monteiro (1976) propõe o Sistema Clima Urbano (SCU) que visa compreender a organização climática peculiar de um espaço urbano, considerando tanto os fenômenos naturais quanto os efeitos da urbanização.

Como destaca o autor, “O S.C.U. visa compreender a organização climática peculiar da cidade e, como tal, é centrado essencialmente na atmosfera, que, assim, é encarada como o operador” (Monteiro, 1976, p. 119).

Monteiro (1976, p. 119) explica que “tudo o que não é atmosférico e que se concretiza no espaço urbano, incluindo o homem e demais seres vivos, constitui elemento do sistema, estruturando-se em partes que, através de suas relações, definem atributos especiais”. Assim, o SCU reconhece que a cidade não é um espaço passivo, mas sim um conjunto complexo de elementos interconectados que influenciam diretamente a dinâmica climática local.

O autor ressalta ainda que fatores sociais e econômicos, embora não atuem diretamente como fluxos de energia, têm importância no SCU ao refletirem e repercutirem indiretamente sobre o sistema: “Toda essa atividade se reflete e repercute indiretamente no sistema em foco através de sua expressão concreta (não poderia dizer física porque o uso do solo urbano reflete elementos de naturezas diferentes)” (Monteiro, 1976, p. 119).

Dessa maneira, o SCU incorpora a ideia de que o clima urbano é moldado tanto por processos atmosféricos quanto pelas interações humanas e estruturais da cidade, sendo um sistema aberto e dinâmico (Monteiro, 1976).

Em síntese, o SCU é entendido como um sistema dinâmico, contínuo e integrado, no qual a cidade se comporta como um organismo ativo, que simultaneamente influencia e é influenciado pela atmosfera e pelos fluxos de energia que nela incidem (Monteiro, 1976).

Essa concepção se organiza em três subsistemas, “Termodinâmico”, “Físico-químico” e “Hidrometeorológico” (Quadro 1).

A partir das articulações dos subsistemas presentes no quadro 1, observa-se que o “Subsistema Termodinâmico” reúne processos associados às trocas de energia na atmosfera urbana, envolvendo radiação solar, variações térmicas, circulação de ventos e umidade. Ele se desenvolve de forma contínua e permanente, manifestando produtos típicos como ilhas de calor, alterações nos padrões de ventilação e aumento localizado da precipitação (ibidem).

Já o “Subsistema Físico-químico” concentra-se na presença e distribuição de poluentes atmosféricos, principalmente provenientes do tráfego veicular, das atividades industriais e de obras urbanas. Seu desenvolvimento é cumulativo, refletindo a capacidade da cidade de acumular e redistribuir partículas e gases na atmosfera. Os produtos desse subsistema estão diretamente associados à deterioração da qualidade do ar e ao surgimento de problemas respiratórios e oftalmológicos na população urbana (ibidem).

Por último, o “Subsistema Hidrometeorológico” está vinculado a eventos atmosféricos episódicos, como tempestades intensas, alagamentos e outros impactos decorrentes de desvios no ritmo meteorológico. Ele concentra processos de curta duração, relacionados à dinâmica hidrológica urbana e às respostas imediatas do ambiente construído (ibidem).

Quadro 1 - Sistema Clima Urbano (S.C.U.) articulações dos subsistemas segundo os canais de percepção

Subsistemas Canais	I Termodinâmico Conforto Térmico	II Físico-Químico Qualidade do Ar	III Hidrometeorológico Impacto Meteorológico
Caracterização			
Fonte	Atmosfera Radiação circulação horizontal	Atividade urbana veículos auto-motores indústrias, obras - limpeza	Atmosfera estados especiais (desvios rítmicos)
Trânsito no sistema	Intercâmbio de operador e operando	De operando ao operador	Do operador ao operando
Mecanismo de ação	Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação Núcleo ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódico (eventual)
Observação	Meteorológica especial (T. de campo)	Sanitária e meteorológica especial	Meteorológica hidrológica (T. de campo)
Correlações disciplinares e tecnológicas	Bioclimatologia Arquitetura urbanismo	Engenharia sanitária	Engenharia sanitária e infraestrutura urbana
Produtos	“Ilha de calor” Ventilação aumento de precipitação	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos diretos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários doenças respiratórias oftalmológicas etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	Controle do uso do solo tecnologia de conforto habitacional	Vigilância e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infraestrutura urbana e regularização fluvial - uso do solo
Responsabilidade	Natureza e homem	Homem	Natureza

Fonte: Adaptado de Monteiro, 1976.

As considerações de Monteiro (ibidem) evidenciam que as intervenções antrópicas na superfície urbana influenciam diretamente o clima da cidade. Ao exemplo dos revestimentos impermeáveis e de baixo albedo que possuem alta absorção da radiação solar e reemissão de energia, em contrapartida, as superfícies vegetadas atenuam esses efeitos (Oke, 1987).

Tal condição se torna ainda mais crítica em regiões de baixas latitudes, próximas à linha do Equador (0°), onde há incidência solar de forma perpendicular por longa parte do ano. Nessas áreas, são naturalmente caracterizadas por elevados valores térmicos; a expansão urbana e a substituição de superfícies naturais por materiais impermeáveis podem intensificar ainda mais o aquecimento, ampliando os extremos de temperatura (Dosio *et al.*, 2021).

A compreensão desse fenômeno em cidades brasileiras foi construída de maneira gradual e articulada ao longo das últimas décadas, com destaque para os primeiros estudos desenvolvidos por Magda Lombardo (1985), cujas pesquisas, ainda na década de 1980, inauguraram uma abordagem integrada entre clima urbano, sensoriamento remoto, uso do solo e dinâmica da metrópole.

Para Lombardo (*ibidem*) a cidade constitui um ambiente profundamente modificado pela ação humana, no qual as intervenções urbanas alteram o balanço energético e, conseqüentemente, o comportamento térmico do espaço.

Já no século XXI, Amorim (2000) é um exemplo brasileiro da ampliação desses debates ao incorporar novas escalas de observação, métodos analíticos e técnicas de geoprocessamento.

Amorim (2019) define as ilhas de calor atmosféricas como concentrações de ar mais aquecido no espaço urbano, decorrentes da interação entre as propriedades térmicas dos materiais artificiais, a impermeabilização do solo e a produção de calor de origem antrópica.

Até mesmo as cidades de médio e pequeno porte têm apresentado modificações perceptíveis em seu clima local, resultado do avanço da urbanização e da redução de áreas naturais. Essas transformações interferem diretamente no comportamento térmico do ambiente urbano e favorecem a formação de diferentes tipos de ilhas de calor (*ibidem*).

A autora propõe três categorias principais para descrever o fenômeno: a ilha de calor superficial, identificada por meio da temperatura da superfície; a ilha de calor atmosférica inferior, que se manifesta próxima ao nível do pedestre; e a ilha de calor atmosférica superior, observada em camadas mais elevadas da atmosfera urbana (*ibidem*).

A partir dessas perspectivas, o clima urbano constitui um sistema dinâmico: a cidade atua como agente modificador do balanço de energia e da atmosfera local, conforme demonstrado por Oke (1973), e também como um sistema integrado de fenômenos naturais e sociais, segundo a concepção do Sistema Clima Urbano (SCU) de Monteiro (1976). Assim, a análise do clima urbano exige métodos que considerem tanto a heterogeneidade espacial quanto a temporalidade dos processos, unindo observações intraurbanas e diferentes técnicas, como demonstram os estudos mais recentes (Lombardo, 1985; Amorim, 2000; Amorim, 2019).

2.3 Análise rítmica como abordagem da Climatologia Geográfica

Na compreensão do clima urbano Monteiro (1990) defende a necessidade de “adentrar a cidade”, de modo a captar a complexidade das transformações térmicas e atmosféricas produzidas pela dinâmica intraurbana. Dessa forma, torna-se necessária uma abordagem que ultrapasse as médias regionais convencionais, uma vez que estas tendem a homogeneizar processos que, no espaço urbano, manifestam-se de forma altamente diferenciada.

Somente a observação direta do espaço intraurbano permite apreender transformações térmicas e higrométricas que não se revelam em medições realizadas em áreas periféricas ou em estações meteorológicas padronizadas (ibidem).

O paradigma da análise rítmica emerge, assim, das críticas formuladas por Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro à climatologia tradicional, cuja base interpretativa se sustentava, sobretudo, na utilização de médias estatísticas e classificações de caráter generalizante (Ribeiro, 2000). Para o autor, tais procedimentos tendem a obscurecer a variabilidade cotidiana do tempo atmosférico e a complexidade dos processos que estruturam o clima enquanto fenômeno dinâmico, histórico e espacialmente diferenciado.

A abordagem estabelecida por Monteiro destaca-se pela adoção da ruptura em relação à tradicional e clássica definição de clima, formulada por Hann no início do século. As raízes dessa cisão estão apoiadas nas ideias de Sorre, conforme citado anteriormente, enquanto as propostas de caráter mais pragmático têm o marco inicial nos trabalhos de PEDELABORDE (1957; 1959), tidos como pioneiros no processo de incorporação dos avanços da meteorologia sinótica à climatologia geográfica (Ribeiro, 2000, p. 48).

Monteiro (1971) propõe, assim, uma abordagem orientada à compreensão dinâmica do clima, superando interpretações baseadas exclusivamente em médias e totais climatológicos que, segundo o autor, tendem a ocultar a variabilidade efetiva e a ocorrência de episódios extremos.

Nessa perspectiva, o clima não se reduz a médias estatísticas, constituindo-se como a síntese da sucessão habitual dos tipos de tempo sobre determinado lugar, cuja organização no tempo revela o seu ritmo próprio (ibidem).

2.3.1 Articulação de escalas e o ritmo climático

A leitura do clima urbano pressupõe a articulação entre diferentes escalas espaciais, uma vez que o ritmo climático se organiza prioritariamente na escala regional, sendo posteriormente modulado por fatores locais e urbanos (Monteiro, 1971).

A identidade climática regional é assegurada pela sucessão dos estados do tempo, o que confere ao clima uma organização de natureza qualitativa. Conforme afirma Monteiro (1971,

p. 12), “a individualidade regional é assegurada pela maneira pela qual os estados do tempo se sucedem ou encadeiam”. Nesse sentido, o clima urbano não pode ser analisado isoladamente, pois está inserido em um contexto regional mais amplo.

Segundo Monteiro, “a insistência no caráter ‘regional’ advém do fato de que o ritmo de sucessão de tipos de tempo se expressa no espaço geográfico na escala regional” (ibidem).

Em escalas menores, como a metropolitana e a intraurbana, as variações climáticas configuram respostas espaciais ao ritmo regional, mediadas por fatores geográficos e pela própria organização do espaço (Monteiro, 1971).

Nesse sentido, “as variações locais dentro de um quadro regional são ‘respostas’ de vários fatores, altitude, relevo, expressos numa individualização ecológica, que se revelam por variações quantitativas” (Monteiro, 1971, p. 12).

Assim, no espaço urbano, especialmente no interior das cidades, as diferenciações térmicas e atmosféricas não rompem com o ritmo climático regional, mas correspondem a modificações quantitativas associadas à urbanização, à morfologia urbana e ao uso e à ocupação do solo. Tal compreensão reforça a necessidade de uma abordagem “multiescalar” na análise do clima urbano (Monteiro, 1971).

2.3.2 Dinâmicas do ritmo e sua análise diária

A análise rítmica proposta por Monteiro enfatiza que o entendimento do ritmo climático requer o exame detalhado da variabilidade temporal dos tipos de tempo (Monteiro, 1971).

É nesse contexto que o uso exclusivo de totais anuais e médias mensais torna-se insuficiente para apreender a dinâmica climática, pois pode “diluir” a ocorrência de episódios extremos. Assim, a análise em unidades temporais menores mostra-se eficaz, ao possibilitar a associação entre os elementos climáticos e os mecanismos de circulação atmosférica regional:

Admitimos, pois, como válida a conclusão de que o ritmo climático só poderá ser compreendido através da representação concomitante dos elementos fundamentais do clima em unidades de tempo cronológico pelo menos diárias, compatíveis com a representação da circulação atmosférica regional, geradora dos estados atmosféricos que se sucedem e constituem o fundamento do ritmo (Monteiro, 1971, p. 9).

Para o autor, a ocorrência de episódios extremos no interior de um mesmo ano pode produzir repercussões geográficas significativas, mesmo quando os totais anuais não se afastam de forma expressiva da média, conforme expresso na seguinte passagem:

Do ponto de vista geográfico, de tão variadas implicações, convém que a caracterização de ‘ano seco’ e ‘ano chuvoso’, ‘frio’ ou ‘quente’ não esteja presa a critérios arbitrários de totais anuais ou mensais, mas sim ligada ao verdadeiro ritmo de variação da sucessão do tempo meteorológico (Monteiro, 1971, p. 12).

Ao enfatizar a sucessão dos estados atmosféricos, Monteiro destaca o caráter qualitativo da análise rítmica, em ênfase à compreensão genética dos fenômenos climáticos. Embora se apoie em dados quantitativos, o autor ressalta que estes somente adquirem pleno significado quando interpretados à luz dos sistemas atmosféricos responsáveis por sua gênese e do contexto regional em que se manifestam (ibidem).

Posteriormente, em “*De tempos e ritmos*”, Monteiro (2001) reafirma essa perspectiva ao argumentar que os “padrões de cadeias de tipos de tempo” são indispensáveis para uma caracterização climática que considere as condições habituais sem desconsiderar as grandes oscilações e os “acidentes” impactantes (Monteiro, 2001).

A análise rítmica se consolida como uma abordagem que interpreta o clima a partir da organização temporal, que remete à compreensão da atuação dos sistemas atmosféricos.

2.3.3 Rítmico climático e Sistemas Atmosféricos

A dinâmica do clima está diretamente relacionada ao funcionamento da circulação atmosférica, responsável por organizar os padrões do tempo nas diferentes regiões do planeta. Segundo Ayoade (1996, p. 72), “a atmosfera está constantemente em movimento”, o que indica o caráter dinâmico das condições atmosféricas, resultantes de processos contínuos de circulação do ar e redistribuição de energia.

Esse movimento tem como fator principal o “desequilíbrio na radiação líquida entre as baixas e as altas latitudes” (ibidem), fator que impulsiona a redistribuição de calor na Terra e estrutura a circulação geral da atmosfera.

Conforme Reboita *et al.* (2012), esse processo ocorre em função das diferenças na incidência de radiação solar entre as regiões equatoriais e polares, as quais geram contrastes de temperatura e pressão, responsáveis pela movimentação do ar e pela organização da circulação geral da atmosfera, promovendo a redistribuição de energia para manter o equilíbrio térmico da Terra, com o transporte de ar quente das regiões tropicais para latitudes mais altas e de ar frio no sentido oposto.

Segundo Ayoade (1996), entre os principais sistemas atmosféricos se destacam os anticiclones, os ciclones, os sistemas frontais e as zonas de convergência. A atuação e a alternância desses sistemas em um determinado espaço provocam mudanças nas condições atmosféricas, como variações de temperatura, umidade e pressão, as quais, conforme Oliva (2019), influenciam o clima por meio da ocorrência de eventos extremos, especialmente as chuvas intensas, que geram impactos socioambientais relevantes.

Outros fatores que influenciam esses sistemas são as características topográficas

continentais que condicionam a dinâmica atmosférica e a configuração climática regional (Ferreira e Mello, 2005).

Na América do Sul, a diversidade geográfica favorece o desenvolvimento e a atuação de diferentes sistemas atmosféricos, que contribuem para a heterogeneidade espacial e temporal da precipitação. De modo geral, a estação chuvosa ocorre no verão austral, enquanto o inverno apresenta menores totais pluviométricos (Reboita *et al.*, 2012).

No Brasil, diversos sistemas atmosféricos atuam ao longo do ano, influenciando a distribuição das chuvas e das temperaturas. Destacam-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), os sistemas frontais, os ciclones extratropicais e os Complexos Convectivos de Mesoescala (Reboita *et al.*, 2012).

No Nordeste brasileiro, diferentes massas de ar influenciam a dinâmica climática regional (Wanderley e Nóbrega, 2022). Entre elas, destaca-se a Massa Tropical Atlântica (mTa), originada no Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, caracterizada por ar quente e úmido; a Massa Tropical Atlântica Continentalizada (mTac), também de origem atlântica, porém com ar mais quente e seco; a Massa Tropical Continental (mTc), proveniente da depressão do Chaco, com ar quente e seco; e as massas Equatoriais Atlântica (mEa) e Continental (mEc), originadas, respectivamente, no Oceano Atlântico e na Amazônia Ocidental, ambas associadas a ar quente, úmido e condições de intensa convecção.

No Quadro 2, conforme Wanderley e Nóbrega (2022) podem ser observadas as principais massas de ar que atuam no Nordeste brasileiro:

Quadro 2 - Características gerais e situação sinótica das massas de ar atuantes no Nordeste brasileiro

Tipo	Origem	Características gerais	Situação sinótica típica
Tropical Atlântica (mTa)	Anticiclone semifixo do Atlântico Sul	Ar quente e úmido, com alta cobertura de nuvens	Correntes advectivas de leste-sudeste associadas a isóbaras de alta pressão provenientes do ASAS
Tropical Atlântica Continentalizada (mTac)	Anticiclone semifixo do Atlântico Sul	Ar quente e seco, alta temperatura máxima, alta taxa de insolação, baixa nebulosidade ou estratificação estável	Correntes advectivas de leste-sudeste associadas a condições anticiclônicas
Tropical Continental (mTc)	Depressão do Chaco, região tropical do continente sul-americano	Ar quente e seco, alta taxa de insolação e baixa nebulosidade	Correntes advectivas de oeste associadas a condições anticiclônicas
Equatorial Atlântica (mEa)	Oceano Atlântico – convergência intertropical	Ar quente e úmido, alta nebulosidade	Condições instáveis relativas à intensa convecção
Equatorial Continental (mEc)	Amazônia Ocidental	Ar quente e úmido, alta nebulosidade	Condições instáveis relativas à intensa convecção

Fonte: Wanderley e Nóbrega, 2022.

Entre os sistemas que regem essa dinâmica regional, destaca-se a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), descrita como uma “banda de nuvens que circunda a faixa equatorial do globo terrestre” (Ferreira e Mello, 2005, p. 17), além dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) e dos sistemas frontais que alcançam latitudes tropicais.

Em escala meso e local, destacam-se as Linhas de Instabilidade (LI), caracterizadas por bandas de nuvens do tipo *cumulus*, formadas pela intensa radiação solar tropical; os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), aglomerados de nuvens resultantes de condições locais como relevo, temperatura e pressão, capazes de provocar chuvas intensas e de curta duração; e as brisas marítima e terrestre, originadas do aquecimento diferencial entre a terra e a água (Ferreira e Mello, 2005).

Além dos sistemas atmosféricos, a circulação tropical é fortemente modulada pela termodinâmica oceânica. Enquanto o *El Niño* inibe as chuvas no Nordeste, o fenômeno *La Niña* atua de forma oposta, favorecendo a ascensão do ar e a atividade dos sistemas locais. Somado a isso, o padrão térmico do Atlântico Norte mais frio e o Sul mais quente favorece o deslocamento da ZCIT para posições mais ao sul da linha do Equador (ibidem).

De modo geral, ao considerar o clima como síntese da sucessão habitual dos tipos de tempo (Monteiro, 1971), a análise rítmica oferece os fundamentos necessários para a interpretação dos processos atmosféricos regionais, constituindo suporte conceitual para estudos do clima urbano.

2.4 Geotecnologias aplicadas à Climatologia Urbana

O avanço das geotecnologias tem contribuído significativamente para os estudos em climatologia urbana. Conforme destacado por Melo *et al.* (2015), os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) evoluíram como suporte fundamental para análises espaciais, permitindo o cruzamento de dados ambientais, climáticos e urbanos para subsidiar a tomada de decisão.

Os SIG possibilitam o armazenamento, a organização, a análise e a integração de dados espaciais, favorecendo a compreensão das dinâmicas territoriais e permitindo o uso de múltiplas camadas geoespaciais, o que facilita o geoprocessamento de informações complexas por meio de ferramentas nativas e complementos específicos (Kreling *et al.*, 2023).

Associado aos SIG, o sensoriamento remoto se consolidou como uma das principais ferramentas para a análise da dinâmica de uso e ocupação do solo. Sua principal função é fornecer informações da superfície terrestre sem a necessidade de contato direto, por meio da captação da energia refletida ou emitida pelos objetos (ibidem).

Conforme explica Florenzano (2007, p. 11), “O termo sensoriamento refere-se à obtenção dos dados, e remoto, que significa distante, é utilizado porque a obtenção é feita à distância, ou seja, sem o contato físico entre o sensor e a superfície terrestre”.

Ainda segundo a autora, “A evolução das técnicas de sensoriamento remoto e a sua aplicação envolvem um número cada vez maior de pessoas de diferentes áreas do conhecimento” (Florenzano, 2007, p. 12).

No âmbito da climatologia urbana, o sensoriamento remoto tem se mostrado particularmente eficaz na identificação e avaliação das ilhas de calor, principalmente por meio de dados térmicos e índices de vegetação (França *et al.*, 2015).

Destaca-se o uso do sensor TIRS a bordo do satélite Landsat 8, que possibilita a obtenção de temperaturas de superfície e contribui para análises térmicas em diferentes escalas espaciais (Coelho e Corrêa, 2013).

A estimativa da temperatura da superfície terrestre, nesses casos, fundamenta-se na conversão da radiância espectral em temperatura de brilho, seguida da correção dos efeitos atmosféricos e da emissividade da superfície (Weng *et al.*, 2014).

Além disso, a análise multitemporal de imagens do programa Landsat tem evidenciado a relação entre o adensamento urbano, a redução da cobertura vegetal e a intensificação das ilhas de calor de superfície. Estudos como o de Liguori e Monteiro (2024), no contexto da cidade de São Paulo, demonstram que a expansão urbana está diretamente associada ao aumento das temperaturas superficiais.

De modo complementar, Porangaba e Amorim (2019) apontam que a presença de vegetação tem papel fundamental na mitigação térmica, sendo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) uma ferramenta eficaz para representar essa variável a partir de imagens Landsat.

Entretanto, apesar do expressivo potencial que as imagens de satélite oferecem para o monitoramento ambiental, Florenzano (2007) ressalta que elas ainda são subutilizadas. Segundo a autora, essa limitação decorre principalmente da carência de conhecimento técnico, da operação e da extração de informações úteis a partir dessas tecnologias. Tal constatação reforça a necessidade da difusão do conhecimento em geotecnologias.

2.5 Conforto térmico

No âmbito do SCU, como visto anteriormente, o conforto térmico integra o subsistema termodinâmico o qual, conforme Monteiro (1976), atua como um filtro perceptivo fundamental, pois “suas relações, se expressam através a temperatura, ventilação e umidade, afetando

permanentemente todos os indivíduos” (p. 124), tornando essa temática central na compreensão das interações existentes entre clima urbano e bem-estar humano.

Nessa perspectiva, o conforto térmico pode ser compreendido como a condição em que o organismo humano mantém sua temperatura interna em equilíbrio com o meio, sem a necessidade de acionar mecanismos adicionais de termorregulação. Trata-se, portanto, de um estado resultante das trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente, cuja eficiência está associada às condições climáticas às quais o indivíduo está exposto (Frota, 2001).

Contudo, destaca-se que esse fator não depende prioritariamente de variáveis ambientais, mas também de variáveis pessoais, relacionadas à taxa metabólica, à vestimenta e às características fisiológicas dos indivíduos. Ademais, incluem-se as variáveis subjetivas, que envolvem fatores psicológicos, sociais e culturais, responsáveis por modular a percepção individual da sensação térmica (Pereira, 2019). A combinação desses elementos explica por que uma mesma condição climática pode resultar em sensações térmicas distintas entre indivíduos ou grupos sociais.

A avaliação do conforto térmico pode ser realizada tanto em ambientes internos quanto externos, embora os desafios sejam distintos entre esses contextos. Em ambientes externos, a complexidade das análises é maior, devido à intensa variabilidade temporal e espacial das condições atmosféricas e à limitada possibilidade de controle das variáveis climáticas, o que torna a aplicação de índices biometeorológicos uma estratégia metodológica fundamental (Gobo e Galvani, 2016).

Nesse contexto, diversos índices de conforto térmico foram desenvolvidos com o objetivo de estimar o grau de estresse ou bem-estar térmico em espaços abertos, como o “Índice de Desconforto Térmico” (IDT), o “Índice de Temperatura e Umidade” (ITU) e a “Temperatura Efetiva em função do vento” (TEv). Esses índices baseiam-se principalmente em parâmetros meteorológicos, como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, sendo amplamente utilizados em estudos de climatologia urbana (Leal *et al.*, 2017).

Entre esses indicadores, destaca-se o “Índice de Calor” (IC), também denominado *Heat Index* (HI), desenvolvido a partir da proposta de Steadman (1979), que considera a interação entre temperatura do ar e umidade relativa (*apud* Błażejczyk *et al.*, 2012). Em situações de alta umidade, a redução da eficiência da evaporação do suor compromete a dissipação do calor corporal, aumentando significativamente o risco de estresse térmico.

Por esse motivo, o IC é utilizado em climas quentes e úmidos, já que, segundo Nóbrega e Lemos (2011), o índice de calor expressa a sensação térmica resultante da combinação entre

a temperatura do ar e a umidade relativa, indicando o nível de estresse térmico ao qual o indivíduo pode estar submetido.

Além disso, esse índice possui uma classificação dos níveis de alerta baseada no *National Weather Service Weather Forecast Office* (NOAA), a qual permite associar os valores de temperatura aparente às suas prováveis consequências fisiológicas, variando desde condições sem risco até situações de perigo extremo, nas quais há possibilidade de insolação e até acidente vascular cerebral (AVC), sobretudo em contextos de exposição prolongada a temperaturas elevadas e de esforço físico (Nóbrega e Lemos, 2011).

Ainda entre os índices mais utilizados na análise do conforto térmico destaca-se também a Temperatura Efetiva (TE). Segundo Ayoade (1996), esse índice foi concebido para representar a sensação térmica percebida pelo corpo humano a partir da interação entre a temperatura do ar e a umidade relativa, podendo em algumas abordagens incluir a influência da velocidade do vento. A TE está relacionada ao estado de equilíbrio térmico do organismo, determinado pela relação entre o calor gerado pelo metabolismo e o dissipado por radiação, convecção e evaporação.

A formulação da Temperatura Efetiva considera que a percepção térmica é fortemente condicionada pela temperatura do ar e pela umidade relativa, uma vez que esta última interfere diretamente na evaporação do suor, mecanismo fundamental para a regulação térmica do corpo humano. Apesar da reconhecida importância da ventilação na troca de calor, em certas formulações da TE a velocidade do vento é assumida como constante ou não é incorporada explicitamente ao índice (ibidem).

Diante disso, a articulação entre climatologia e planejamento urbano assume papel central na mitigação dos efeitos negativos do clima urbano sobre o conforto térmico da população. As transformações impostas pelo processo de urbanização modificam as condições climáticas locais, repercutindo diretamente no desempenho térmico dos espaços urbanos e na eficiência das atividades humanas neles desenvolvidas (Torres *et al.*, 2020). Nesse sentido, a incorporação de estratégias urbanas capazes de atenuar o estresse térmico, como a preservação e a ampliação das áreas verdes, torna-se fundamental, uma vez que esses elementos atuam na modulação da temperatura, da umidade e da ventilação em escala local, contribuindo para a melhoria do conforto térmico em ambientes urbanos.

2.6 Função das áreas verdes na regulação microclimática

A arborização urbana desempenha um papel fundamental na promoção do conforto térmico nas cidades. As árvores atuam por meio de processos como interceptação, absorção,

reflexão e transmissão da radiação solar, contribuindo para a redução da temperatura, controle da amplitude térmica e manutenção da umidade do ar (Oliveira, 1996).

Um dos fatores envolvidos é o albedo, que indica a fração de radiação solar refletida por uma superfície. A substituição da vegetação por superfícies impermeáveis aumenta a reflexão de energia e contribui para o aquecimento urbano (Carvalho, 2006).

Em geral, áreas vegetadas possuem albedo mais baixo, enquanto regiões urbanizadas ou degradadas apresentam albedo mais alto, acumulando calor e intensificando a temperatura superficial (Ferreira Júnior e Dantas, 2018). Essa alteração no balanço energético urbano contribui para o agravamento das ilhas de calor.

Estudos internacionais demonstram que a expansão e a qualificação das áreas verdes podem gerar resfriamentos médios de 1 °C a 3 °C na temperatura superficial das cidades (Ziter *et al.*, 2019). Entretanto, a eficácia dessas intervenções depende da configuração espacial, da extensão e da qualidade da vegetação implantada (Li e Bou-Zeid, 2013).

Nesse contexto, quando distribuída de forma estratégica, a vegetação urbana pode reduzir em até 50% os custos energéticos associados à refrigeração dos ambientes, além de contribuir para a diminuição do risco de enchentes, a melhoria do conforto acústico e visual e o fortalecimento da integração entre sociedade e natureza (Oliveira, 1996).

Dessa forma, o planejamento urbano integrado, que associa infraestrutura verde, como parques, corredores arbóreos, telhados e fachadas verdes, ao uso de materiais de alta refletância e soluções hídricas, apresenta-se como estratégia eficaz para reduzir significativamente as temperaturas locais e melhorar o conforto térmico, especialmente quando adaptado às condições climáticas específicas de cada localidade (Norton *et al.*, 2015).

Conforme Paula (2004), a eficiência microclimática da vegetação está relacionada à sua extensão e densidade, sendo recomendado que a cobertura vegetal represente pelo menos 30% da superfície urbanizada para que os efeitos sejam plenamente perceptíveis. Para que essa função reguladora seja efetiva, é essencial a disponibilidade de água no solo, condição indispensável para a evapotranspiração (Paula, *ibidem*).

O quadro 3, organizado por Oliveira (1996), apresenta uma série de funções ecológicas desempenhadas pelas árvores em ambientes urbanos e os benefícios resultantes disso tanto para o meio ambiente quanto para a sociedade.

Quadro 3 - Funções da Arborização Urbana e Suas Implicações Ecológicas e Sociais

Funções	Implicações Ecológicas	Implicações Sociais
Interceptação, absorção e reflexão de radiação luminosa	Manutenção do equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos; Manutenção das altas taxas de evapotranspiração	Conforto térmico; Conforto lumínico; Conforto sonoro
Fotossíntese, Produção Primária Líquida, fluxo de energia	Manutenção do microclima; Manutenção da fauna	Manutenção da biomassa com possibilidade de integração da comunidade local
Biofiltração	Eliminação de materiais tóxicos particulados e gasosos; Incorporação nos ciclos biogeoquímicos	Melhoria na qualidade do ar e da água de escoamento superficial
Contenção do processo erosivo	Economia de nutrientes e solos; favorecimento do processo sucessional	Prevenção de deslizamentos, voçorocas, ravinamento e perda de solos; preservação dos recursos hídricos para abastecimento e recreação
Infiltração de água pluvial	Redução do escoamento superficial; Recarga de aquíferos; Diminuição na amplitude das hidrografias	Prevenção de inundações
Movimentos de massas de ar	Manutenção do clima	Conforto térmico; Difusão de gases tóxicos e material particulado do ar
Fluxo de organismos entre fragmentos rurais e o meio urbano	Manutenção da diversidade genética	Aumento na riqueza da flora e da fauna; realce na biofilia
Atenuação sonora	Aspectos etológicos da fauna	Conforto acústico

Fonte: Adaptado de Oliveira, 1996.

Nota-se no quadro 3 que a arborização urbana desempenha funções essenciais para o equilíbrio ambiental ao interceptar a radiação solar, regular o microclima e manter processos ecológicos como a fotossíntese, a “biofiltração” e o fluxo de energia. Essas funções contribuem para a conservação, além de favorecer a conectividade entre fragmentos vegetados e a diversidade genética no meio urbano (Oliveira, 1996).

Do ponto de vista social, esses serviços ecossistêmicos se refletem diretamente na melhoria da qualidade de vida, por meio do conforto térmico, lumínico e acústico, da prevenção de enchentes e deslizamentos, da melhoria da qualidade do ar e da água e do fortalecimento da relação da população com a natureza (Oliveira, *ibidem*). Assim, a arborização urbana assume papel estratégico no planejamento das cidades, integrando benefícios ambientais e sociais de forma sustentável.

2.7 Poluição do ar

A poluição do ar constitui uma das formas mais complexas de degradação ambiental, sendo capaz de provocar impactos adversos tanto sobre os seres vivos quanto sobre os

ecossistemas como um todo (Dapper *et al.*, 2016). Trata-se de um fenômeno multifacetado, que afeta diretamente a sustentabilidade ambiental e a saúde.

2.7.1 Repercussões Globais e marcos normativos no Brasil

A preocupação com a qualidade do ar e seus efeitos sobre a saúde humana remonta à Antiguidade clássica. No século IV a.C., Hipócrates, na obra *Ares, águas e lugares*, já estabelecia relações entre condições ambientais, incluindo o ar, e o estado de saúde das populações, configurando um dos primeiros registros sistematizados dessa associação (Fowler *et al.*, 2020).

Durante muitos séculos, o entendimento sobre a poluição do ar permaneceu predominantemente empírico, sem o suporte de métodos científicos capazes de identificar os constituintes atmosféricos e seus processos físico-químicos (Fowler *et al.*, 2020).

A partir da Revolução Industrial, o uso intensivo do carvão mineral ampliou significativamente as emissões de gases e partículas, transformando a poluição atmosférica em um problema estrutural nos centros urbanos industrializados (*ibidem*).

Desde então, a intensificação dos processos produtivos e da urbanização consolidou a poluição do ar como um dos principais desafios ambientais globais (*ibidem*).

No século XVII, John Evelyn publicou “*Fumifugium*” em 1661, no qual descreve a fumaça do carvão inicialmente observada no Palácio de Whitehall e seus efeitos sobre a saúde das pessoas e a degradação de edifícios. Ele combinou observações detalhadas com propostas práticas para melhorar o ar em Londres, como a reorganização das fontes de combustão. Embora não siga métodos científicos modernos, a obra é considerada um dos primeiros registros sistemáticos sobre os impactos da poluição atmosférica.

Demarcando assim, avanços decisivos que ocorreram entre os séculos XVII e XIX, com o desenvolvimento da química e da climatologia, possibilitando a identificação dos principais compostos atmosféricos e a mensuração sistemática da poluição do ar (Fowler *et al.*, 2020).

Ao longo das últimas cinco décadas, as Conferências Ambientais da Organização das Nações Unidas consolidaram a temática ambiental na agenda política internacional, ampliando progressivamente o debate sobre a relação entre degradação ambiental, desenvolvimento econômico e saúde humana. Desde a Conferência de Estocolmo, em 1972, até eventos como a Rio-92, a Rio+20 e a formulação da Agenda 2030, observam-se avanços institucionais importantes, como a criação do PNUMA e a incorporação do desenvolvimento sustentável nos documentos oficiais (Oliveira, 2022).

No entanto, o legado dessas conferências é marcado por limitações na implementação efetiva das ações propostas e pela persistência das desigualdades socioambientais, o que compromete seus impactos reais sobre as condições ambientais e de saúde da população (Oliveira, 2022).

Tais acordos e conferências internacionais influenciaram a formulação de políticas ambientais nacionais. Desse modo, no contexto brasileiro, essa incorporação ocorre seguida de tentativas, sobretudo, por meio da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), instituída pela Lei nº 6.938/1981, que estabelece diretrizes para o monitoramento e o controle da qualidade do ar no país (Brasil, 1981).

A PNMA tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, assegurando condições ao desenvolvimento socioeconômico e à proteção da dignidade da vida humana, incluindo como princípio o acompanhamento do estado da qualidade ambiental (Brasil, 1981).

Como desdobramento dessa política, foi instituído o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR), por meio da Resolução CONAMA nº 5/1989 (Conselho Nacional do Meio Ambiente), o qual estabelece as bases da política nacional de proteção da qualidade do ar no território brasileiro.

Atualmente, conforme atualização normativa do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), por meio da Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024, publicada no Diário Oficial da União em 9 de julho de 2024, são estabelecidos os limites e parâmetros técnicos que regulam a concentração de poluentes atmosféricos no território nacional (Brasil, 2024).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 506/2024, entende-se por poluente atmosférico:

Art. 2º Para efeito desta Resolução são adotadas as seguintes definições: I - poluente atmosférico: qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que torne ou possa tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade. (Brasil, 2024).

A referida resolução substitui os padrões anteriormente estabelecidos, revogando disposições da Resolução CONAMA nº 491/2018, e institui novos padrões nacionais de qualidade do ar com médias horárias, diárias e anuais, a serem implementados de forma progressiva (tabela 1).

Tabela 1 - Padrões de Qualidade do Ar e Poluentes Atmosféricos

Poluente atmosférico	Período de referência	PI-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PI-4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF (ppm)
Material particulado – mp10	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-
Material particulado – mp2,5	24 horas	60	50	37	25	15	-
	Anual ¹	20	17	15	10	5	-
Dióxido de enxofre – so2	24 horas	125	50	40	40	40	-
	Anual ¹	40	30	20	20	20	-
Dióxido de nitrogênio – no2	1 hora ²	260	240	220	200	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	10	-
Ozônio – o3	8 horas ³	140	130	120	100	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	45	-
	Anual ¹	40	35	30	20	15	-
Monóxido de carbono – co	8 horas ³	-	-	-	-	-	9
Partículas totais em suspensão – pts	24 horas	-	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	-	80	-
Chumbo – pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	-	0,5	-

1 - Média aritmética anual
 2 - Média horária
 3 - Máxima média móvel obtida no dia
 4 - Média geométrica anual
 5 - Medido nas partículas totais em suspensão

Fonte: Adaptado Brasil, 2024.

Entre os poluentes descritos, destacam-se os gases dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de nitrogênio (NO₂), monóxido de carbono (CO) e o ozônio (O₃), que possuem limites regulados conforme o tempo de exposição e concentração na atmosfera (Brasil, 2024) (tabela 1).

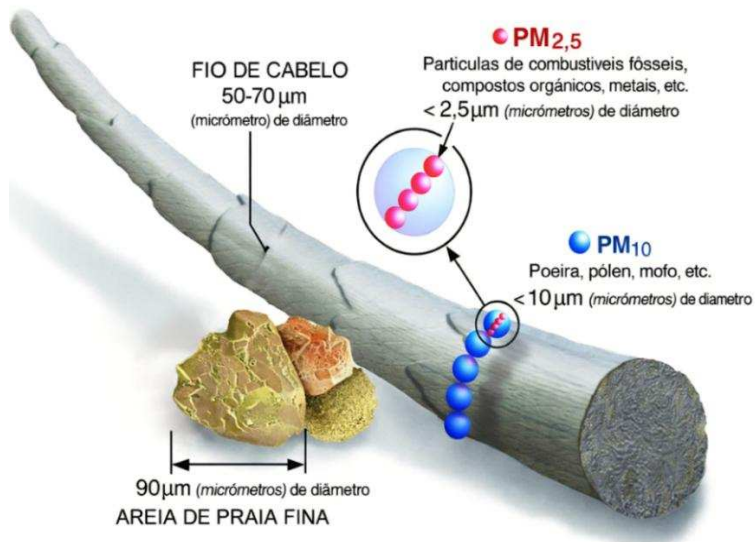
Sendo o monóxido de carbono (CO), diretamente relacionado a áreas de tráfego intenso, assim, seu controle é vital para a qualidade da mobilidade urbana, conforme o artigo 3º: “adota-se como unidade de medida de concentração dos poluentes atmosféricos o micrograma por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), com exceção do Monóxido de Carbono - CO, que será reportado como partes por milhão (ppm)” (Brasil, 2024, p.2), (tabela 1).

Já as Partículas Totais em Suspensão (PTS) e os materiais particulados MP₁₀ e MP_{2,5}, diferenciam-se pelo diâmetro, correspondendo às frações finas, sendo ambos monitorados a fim de averiguar sua persistência no ar e os efeitos **cumulativos** sobre a população urbana (Brasil, 2024).

Conforme a Resolução, “o MP₁₀ é definido como partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, com diâmetro aerodinâmico equivalente de corte de 10 μm (dez micrômetros)” (Brasil, 2024, p.1). O “MP_{2,5} compreende partículas ainda menores, com diâmetro

aerodinâmico equivalente de corte de 2,5 μm (dois micrômetros e cinco décimos de micrômetro)” (Brasil, 2024, p.1) (Figura 2).

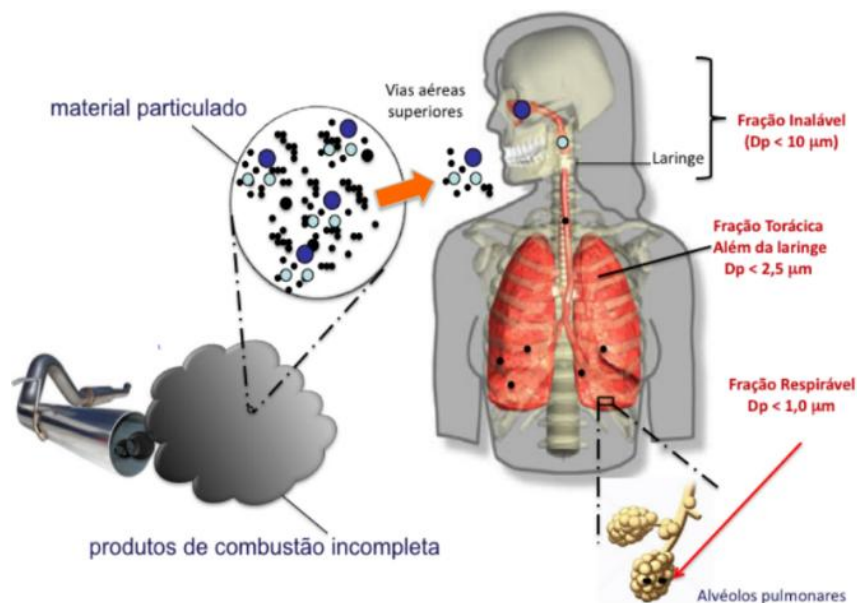
Figura 2 - Comparação entre os tamanhos de partículas de material particulado (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), fio de cabelo humano e grão de areia



Fonte: Adaptado de United States Environmental Protection Agency – EPA (2025).

A exposição a esses materiais representa um dos principais riscos à saúde humana, uma vez que partículas de diferentes diâmetros alcançam distintas regiões do sistema respiratório (Guaricero *et al.*, 2011) (Figura 3).

Figura 3 - Penetração e deposição do material particulado no sistema respiratório humano



Fonte: Guaricero *et al.*, 2011.

Para auxiliar na avaliação da qualidade do ar, a Resolução CONAMA (Brasil, 2024) propõe o Índice de Qualidade do Ar (IQAr), calculado por meio da Equação 1:

$$IQA_r = I_{ini} + \left(\frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \right) \times (C - C_{ini}) \quad (1)$$

Onde:

I_{ini} = valor do índice que corresponde à concentração inicial da faixa;

I_{fin} = valor correspondente à concentração final da faixa;

C_{ini} = concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida;

C_{fin} = concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida;

C = concentração medida do poluente.

Os valores obtidos com essa equação são posteriormente enquadrados nas faixas de classificação apresentadas na tabela 2, que demonstra os intervalos de concentração correspondentes aos diferentes níveis de qualidade do ar. Dessa forma, a categoria “N1 – Boa” é atribuída quando o valor do índice calculado permanece dentro dos limites considerados seguros para a exposição humana.

Tabela 2 - Índice de qualidade do ar para os poluentes

Qualidade	Índice	MP ₁₀ (µg/m ³)	MP _{2,5} (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)	CO (ppm)	NO ₂ (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
		24h	24h	8h	8h	1h	24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 45	0 - 15	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 40

Fonte: Adaptado Brasil, 2024.

Além do arcabouço normativo estabelecido pelo CONAMA, destaca-se o Relatório Anual de Acompanhamento da Qualidade do Ar (2023), elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Atendendo às diretrizes da CONAMA nº 491/2018, que determina a elaboração anual de relatórios com vistas à transparência, ao cumprimento dos padrões de qualidade do ar e ao suporte às políticas públicas ambientais (Brasil, 2024).

De acordo com o relatório (2024), embora o monitoramento da qualidade do ar esteja em expansão no país, ele ainda apresenta limitações estruturais e territoriais. Apenas 16 das 27 Unidades Federativas realizam algum tipo de monitoramento da qualidade do ar, e somente cinco estados publicaram relatórios atualizados nos últimos dois anos (Brasil, 2024).

Essa realidade evidencia fragilidades relacionadas à cobertura espacial das estações, à descontinuidade operacional e à ausência de monitoramento de todos os poluentes regulamentados, dificultando a avaliação integrada da poluição atmosférica e seus impactos sobre a saúde e o conforto ambiental da população (Brasil, 2024).

No Maranhão, o relatório aponta que o estado realiza o monitoramento, entretanto, não dispõe de relatórios estaduais sistemáticos e atualizados, o que limita análises temporais mais aprofundadas (Brasil, 2024).

Na capital maranhense, São Luís, o registro da qualidade do ar é pontual e marcado por discontinuidades, sendo insuficiente para representar a heterogeneidade do espaço urbano, limitando a compreensão da poluição atmosférica (Brasil, 2024).

2.7.2 Poluentes atmosféricos, saúde urbana e abordagem geográfica

No campo dos estudos climáticos e ambientais, a Geografia tem desempenhado papel central na compreensão da poluição do ar:

Estudos epidemiológicos realizados em escala global indicam associação consistente entre a exposição à poluição atmosférica e o aumento da mortalidade e da morbidade, sobretudo por doenças cardiovasculares e respiratórias (Miraglia e Gouveia, 2014).

Seus efeitos à saúde têm sido observados mesmo quando as concentrações dos poluentes se mantêm abaixo dos padrões legais de qualidade do ar, evidenciando sua relevância como problema de saúde pública (Freitas *et al.*, 2016).

Estudos realizados na Cidade do Cabo, na África do Sul, demonstram que elevações de curto prazo nas concentrações de PM₁₀, NO₂ e SO₂ estão associadas ao aumento da mortalidade por doenças respiratórias, cardiovasculares e cerebrovasculares, com efeitos mais intensos no período quente, mesmo em níveis médios de poluição (Wichmann e Vayi, 2012).

No Kuwait, país situado em uma região árida do planeta e cuja poluição atmosférica é majoritariamente composta por poeira desértica, estudos indicam que a exposição ao PM_{2.5} constitui um risco significativo à saúde respiratória, evidenciando que os impactos desse poluente extrapolam os contextos urbanos e industriais (Albahar *et al.*, 2022).

Em Portugal, investigações conduzidas em residências do distrito de Aveiro demonstraram que a exposição ao ar interior contaminado por material particulado e bioaerossóis se associa à ocorrência de diversos sintomas e agravos à saúde, reforçando a relevância da qualidade do ar, inclusive em ambientes internos (Viegas *et al.*, 2020).

Dentre estudos que avaliam a poluição atmosférica, sob o enfoque urbano, destacam-se:

Monteiro (1976) insere a qualidade do ar no subsistema físico-químico do clima urbano, afirmando que sua gênese parte da produção humana na cidade e que é nas concentrações urbanas, em função da circulação de veículos a autocombustão, da concentração industrial e de outras formas de produção, que a atmosfera se contamina.

Segundo Monteiro (1976, p. 124) “a poluição é um dos males do século, e talvez aquele que, por seus efeitos mais dramáticos, atraia mais a atenção. Associada às outras formas de poluição (água, solo etc.), a do ar é uma das mais decisivas na qualidade do ambiente urbano”.

Essa concepção é corroborada por Ayoade (1996), ao enfatizar o papel central da poluição do ar na degradação ambiental das cidades. Sendo a qualidade do ar, não apenas um fenômeno físico-químico, mas resultado direto da organização do espaço urbano, das relações sociedade–natureza e das desigualdades socioambientais produzidas no território.

Nessa perspectiva, a configuração urbana exerce papel central na dinâmica atmosférica, uma vez que as intervenções no espaço urbano influenciam diretamente os processos de dispersão, acumulação e transformação dos poluentes (Ribeiro *et al.*, 2016).

Esses efeitos ocorrem de forma desigual, atingindo com maior intensidade populações socialmente vulneráveis, especialmente crianças e idosos, mais suscetíveis aos agravos associados à poluição do ar (Torres *et al.*, 2020).

Assim, a poluição atmosférica afeta a saúde respiratória, uma vez que o sistema respiratório constitui a principal via de entrada dos poluentes, podendo desencadear ou agravar doenças como asma, DPOC, infecções respiratórias e câncer de pulmão (Arbex *et al.*, 2012).

No Brasil, o Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde (DATASUS) destaca-se como uma importante ferramenta para o monitoramento dos agravos à saúde relacionados à poluição atmosférica, ao disponibilizar dados oficiais por meio de sistemas como o Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH/SUS). Essas informações possibilitam o acompanhamento das internações por doenças respiratórias, subsidiando análises epidemiológicas e o planejamento de ações em saúde pública (Brasil, 2023).

Conforme Gouveia *et al.* (2019), evidências epidemiológicas têm demonstrado que exposições de curto e longo prazo a poluentes atmosféricos, como o material particulado, estão associadas ao aumento de agravos à saúde, especialmente às doenças do aparelho respiratório.

As contribuições de Santos e Aleixo (2024) evidenciam que o aumento da concentração de material particulado fino (MP_{2,5}) se configura como um dos principais desafios enfrentados pelas cidades brasileiras. Em Manaus, períodos caracterizados por baixa umidade estiveram associados a elevadas concentrações de MP_{2,5}, resultando em aumento das internações hospitalares por doenças respiratórias.

Dessa forma, a Geografia articula clima urbano e organização espacial, permitindo compreender as dinâmicas das cidades e seus impactos na saúde da população. Além disso, subsidia o planejamento urbano e a formulação de políticas públicas.

3. MÉTODOS E METODOLOGIAS

A presente pesquisa adota uma abordagem metodológica mista, de caráter analítico e espacial, combinando procedimentos quantitativos e qualitativos para o estudo do conforto térmico e da qualidade do ar em áreas urbanas de intensa atividade comercial. Essa integração metodológica possibilita a articulação entre dados climáticos e ambientais em relação à percepção e às repercussões à população usuária desses espaços.

Moraes (2005) destaca que a Geografia, enquanto ciência social, não pode restringir-se à descrição dos fenômenos espaciais, devendo buscar sua explicação a partir das relações sociais que os produzem. O autor critica a dicotomia entre abordagens quantitativas e qualitativas, defendendo que essa separação empobrece a análise geográfica, uma vez que método e teoria são indissociáveis. Dessa forma, a articulação entre diferentes procedimentos metodológicos contribui para uma compreensão mais ampla e crítica do espaço geográfico.

Dessa forma, a adoção do método misto possibilitou a realização de uma análise mais abrangente do presente estudo. Conforme Lacerda (2016), o método misto consiste em uma abordagem de pesquisa que articula procedimentos qualitativos e quantitativos, visando ampliar e aprofundar a análise do objeto investigado.

3.1 Área de pesquisa

Antes de qualquer descrição, torna-se necessário destacar, para fins analíticos, que a Ilha do Maranhão, adotada como área de pesquisa, constitui uma unidade geográfica situada ao norte do Maranhão, caracterizada por um espaço físico contínuo sob a administração de diferentes municípios. Embora receba o nome da capital, a ilha não corresponde apenas ao município de São Luís, abrangendo também São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa, que, em conjunto, integram a Região Metropolitana do Estado, apresentando uma articulação urbana, econômica e ambiental.

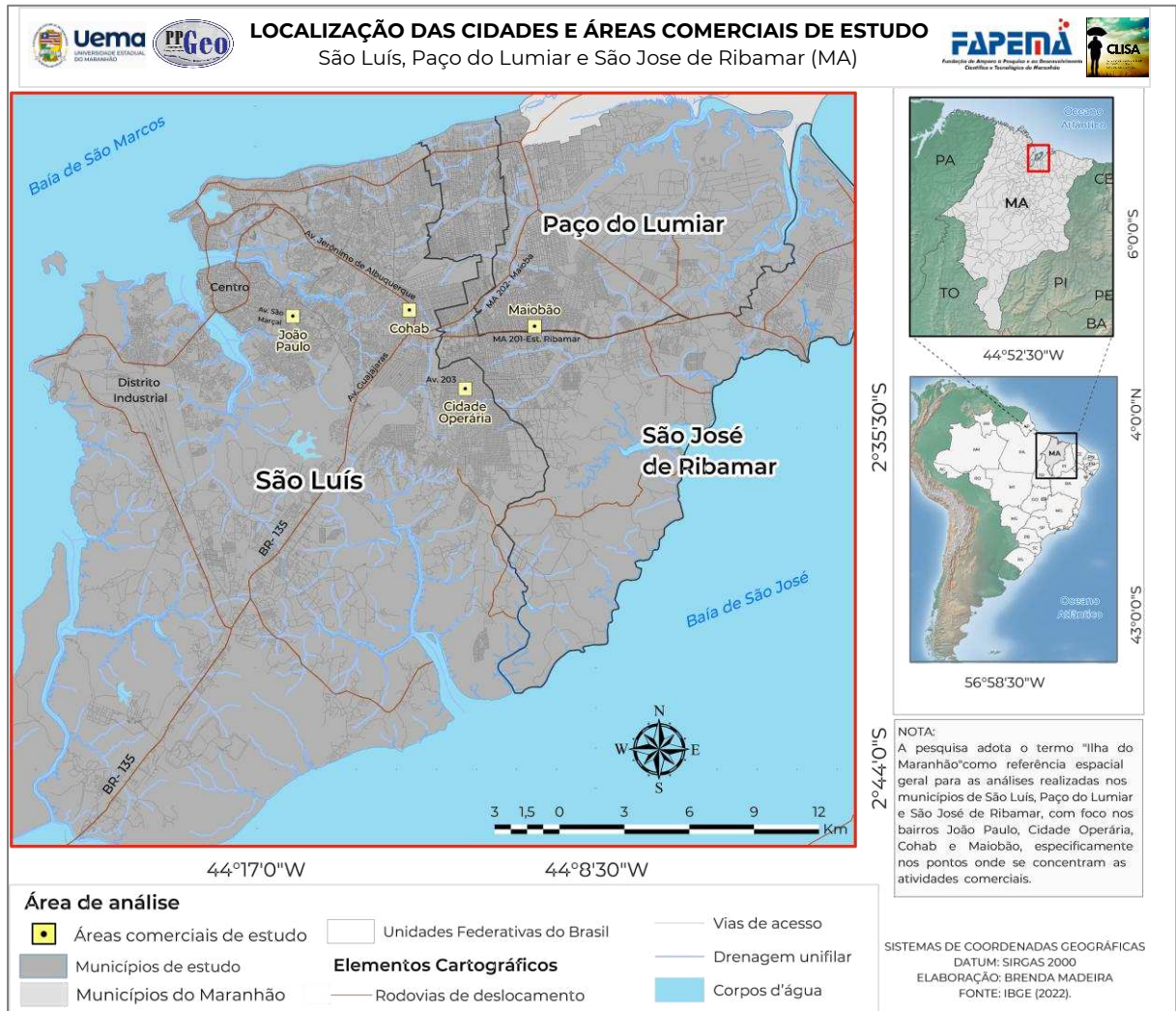
Ressalta-se que o município de Raposa não foi incluído no recorte municipal desta pesquisa, uma vez que sua dinâmica territorial é predominantemente de baixa densidade urbana, apresentando aspectos socioambientais distintos das áreas de interesse.

Dessa forma, o recorte geográfico concentrou-se em setores urbanos de intensa dinâmica socioespacial, caracterizados por elevado fluxo de pessoas e veículos, pela concentração de atividades comerciais na Ilha do Maranhão.

Foram selecionados os bairros João Paulo, Cohab Anil e Cidade Operária, localizados no município de São Luís, além da área comercial situada predominantemente no bairro

Maiobão, ao longo da Estrada de Ribamar, eixo estruturante que estabelece a ligação entre os municípios de São Luís, São José de Ribamar e Paço do Lumiar (Figura 4).

Figura 4 - Mapa de localização área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A escolha dessas áreas justifica-se por sua relevância funcional e espacial no contexto metropolitano, uma vez que concentram atividades econômicas, serviços e intenso deslocamento populacional, fatores que contribuem para a concentração de pessoas e alteração marcante e contínua da superfície urbana.

Esse fato interfere para além dos elementos climáticos, uma vez que se associa ao subsistema termodinâmico, impactando diretamente as condições de conforto térmico.

Ademais, as áreas comerciais se concentram majoritariamente em regiões de tráfego intenso, o que amplia a exposição da população às emissões veiculares, relacionando-se ao subsistema físico-químico, responsável pela concentração de poluentes atmosféricos aos quais os indivíduos estão submetidos diariamente.

Conforme a Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (SMTT) de São Luís, “O grande fluxo de viagens é das periferias para o centro, assim, as áreas centrais apresentam os maiores destinos” (SISTRAN, 2016, p.36).

Essa dinâmica de deslocamento pendular se reflete diretamente na organização espacial das áreas comerciais da Ilha, uma vez que estas estão localizadas ao longo das principais vias de acesso e concentram intenso fluxo de pessoas.

O bairro do João Paulo, situado na Avenida São Marçal, configura-se como importante corredor de ligação com o centro da capital, concentrando elevado fluxo diário de veículos.

A Cohab, por sua vez, localiza-se na Avenida Jerônimo de Albuquerque, via estruturante que conecta à Avenida Guajajaras e à BR-135, desempenhando papel na articulação federal.

A Estrada de Ribamar (MA-201) passa pelo bairro do Maiobão e destaca-se como um dos principais eixos de acesso dos municípios de Paço do Lumiar e São José de Ribamar à capital, São Luís, canalizando intensos fluxos intermunicipais.

Já a Cidade Operária, embora menos influenciada pela circulação de veículos de grande porte, apresenta uma dinâmica comercial própria, associada aos deslocamentos locais.


Outro fator relevante para a escolha deste recorte geográfico é a concentração de empresas nas áreas analisadas. Segundo o Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC), com base em registros de 2019, o bairro do João Paulo ocupa a 17ª colocação em concentração de empresas, com 365 empreendimentos; a Cohab se encontra na 15ª colocação, com 401 empreendimentos; enquanto a Cidade Operária lidera a classificação, ocupando a 1ª posição, com 901 empresas.

Embora a classificação contemple apenas os bairros que pertencem ao município de São Luís, o Maiobão não aparece nos registros por estar localizado em Paço do Lumiar. Ainda assim, foi considerado no estudo devido à sua relevância espacial e funcional, pois o bairro apresenta expressiva dinâmica econômica e forte integração aos fluxos intermunicipais, o que reforça sua importância como área estratégica de análise.

O quadro 4, a seguir, apresenta as áreas de estudo em uma perspectiva mais detalhada, que contempla aspectos geográficos e os principais elementos associados à dinâmica urbana e comercial.

Quadro 4 - Áreas de estudo e suas descrições

Áreas de estudo e suas descrições	
<p>Ponto 1 - João Paulo</p> 	<p>O bairro do João Paulo caracteriza-se como um tradicional eixo comercial e de circulação urbana de São Luís, historicamente estruturado ao longo da Avenida São Marçal, importante via de ligação com a área central da cidade. Caracteriza-se pelo uso do solo predominantemente comercial, com forte presença de comércio popular e elevada circulação de veículos e pedestres, fatores que intensificam as emissões veiculares e influenciam as condições ambientais locais.</p> <p>Coordenadas: -2.544069, -44.273114</p> <p>Altitude: 18 m</p>
<p>Ponto 2 - Cohab</p> 	<p>A Cohab configura-se como uma área de forte centralidade urbana, inserida na Avenida Jerônimo de Albuquerque, uma das principais vias estruturantes da ilha. O bairro apresenta uso do solo diversificado, com expressiva concentração de estabelecimentos comerciais e de serviços, além de intenso tráfego veicular, resultante de sua função de articulação entre diferentes zonas da cidade.</p> <p>Coordenadas: -2.543343, -44.217600</p> <p>Altitude: 35 m</p>
<p>Ponto 3 - Est. Ribamar</p> 	<p>Estrada de Ribamar (MA-201), localizada no entorno do bairro Maiobão, constitui um eixo comercial de grande movimentação, por conectar os municípios de São José de Ribamar e Paço do Lumiar. A via concentra diversas atividades comerciais ao longo de sua extensão.</p> <p>Coordenadas: -2.552035, -44.170284</p> <p>Altitude: 48 m</p>

Ponto 4 - Cidade Operária	
	<p>A Cidade Operária destaca-se como um polo comercial periférico de São Luís, apresentando elevada concentração de empresas e estabelecimentos de comércio com abrangência predominantemente local. Sua dinâmica urbana é marcada por forte circulação interna, associada principalmente aos deslocamentos da população residente, com menor influência direta de veículos de grande porte.</p> <p>Coordenadas: -2.574010, -44.203271</p> <p>Altitude: 50 m</p>

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Esse conjunto de informações possibilita a compreensão da organização espacial dos pontos analisados e subsidia a interpretação integrada das condições ambientais, do conforto térmico e da poluição atmosférica consideradas no estudo.

3.2 Procedimentos metodológicos

Este estudo teve como eixo norteador de investigação a proposta teórico-metodológica das principais referências sobre o clima urbano no Brasil, com destaque para as contribuições de Monteiro (1976). A Teoria do Sistema Clima Urbano (S.C.U.) orientou a compreensão acerca da dinâmica entre a superfície urbanizada e a dinâmica climática da cidade, especialmente no subsistema termodinâmico, responsável pelas análises de conforto térmico, e no subsistema físico-químico, relacionado à qualidade do ar. Esse arcabouço conceitual mostrou-se essencial para orientar as adaptações metodológicas aplicadas ao estudo.

O procedimento metodológico inicial consistiu no levantamento bibliográfico, realizado por meio de uma revisão sistemática de periódicos científicos e obras nacionais e internacionais que abordam o clima urbano, o conforto térmico e a qualidade do ar em áreas urbanizadas. Essa etapa contribuiu para orientar as técnicas e as abordagens analíticas adotadas na pesquisa.

3.2.1 Processamento de imagens de satélite

No âmbito do processamento de imagens de satélite, foram integradas análises da temperatura da superfície terrestre (*Land Surface Temperature* - LST) e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), bem como do uso e ocupação do solo, visando à compreensão espacial da área de estudo.

As estimativas de LST e NDVI foram realizadas a partir de imagens orbitais dos satélites Landsat 8 e Landsat 9, obtidas por meio da plataforma EarthExplorer, disponibilizada pelo United States Geological Survey (USGS). A LST foi estimada com base nas bandas térmicas 10 e 11 do sensor TIRS, com **resolução espacial nativa de 100 m**, reamostradas para **30 m** nos produtos disponibilizados pelo USGS. O cálculo do NDVI utilizou as bandas 4 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo – NIR) do sensor OLI, com resolução espacial de **30 m**. Ademais, foram empregados dados do sensor MODIS para apoio às análises.

O processamento das imagens foi conduzido no software ArcGIS Desktop 10.8, utilizando a ferramenta de álgebra de mapas (*Raster Calculator*), à qual foram aplicadas diretamente as equações matemáticas necessárias ao cálculo. Seguindo as seguintes etapas:

Inicialmente, os valores de número digital (ND) das bandas térmicas foram convertidos em radiância espectral no topo da atmosfera (TOA), em que o “X” representa a banda térmica utilizada (Equação 2)

$$L_{\lambda} = (Radiance_Mult_Band_X \times ND) + Radiance_Add_Band_X \quad (2)$$

Em seguida, a radiância espectral foi convertida em temperatura de brilho, expressa em graus Celsius, onde K_1 e K_2 correspondem às constantes de calibração térmica específicas do sensor TIRS e “273,15” é uma constante (Equação 3):

$$T(^{\circ}C) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} - 273,15 \quad (3)$$

Posteriormente, foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), utilizando as bandas 4 (vermelho - *Red*) e 5 (infravermelho próximo - *Near Infrared*, NIR) conforme a equação 4:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4)$$

Ressalta-se que neste estudo, o NDVI foi utilizado tanto como etapa auxiliar no cálculo da LST quanto como base para a análise e classificação da cobertura vegetal nas áreas urbanas.¹

A partir dos valores de NDVI, foi estimada a proporção de vegetação (Pv) (Equação 5):

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (5)$$

¹ Os valores do NDVI variam de -1 a +1, em que valores próximos a +1 indicam vegetação densa e saudável, valores próximos de 0 representam áreas com pouca ou nenhuma vegetação, e valores negativos estão geralmente associados a superfícies com água ou áreas alagadas (França *et al.*, 2015).

Em seguida, a emissividade da superfície terrestre (*Land Surface Emissivity* - LSE) foi calculada a partir da proporção de vegetação (Equação 6):

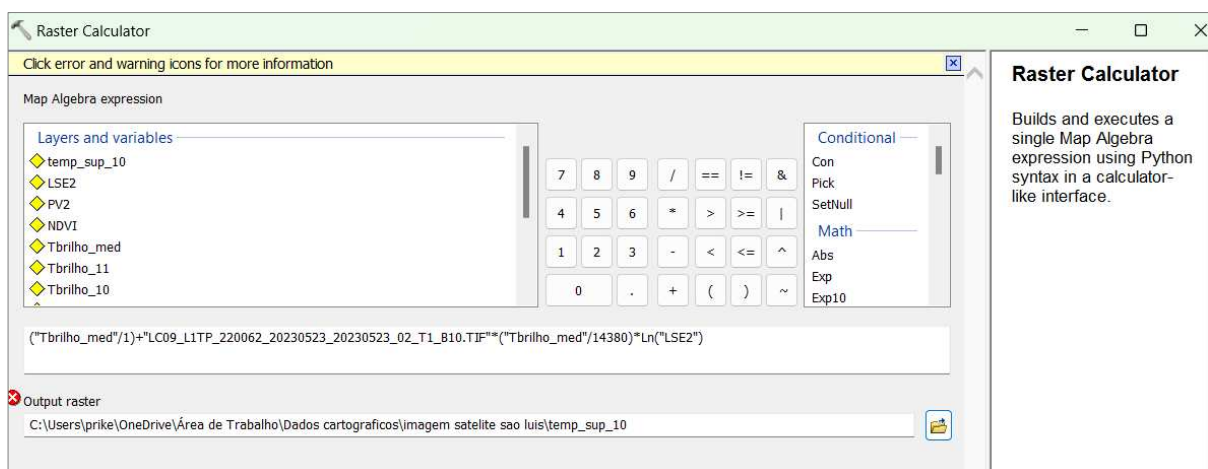
$$LSE = 0,004 \times Pv + 0,986 \quad (6)$$

Por fim, LST foi estimada com base na correção da temperatura de brilho pela emissividade da superfície, onde $T_{BrilhoProm}$ representa a temperatura média de brilho, " λ " corresponde ao comprimento de onda efetivo da banda térmica e 14380 é uma constante (Equação 7):

$$T_{superficial} = \frac{T_{BrilhoProm}}{1 + \left(\frac{\lambda \times T_{BrilhoProm}}{14380} \right) \ln(LSE)} \quad (7)$$

A Figura 5 ilustra o cálculo final realizado na interface da ferramenta *Raster Calculator*; o ambiente permitiu a inserção de expressões algébricas, a definição das camadas de entrada e a geração do *raster* de saída, evidenciando a operacionalização das equações empregadas neste estudo.

Figura 5 - Interface da ferramenta *Raster Calculator*



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A extração dos dados para a espacialização do uso e ocupação do solo foi realizada por meio de duas técnicas complementares, utilizando a base de dados do projeto MapBiomias - Coleção 10 (2024) na plataforma *Google Earth Engine* (GEE).

Já a segunda técnica foi realizada por meio de classificação supervisionada no ambiente do programa QGIS versão 3.40, por meio do *plugin* “*Dzetsaka*”. Sendo obtidas imagens do satélite Sentinel-2, nível de processamento L2A, com **resolução de 10 metros**, a partir do portal *Copernicus Data Space Browser*, referentes à data de 11 de agosto de 2024.²

² *Copernicus Data Space Browser* - <https://browser.dataspace.copernicus.eu>

Após importação ao programa QGIS, foi criada uma camada vetorial do tipo polígono, na qual foram delimitadas áreas representativas das classes de interesse. As classes definidas foram Vegetação, Área Urbanizada e Corpos d'água, totalizando 186 amostras de treinamento. Para fins de análise e visualização, o resultado *raster* da classificação foi convertido para o formato vetorial, aplicada a opção “categorizado” e renomeadas as classes e cores.

3.2.2 Aquisição e análise de dados por meio de transectos móveis

A técnica de coleta de dados foi realizada por meio da adoção de transecto móvel, com o objetivo de registrar as variáveis de temperatura do ar e umidade relativa em diferentes setores urbanos, possibilitando a comparação espacial entre os pontos de análise específicos e as demais áreas atravessadas pelo percurso. Essa estratégia permitiu contextualizar os pontos fixos de estudo em relação ao seu entorno imediato, ampliando a compreensão das variações térmicas e higrométricas no espaço urbano.

Conforme Pinheiro (2018), essa técnica se destaca por viabilizar a obtenção de informações em uma escala espacial mais ampla, contribuindo para uma análise abrangente das condições ambientais no contexto urbano.

A partir do transecto móvel, realizado ao longo de uma rota preestabelecida que contemplou todos os pontos de análise (Figura 6), efetuaram-se medições contínuas por meio de um sensor termo-higrômetro, em intervalos de até uma hora.

As coletas abrangeram dados de temperatura do ar e umidade relativa, obtidos nos dias 18 e 27 de outubro de 2024 (período seco) e 10 de abril e 17 de maio de 2025 (período chuvoso), nos horários das 15h e 20h, permitindo a análise das variações microclimáticas associadas aos efeitos da radiação de onda longa emergente.

Além disso, essa técnica foi realizada tanto em dias úteis quanto em finais de semana, propiciando a identificação de possíveis padrões anormais nas condições microclimáticas em decorrência das atividades comerciais.

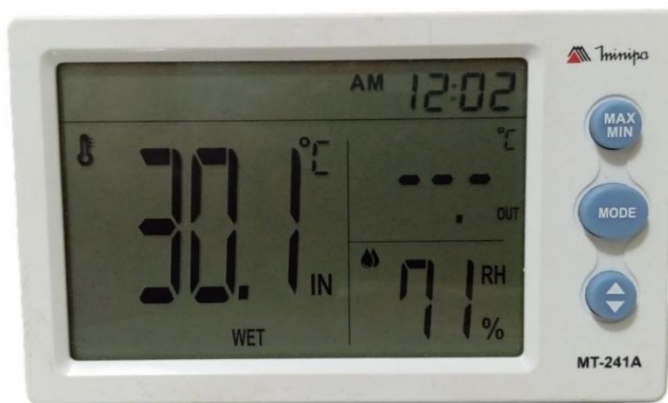
Figura 6 - Mapa de localização dos pontos comerciais de análise e rota percorrida por transecto móvel



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O termo-higrômetro utilizado foi da marca Minipa, modelo MT-241, equipado com sensores de temperatura interna e externa, acoplados a um cabo de 1,90 m, com *solar shield* (protetor solar), utilizado para minimizar a influência da radiação solar direta e garantir a confiabilidade das medições (Figuras 7 e 8).

Figura 7 - Termo-higrômetro da marca Minipa MT-241^a



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 8 registra a execução do transecto móvel, que ilustra o posicionamento do sensor conforme as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (OMM), entre 1,25 e 2,00 m acima do solo.

Figura 8 - a) Abrigo do termo-higrômetro; b) Registro das medições por transecto móvel (18/10/2024)



Foto: Brenda Graziela

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a coleta dos dados de temperatura e umidade relativa, o cálculo da interpolação dos valores por *Inverse Distance Weighting* (IDW) serviu para espacializar as amostras obtidas (Equação 8).

$$\hat{Z}_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} * Z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} \right)} \quad (8)$$

Onde:

\check{Z}_i - valor interpolado;

Z_i – valor do atributo amostrado;

d_i - distância euclidiana entre o ponto de interesse e o ponto amostrado;

p : parâmetro de potência;

n : número de pontos usados na interpolação.

O IDW significa o “Inverso da Distância Ponderada” e consiste em uma técnica determinística de interpolação espacial baseada na influência decrescente da distância, na qual os valores estimados são condicionados pelos pontos amostrais mais próximos, enquanto a contribuição dos pontos mais afastados tende a ser reduzida (Betzek, 2017).

Para a interpolação, utilizou-se novamente o software QGIS, no qual foram processados todos os mapas de temperatura e umidade relativa do ar, com base nas coordenadas de cada ponto de coleta do transecto móvel.

3.2.3 Aquisição e análise de dados fixos

Em paralelo à coleta de dados realizada por meio do transecto móvel, foram realizadas medições de temperatura e umidade do ar nos quatro pontos comerciais, por meio de monitoramento fixo, a fim de permitir análises relacionadas ao conforto térmico, as quais são aprofundadas nos subtópicos posteriores.

Para essa etapa, foram utilizados quatro termohigrômetros do tipo *datalogger*, modelo “Elitech USB” (Figura 9), que realizam medições automáticas e contínuas, possibilitando o registro sistemático das variáveis climáticas ao longo do período de observação.

Figura 9 - Termo-higrometro datalogger “Elitech-USB.”

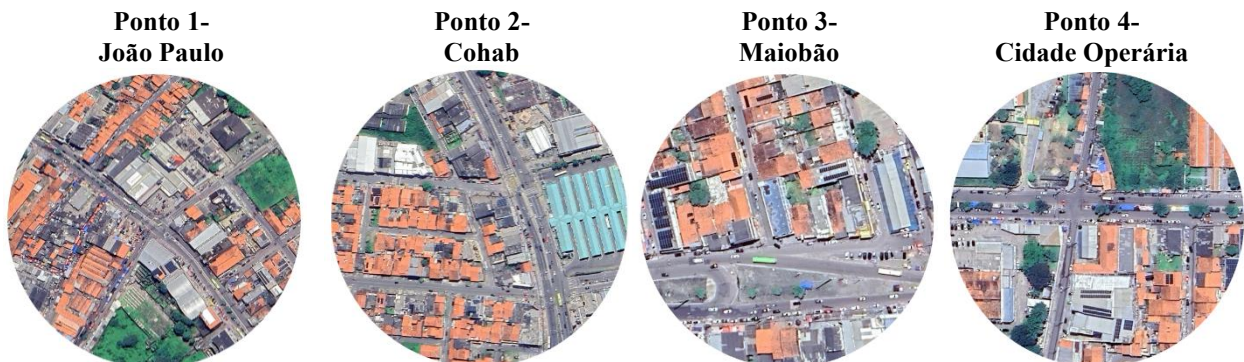


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os equipamentos foram programados para realizar coletas horárias (registrando a cada 1h), durante os meses de outubro a novembro de 2024 e de abril a maio de 2025, e posicionados em locais semiabertos, como “quintais” e varandas de residências cedidas, sem interferência de aparelhos de climatização do ar.

Visando preservar a privacidade dos moradores e evidenciar o contexto espacial de inserção dos equipamentos, na figura 10, observa-se a delimitação do perímetro onde as medições foram realizadas.

Figura 10 - Delimitação perimetral de instalação do Termo-higrometro



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em paralelo ao monitoramento realizado por pontos fixos nas áreas comerciais, foram utilizados dados meteorológicos secundários provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da estação automática (A203) e convencional (82992) de São Luís, ambas localizadas na Área de Proteção Ambiental (APA) do Itapiracó (Figura 11).

Figura 11 - a) Imagem aérea da APA Itapiracó; b) estação meteorológica (INMET-SLZ A203)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A utilização dos dados da Área de Proteção Ambiental (APA) do Itapiracó se mostrou estrategicamente relevante para fins comparativos, uma vez que as condições ambientais desse espaço, caracterizadas pela maior presença de vegetação, apresentaram valores térmicos inferiores aos observados nas áreas comerciais, mostrando-se com uma contraposição entre os registros oficiais e a realidade observada em campo.

Esse fator foi considerado na elaboração da série histórica da Ilha do Maranhão, abrangendo o período de 1994 a 2025, bem como na análise rítmica que, conforme Monteiro (1971), consiste na “representação concomitante dos elementos fundamentais do clima em unidades de tempo cronológico, pelo menos diárias” (p. 9).

A série histórica abrangeu 30 anos, utilizou-se prioritariamente a estação automática, recorrendo-se à estação convencional para o preenchimento de falhas nos registros. A combinação dos dados provenientes das duas estações teve como objetivo assegurar maior consistência e continuidade às séries históricas analisadas.

Já as análises rítmicas foram realizadas para os meses de outubro a novembro de 2024 (período seco) e abril a maio de 2025 (período chuvoso). Por meio das variáveis: temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, pressão atmosférica, nebulosidade, radiação solar, velocidade e direção do vento, possibilitando a análise sazonal detalhada.

As falhas nos registros, nas variáveis nebulosidade e direção do vento durante o período chuvoso, resultaram na ausência de dados representados no gráfico. Ademais, a

inexistência do dado de insolação inviabilizou sua análise neste mesmo período.

Já a análise da direção do vento foi considerada no horário das 12h, por apresentar maior consistência nos registros e corresponder ao mesmo horário das cartas sinóticas descritas a seguir (Figura 12).

Figura 12 - Planilha adquirida pelo INMET estação convencional (82992)

Nome: SAO LUIS		
Codigo Estacao: 82280		
Latitude: -2.52666666		
Longitude: -44.21361111		
Altitude: 32.58		
Situacao: Fechada		
Data Inicial: 2024-10-01		
Data Final: 2025-05-31		
Periodicidade da Medicao: Horaria		
Data Medicao	Hora Medicao	VENTO, DIRECAO HORARIA(codigo)
01/10/2024	0	36
01/10/2024	1200	36
01/10/2024	1800	null
02/10/2024	0	36
02/10/2024	1200	5
02/10/2024	1800	null
03/10/2024	0	36
03/10/2024	1200	32
03/10/2024	1800	null

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação à codificação, o INMET estabelece que a direção do vento pode ser registrada por meio de uma escala numérica de 00 a 36, na qual cada valor corresponde a um setor angular da rosa dos ventos, sendo que o código 36 indica o Norte (360°), o 09 indica o Leste (90°) e o 18 indica o Sul (180°), entre outros.

Para fins de análise climatológica, esses códigos numéricos são agrupados nas 16 direções da rosa dos ventos, conforme exigido pelo INMET, como apresentado na Tabela 3:

Tabela 3 - Codificação da direção do vento (INMET)

Direção	Abreviatura	Direção em graus (°)
Norte	N	360,0
Norte-nordeste	NNE	22,5
Nordeste	NE	45,0
Este-nordeste	ENE	67,5
Este	E	90,0
Este-sudeste	ESE	112,5
Sudeste	SE	135,0
Sul-sudeste	SSE	157,5
Sul	S	180,0
Sul-sudoeste	SSW	202,5
Sudoeste	SW	225,0
Oeste-sudoeste	WSW	247,5
Oeste	W	270,0
Oeste-noroeste	WNW	292,5
Noroeste	NW	315,0
Norte-noroeste	NNW	337,5

Fonte: Adaptado de INMET (s.d.).

Conforme o INMET, quando não é possível identificar uma direção predominante do vento, utiliza-se o código 99, que indica mudanças frequentes de direção.

Cabe ressaltar que, neste estudo, quando o movimento do ar estava ausente, o código “0” foi substituído pela letra “C”, para fins de classificação dos dados.

Além disso, para a realização das análises rítmicas, considerou-se a atuação dos sistemas atmosféricos responsáveis pelas condições observadas no período de estudo. A identificação desses sistemas foi realizada a partir da análise de cartas sinóticas disponibilizadas pela Marinha do Brasil correspondentes ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO).

A elaboração das análises rítmicas foi desenvolvida no ambiente *RStudio*, tomando-se como referência o layout do *software* “RitmoAnálise”, utilizado exclusivamente para fins de composição e organização gráfica.

Ainda nesse mesmo ambiente, realizaram-se análises estatísticas a fim de quantificar a variabilidade e identificar os padrões observados. Foram aplicadas estatísticas descritivas e elaboradas representações gráficas com o auxílio do pacote *ggplot2*, incluindo diagramas de dispersão, gráficos temporais e *boxplots*, os quais possibilitaram a avaliação da distribuição e da dispersão das variáveis analisadas.

A relação entre as variáveis foi investigada por meio do coeficiente de correlação de Pearson, utilizado para analisar a associação linear dos dados (Equação 9).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Onde:

r = coeficiente de correlação de Pearson

x_i, y_i = valores observados das variáveis X e Y

\bar{x}, \bar{y} = médias das variáveis X e Y

n = número de observações

A associação entre variáveis quantitativas permite avaliar a existência e a intensidade de relações lineares entre pares de variáveis. Conforme Paranhos *et al.* (2014), os valores desse coeficiente situam-se entre -1 e 1 , sendo que o sinal indica o tipo de relação estabelecida direta ou inversa, enquanto valores próximos aos extremos indicam associação linear elevada, na medida em que valores próximos de zero sugerem ausência de dependência linear entre as variáveis analisadas.

3.2.4 Índices de conforto térmico e percepção térmica da população

Para a avaliação das condições de conforto térmico humano nas áreas de estudo, foram aplicados os índices *Heat Index* (HI) e Temperatura Efetiva (TE), amplamente utilizados em estudos de climatologia urbana por integrarem variáveis meteorológicas diretamente associadas à sensação térmica percebida pelo ser humano.

O *Heat Index* foi empregado com o objetivo de estimar a sensação térmica resultante da combinação entre a temperatura do ar e a umidade relativa, permitindo a identificação de níveis de desconforto térmico e potenciais riscos à saúde em ambientes urbanos (Equação 10):

$$HI = -8,784695 + 1,61139411 \cdot T + 2,338549 \cdot RH - 0,14611605 \cdot T \cdot RH - 0,012308094 \cdot T^2 - 0,016424828 \cdot RH^2 + 0,0002211732 \cdot T^2 \cdot RH + 0,00072546 \cdot T \cdot RH^2 - 0,000003582 \cdot T^2 \cdot RH^2 \quad (10)$$

Onde:

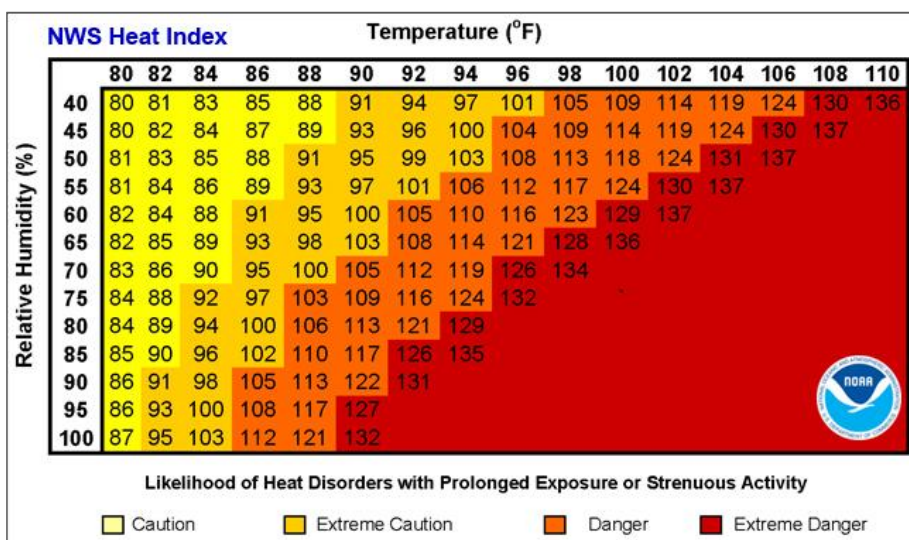
HI: é o índice de calor;

T: a temperatura do ar dada em °C ou °F;

RH: Umidade relativa do ar (%).

De acordo com a NOAA o HI expressa a sensação térmica resultante da interação entre a temperatura do ar e a umidade relativa, considerando os processos fisiológicos de termorregulação, em especial a evaporação do suor. Assim, em ambientes com elevada umidade, esse mecanismo torna-se menos eficiente, o que potencializa a sensação de calor (Figura 13).

Figura 13 - Relação entre Temperatura do ar e da Umidade Relativa e o Índice de Calor (Heat Index)



Fonte: NOAA, 2025.

Destaca-se que a tabela original do HI, desenvolvida pelo *National Weather Service* (NWS), apresenta seus valores em graus *Fahrenheit* (°F). Portanto, a tabela 4 apresenta as classificações convertidas para graus *Celsius* (°C).

Tabela 4 - Classificação do Índice de Calor (Heat Index) e seus efeitos no corpo humano

Classificação	Heat Index (°C)	Efeitos no corpo
Cautela	26,6 – 32,2 °C	Possível fadiga em exposições prolongadas e/ou durante atividade física
Cautela Extrema	32,2 – 39,4 °C	Possibilidade de câibras, exaustão pelo calor e insolação em exposições prolongadas e/ou com esforço físico
Perigo	39,4 – 51,1 °C	Câibras e exaustão pelo calor prováveis; insolação possível em exposições prolongadas
Perigo Extremo	≥ 51,6 °C	Insolação altamente provável

Fonte: Adaptado, NOAA, 2025.

Em paralelo ao HI foi aplicado o Índice de Temperatura Efetiva (TE), inicialmente formulado por Thom e Bosen (1959), que sintetiza, em um único valor, a sensação térmica percebida pelo corpo humano a partir da interação entre a temperatura e a umidade do ar, demonstrando que o organismo humano não responde apenas à temperatura isolada, mas ao conjunto de condições termo-higrométricas que controlam os processos de troca de calor.

Desse modo, o TE combina a temperatura de bulbo seco, representativa do ar ambiente, com a temperatura de bulbo úmido, que expressa a influência da umidade sobre a evaporação do suor. Essa integração torna o índice particularmente eficaz para captar respostas fisiológicas associadas ao conforto ou ao desconforto térmico.

O cálculo da TE baseia-se nos valores da temperatura do bulbo seco e da temperatura do bulbo úmido, sendo expresso pela seguinte equação 11:

$$TE = 0,4 (TD + TW) + 4,8 \quad (11)$$

Onde:

TD e TW são expressos em graus Celsius (°C);

TE corresponde à Temperatura Efetiva;

TD representa a temperatura do bulbo seco (°C);

TW refere-se à Temperatura do Bulbo Úmido (°C).

A Temperatura Efetiva (TE) foi calculada a partir de uma planilha desenvolvida no *Microsoft Excel* proposta por Tommaselli (2007) (Figura 14).

Figura 14 - Classificação do Índice de Calor (Heat Index) e seus efeitos no corpo humano

© Tommaselli, JTG (2007)
Estimativa da temperatura do bulbo-úmido (T_u) a partir das medidas da temperatura do bulbo seco (T) e da umidade relativa (UR)
 Valores da temperatura em °C e valores de umidade relativa em %





Local: **São Luís MA**
 Latitude: (-) 2 S
 Altitude: 4 m
 Pressão Atmosférica Média: 1012,5 hPa

T(°C)	UR (%)	e_s (kPa)	e (kPa)	Δ (kPa/°C)	T_u (°C)	erro	
						abs	(%)
27,13	89,55	3,59	3,22	0,211	26,7	0	0,0
26,92	90,27	3,55	3,20	0,208	26,5	0	0,0
26,8	90,62	3,52	3,19	0,207	26,4	0	0,0
26,63	91,17	3,49	3,18	0,205	26,3	0	0,0
26,53	91,75	3,47	3,18	0,204	26,2	0	0,0
26,42	92,16	3,45	3,18	0,203	26,1	0	0,0
26,36	92,27	3,43	3,17	0,202	26,1	0	0,0

Fonte: Tommaselli, 2007.

Embora a equação original do TE tenha sido proposta por Thom e Bosen (1959), diferentes estudos têm adaptado as faixas de interpretação do índice, especialmente em contextos tropicais. Considerando que a área de pesquisa se insere em um ambiente climático quente e úmido, optou-se por adotar as categorias utilizadas por Araújo (2014), para a cidade de São Luís, uma adaptação metodológica de Santos e Andrade (2008) (Figura 15).

Figura 15 - Classes de conforto térmico Araújo (2014) adaptação de Santos e Andrade (2008)

Cor	Descrição	Faixa de TE (°C)
	50% da população possui um crescente desconforto	$24 \leq TE < 27$
	A maioria possui um relativo desconforto comum e significativo deterioramento da condição psicofísica	$27 \leq TE < 29$
	Todos possuem um forte desconforto	$29 \leq TE < 32$
	Estado de emergência médica, um desconforto muito forte	$TE \geq 32$

Fonte: Adaptado de Araújo, 2014.

Além dos índices de análise, foi aplicado um questionário de autoria própria, com questões que auxiliaram na interpretação da percepção do conforto térmico das pessoas transeuntes nas áreas estudadas.

O instrumento foi composto por 10 questões objetivas, abrangendo o perfil do entrevistado, a percepção térmica, o desconforto térmico e a intensidade das atividades realizadas no momento da abordagem, considerando indivíduos transeuntes em áreas externas.

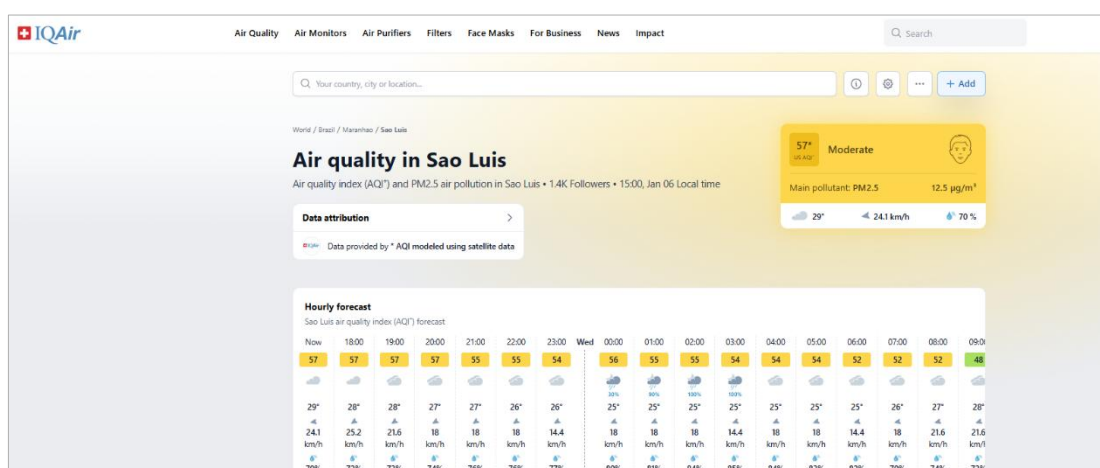
Participaram da pesquisa 200 indivíduos, com a aplicação de 50 questionários por área de estudo. Ressalta-se que o estudo foi submetido e **aprovado** pelo Comitê de Ética em

Pesquisa, conforme parecer consubstanciado no CAAE nº 91960525.1.0000.5554, cujo registro pode ser consultado na Plataforma Brasil, assegurando a observância dos preceitos éticos aplicáveis às pesquisas envolvendo seres humanos.

3.2.5 Aferição de poluentes

A compreensão dos poluentes atmosféricos na área de estudo foi realizada por meio de duas estratégias de aferição. O primeiro consistiu na formação do banco de dados a partir de informações secundárias de materiais particulados finos (PM_{2.5}), disponibilizadas pela Plataforma de monitoramento IQAir³, para a Ilha do Maranhão, no período de setembro de 2024 a maio de 2025 (Figura 16).

Figura 16 - Plataforma de monitoramento Qlair



Fonte: IQAir, 2025.

Esta plataforma fornece estimativas de concentração de PM_{2.5} a partir da integração de dados de sensoriamento remoto, modelagem atmosférica e variáveis meteorológicas. Ressalta-se que tais dados possuem caráter estimativo, porém são metodologicamente válidos e amplamente utilizados em regiões sem monitoramento contínuo por estações fixas, tendo sido adotados neste estudo em função da indisponibilidade de dados oficiais da Secretaria de Estado de Indústria e Comércio (SEINC), bem como da ausência de retorno das instituições responsáveis.

A segunda técnica de aferição consistiu na medição direta dos poluentes nas quatro áreas comerciais estudadas, por meio de um equipamento portátil de monitoramento da qualidade do ar “Air Quality Monitor” (Figura 17).

³ O IQAir é uma plataforma global de monitoramento da qualidade do ar que disponibiliza dados estimativos de poluição atmosférica, especialmente de material particulado fino (PM_{2.5}), a partir da integração de estações de monitoramento, sensores e modelagem atmosférica. Informações disponíveis em: <https://www.iqair.com>

Figura 17 - Equipamento Air Quality Monitor



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As aferições foram realizadas por meio de amostragem pontual, com o objetivo de comparar os valores medidos com os dados estimados. As medições ocorreram nos quatro pontos comerciais selecionados, no intervalo das 12h às 13h do dia 10 de abril de 2025. Assim, foram obtidos dados instantâneos de concentração de poluentes, incluindo materiais particulados finos (PM_{2.5}), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), compostos orgânicos voláteis totais (TVOC) e formaldeído (HCHO), além de parâmetros ambientais como temperatura e umidade relativa do ar.

3.2.6 Análise de interações por doenças respiratórias (DATASUS)

Os dados referentes às interações por doenças respiratórias foram obtidos a partir do Sistema de Informações Hospitalares do SUS (SIH/SUS), disponibilizado pelo DATASUS. Foram selecionados os registros correspondentes aos agravos do aparelho respiratório, conforme a Classificação Internacional de Doenças CID-10 (J00 a J99), considerando-se o período de setembro de 2024 a maio de 2025, de modo a manter coerência temporal com o recorte adotado para a aferição dos poluentes atmosféricos.

A extração dos dados foi realizada por meio do *software TabWin*, ferramenta oficial do DATASUS, que permitiu a conversão dos arquivos para o formato tabular. Posteriormente, esses dados foram organizados e processados no *RStudio*, sendo elaborados gráficos descritivos e de ranqueamento das doenças respiratórias mais frequentes no período analisado.

Em etapa subsequente, os dados foram integrados a procedimentos de geoprocessamento, possibilitando a espacialização das interações nos municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar, que permitiu a representação espacial dos casos.

Para associação do material particulado fino (PM_{2,5}) às interações por doenças respiratórias, foi empregado o modelo não linear de defasagens distribuídas (DLNM -

Distributed Lag Nonlinear Model), que permite a análise conjunta de relações não lineares e efeitos defasados no tempo entre exposição e resposta (Ikefuti, 2014).

Segundo Gasparini (2011), os DLNM constituem um arcabouço de modelagem estatística desenvolvido para investigar simultaneamente efeitos não lineares e efeitos retardados no tempo de uma variável de exposição sobre um desfecho em dados de séries temporais, caracterizando a chamada associação exposição-atraso-resposta. Essa abordagem identifica tanto efeitos imediatos quanto tardios das exposições ambientais sobre a saúde, fornecendo uma interpretação mais completa da dinâmica temporal dessas associações.

O efeito conjunto da exposição “ x_t ” observada no tempo “ t ” e de seus valores defasados até um atraso máximo “ L ” pode ser representado pela equação 12 (Rutten *et al.*, 2025).

$$s(x_{t,j}, \dots, x_{t-L,j}; \theta_{ik}) = \sum_{i=1}^{v_x} \sum_{k=1}^{v_l} \left(\sum_{l=0}^L \tilde{b}_i(x_{t-l,j}) \tilde{b}_k(l) \right) \theta_{ik}, \quad (12)$$

Onde:

$x_{t-l,j}$ é o valor da exposição no local j e no tempo $t-l$;

L é a defasagem máxima considerada no modelo;

$b_i(\cdot)$ são as funções base B-spline aplicadas à variável de exposição;

$\tilde{b}_k(l)$ são as funções base B-spline aplicadas à dimensão de defasagem (lag);

v_x é o número de funções base utilizadas para a exposição;

v_l é o número de funções base utilizadas para o lag;

θ_{ik} são os parâmetros que ponderam a combinação entre as bases da exposição e do lag, controlando a magnitude e a forma do efeito conjunto exposição–lag.

Após a aplicação do DLNM, que permitiu avaliar os efeitos não lineares e defasados do $PM_{2,5}$ sobre as internações por doenças respiratórias, optou-se por um modelo de regressão linear múltipla com seleção *stepwise*. Essa abordagem teve como objetivo identificar, entre as variáveis disponíveis, aquelas com maior capacidade explicativa sobre a variação do número de casos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O recorte espacial analisado nesta seção abrange os municípios de São Luís, São José de Ribamar e Paço do Lumiar, que compõem uma continuidade urbana funcional na Ilha do Maranhão. Nesse contexto, as áreas comerciais dos bairros João Paulo, Cohab, Maiobão e Cidade Operária evidenciaram como a intensa circulação de pessoas e a dinâmica urbana influenciam os padrões microclimáticos, os níveis de conforto térmico e a qualidade do ar. As análises mostram que a configuração urbana, os materiais construtivos e o fluxo comercial condicionam o comportamento ambiental desses espaços, com repercussões diretas sobre a saúde da população.

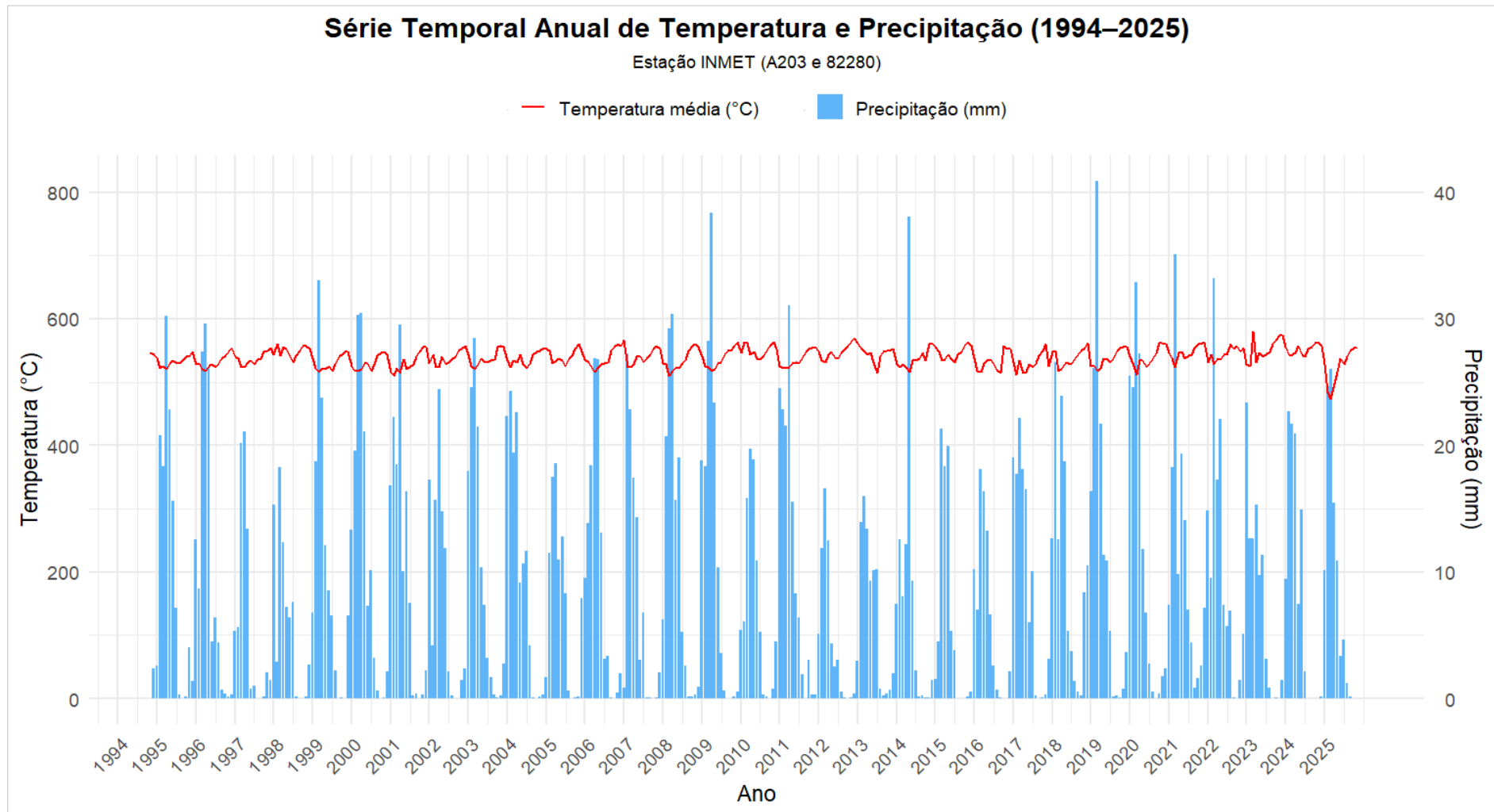
4.1 Caracterização climática da Ilha do Maranhão

A Ilha do Maranhão, situada em uma faixa de clima tropical úmido, é marcada por temperaturas elevadas durante todo o ano e por um regime de chuvas nitidamente sazonal. Conforme discute Pinheiro (2022), a incidência quase perpendicular da radiação solar de modo constante reduz a variação térmica e limita a presença de estações bem definidas, resultando, essencialmente, em duas fases climáticas em relação à precipitação: um período chuvoso e outro de estiagem.

A precipitação concentra-se, sobretudo, nos seis primeiros meses do ano, período em que a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), faixa de instabilidade gerada pelo encontro dos ventos alísios, exerce maior influência sobre a região (Pinheiro, 2018). Esse comportamento climático regional é evidenciado nos Gráficos 1 e 2, que apresentam a série histórica de precipitação e temperatura de 1994 a 2025, com destaque à sazonalidade das chuvas e à baixa variabilidade térmica na Ilha do Maranhão.

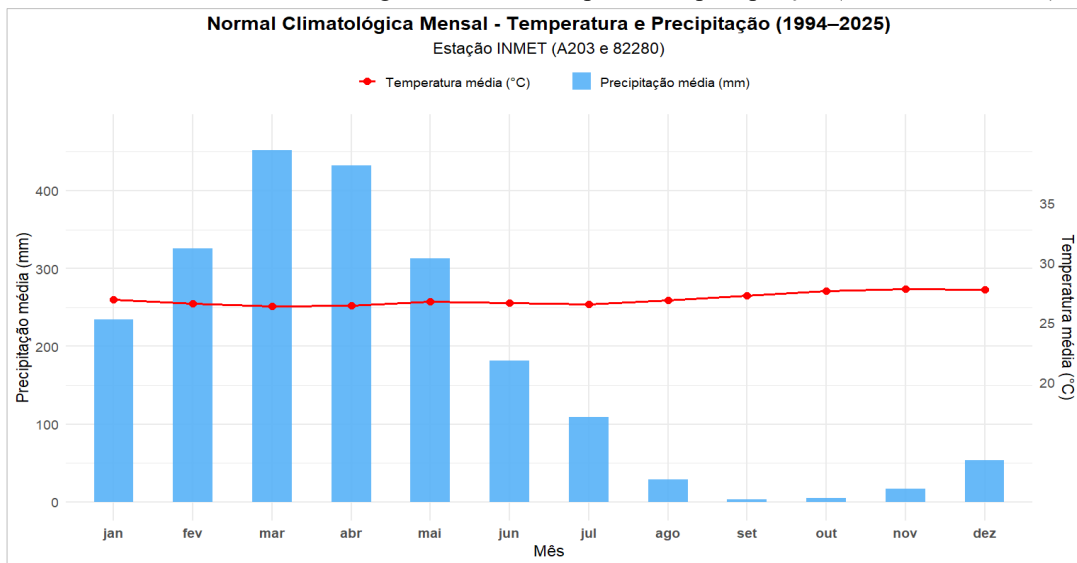
Cabe ressaltar que os dados utilizados para caracterizar o clima geral da Ilha do Maranhão provêm da estação automática do INMET (SLZ-A203/82280), que integra a rede oficial de monitoramento meteorológico da região. Contudo, em virtude de sua localização em área com predominância de vegetação (conforme detalhado na seção metodológica), essa estação registra temperaturas mais amenas do que aquelas observadas nas áreas comerciais analisadas nas seções seguintes.

Gráfico 1 – Série climatológica da precipitação e temperatura do ar de 1994 a 2025 (INMET)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 2 - Normal climatológica mensal de temperatura e precipitação (INMET 1994-2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

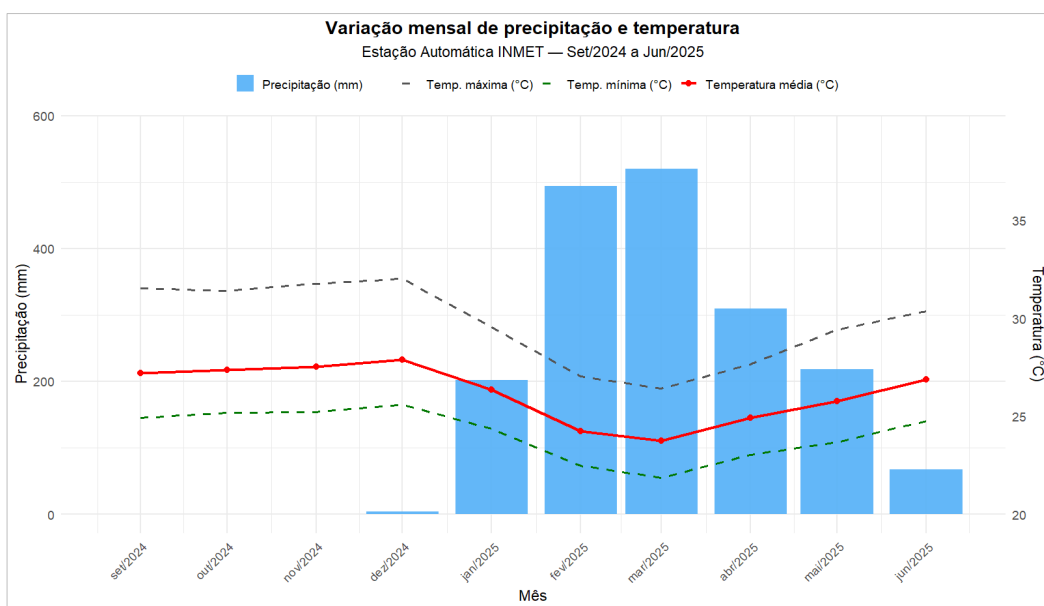
4.1.1 Variabilidade climática durante a pesquisa

Além da caracterização da climatologia histórica, torna-se necessário observar como as variáveis climáticas se manifestaram no período correspondente ao desenvolvimento da pesquisa (Gráfico 3).

O intervalo de setembro a dezembro de 2024 constituiu o período seco estudado. Nesse recorte, a região apresentou temperaturas médias próximas de 29 °C, com máximas excedendo 32 °C e mínimas em torno de 26 °C. A precipitação, por sua vez, manteve-se nula, o que confirma a intensidade da estação seca (Gráfico 3).

No período chuvoso, de janeiro a junho de 2025, observa-se a queda gradual das temperaturas máximas para o patamar de 28 °C e da média para 26 °C. Esse movimento acompanha o avanço das precipitações, cujo volume aumentou de forma expressiva, atingindo seus picos nos meses de fevereiro e março e diminuindo em maio e junho, com média semestral de 298 mm (Gráfico 3).

Gráfico 3 - Variação da temperatura e precipitação (set. 2024 a mai.2025) (INMET)

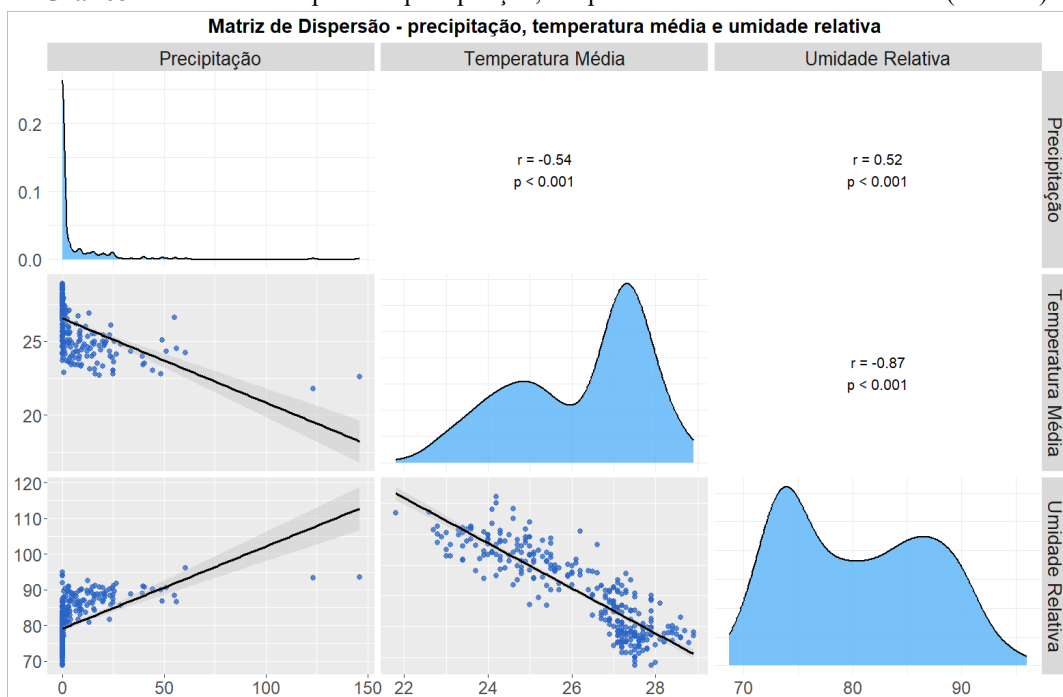


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa dinâmica sazonal também surge nas relações estatísticas entre as variáveis climáticas. A matriz de dispersão mostra que a precipitação tem correlação negativa moderada com a temperatura média ($r = -0,54$), o que indica que, à medida que aumenta o volume de chuvas, as temperaturas tendem a diminuir (Gráfico 4).

A interação mais expressiva ocorre entre a temperatura média e a umidade relativa ($r = -0,87$), revelando que, quanto maior a temperatura do ar na ilha, menor estará sua umidade relativa do ar (Gráfico 4).

Gráfico 4 - Matriz de dispersão - precipitação, temperatura e umidade relativa do ar (INMET)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.1.2 Análise rítmica das condições atmosféricas nos períodos seco e chuvoso

Embora a apresentação das médias mensais e das séries históricas da Ilha do Maranhão permita reconhecer tendências sazonais amplas, essa abordagem é limitada para explicar a complexidade dos estados atmosféricos que atuam sobre as áreas comerciais. Como adverte Monteiro (1971, p. 10), “os estados do tempo [...] não podem ser entendidos apenas por totais anuais ou mensais”.

Assim, após a exposição das médias, torna-se necessário avançar para uma leitura que considere a sucessão dos tipos de tempo, uma vez que “o ritmo climático só poderá ser compreendido através da representação concomitante dos elementos fundamentais do clima em unidades de tempo cronológico pelo menos diárias” (Monteiro, 1971, p. 9). É essa mudança de escala que permite aproximar a análise da realidade atmosférica vivenciada nas áreas urbanas, ampliando o potencial interpretativo das variações térmicas e higrométricas observadas durante o levantamento de dados primários, tanto nos transectos móveis quanto nos pontos fixos.

Apesar do recorte geral do estudo compreender o período de setembro de 2024 a julho de 2025, abrangendo a variabilidade climática, as concentrações de particulados atmosféricos e suas relações com as interações, a análise rítmica foi aplicada de forma direcionada apenas aos meses em que ocorreram as medições em campo. A escolha desses períodos específicos justifica-se por serem os meses em que as condições atmosféricas incidiram diretamente sobre as coletas realizadas nas áreas comerciais. Tal cenário exige, portanto, um detalhamento dos episódios e das sucessões de tipos de tempo para compreender, de modo adequado, as influências da dinâmica climática sobre o conforto térmico local.

Para tanto, são apresentadas as análises rítmicas referentes aos meses de outubro e novembro de 2024, que caracterizam o período seco (Gráficos 5 e 6), e abril e maio de 2025, para demonstrar o período chuvoso (Gráficos 7 e 8).

A análise climática de outubro de 2024 reflete as características típicas do período seco. As temperaturas mostram grande regularidade durante todo o intervalo: as máximas se mantêm próximas de 31 °C, enquanto as mínimas oscilam em torno de 27 °C. Essa configuração resulta em uma amplitude térmica relativamente baixa e expõe a diferença entre a energia térmica diurna e o resfriamento noturno (Gráfico 5).

A insolação diária varia entre 6 e 9 horas de exposição solar, com predominância de céu parcialmente nublado durante o mês. Mesmo nos dias com maior cobertura de nuvens, a

redução do brilho solar não é acentuada, o que reforça a ausência de sistemas convectivos significativos ou de eventos de instabilidade prolongada (Gráfico 5).

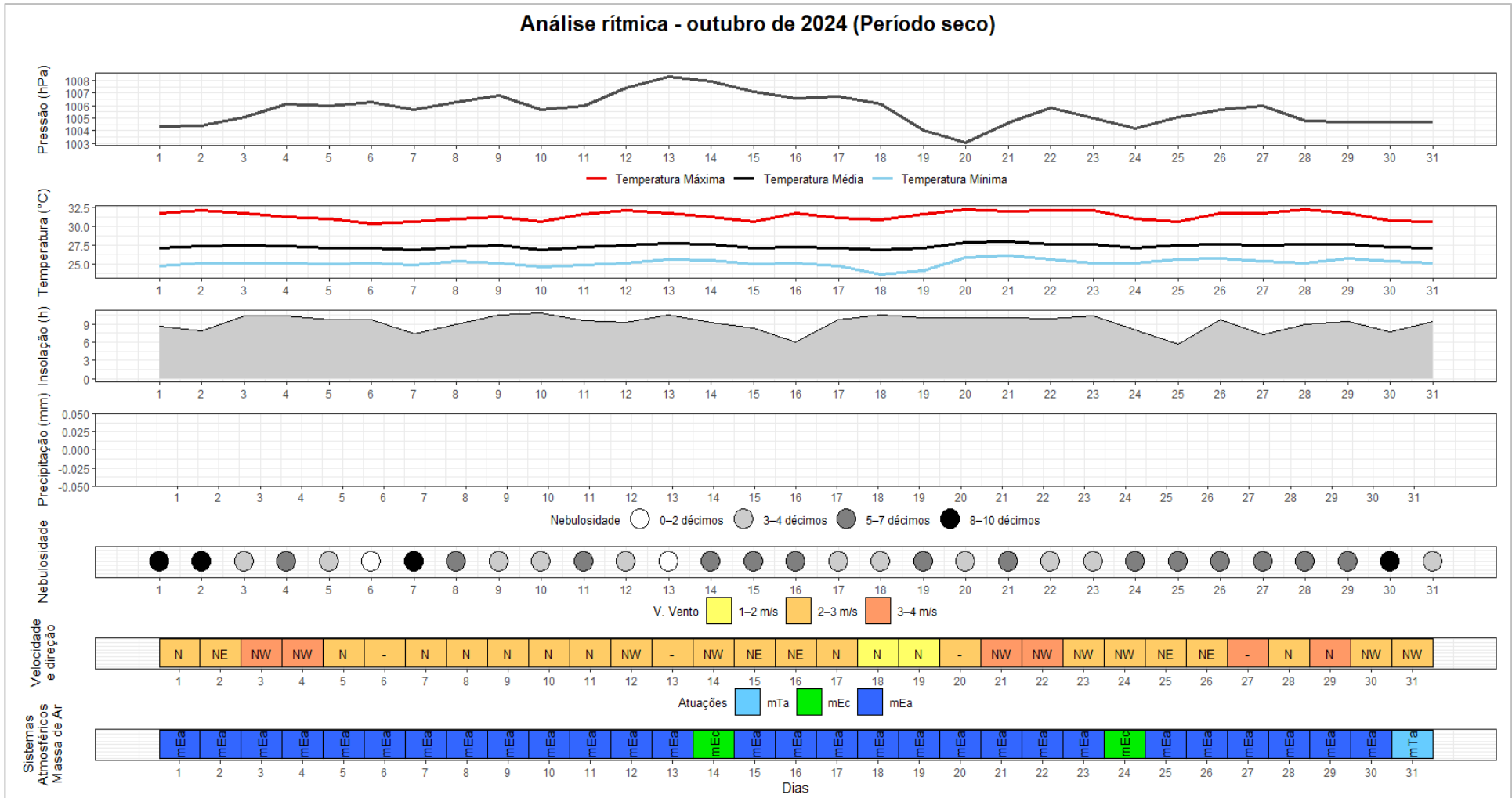
Quanto à nebulosidade, observa-se o predomínio de cobertura parcial, com variações entre 3 e 7 décimos na maior parte do mês. Apenas em três dias os índices atingem patamares mais elevados (entre 8 e 10 décimos), ainda assim sem registro de precipitação. Tal comportamento indica que, embora haja vapor d'água e formação de nuvens, não ocorre desenvolvimento convectivo suficiente para gerar chuvas, o que mantém a atmosfera isenta de instabilidades marcantes (Gráfico 5).

O Gráfico 5 também confirma a ausência total de precipitação ao longo de outubro de 2024. Essa inexistência de chuva é compatível com o esperado para a região, que define este mês como o ápice da estação seca.

Os ventos predominantes na área de estudo apresentam direções de Norte para Sul (N), de Nordeste para Sudoeste (NE) e de Noroeste para Sudeste (NW), com velocidades predominantes entre 1 e 3 m/s; as maiores intensidades são observadas nos dias de ventos provenientes de NW. Cabe destacar que, conforme descrito na metodologia, algumas variáveis não foram registradas, o que se reflete na ilustração apresentada (Gráfico 5), sendo essas lacunas tratadas para minimizar possíveis erros de interpretação.

A pressão atmosférica variou entre 1003 e 1008 hPa ao longo do mês, apresentando pequena variação e não caracterizando a atuação de sistemas de baixa pressão bem definidos (Gráfico 5).

Gráfico 5 - Análise rítmica, outubro 2024 (Período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

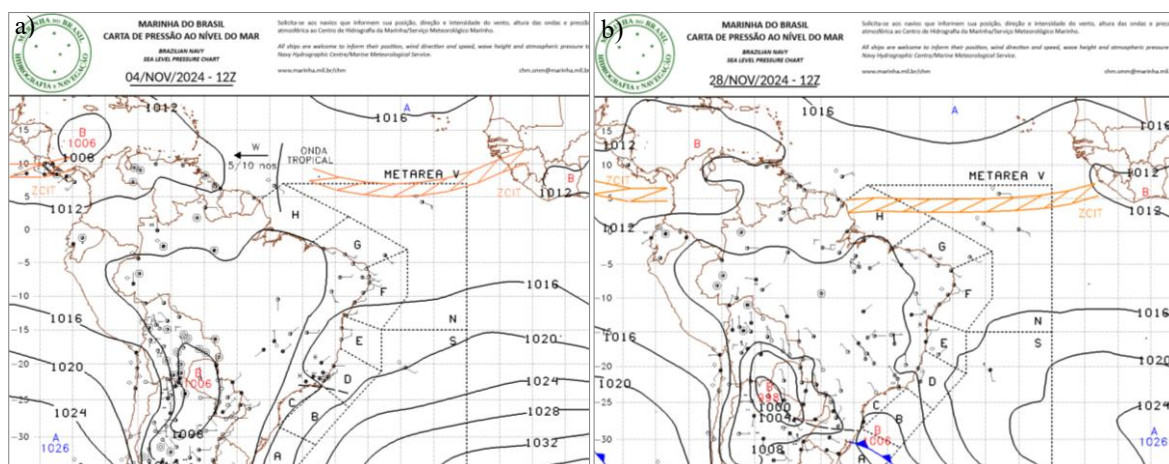
A análise climática para o mês de novembro de 2024, ainda no período seco, mostra que a temperatura se manteve regular, com máximas de 33 °C e mínimas próximas de 25 °C, o que configura um ambiente termicamente estável e quente (Gráfico 6).

A insolação apresenta variações ao longo do mês, com dias que ultrapassam 9 a 10 horas de sol e outros com valores reduzidos. Essa alternância está associada à nebulosidade variável, que oscilou entre 3-7 décimos e valores elevados de 8-10 décimos de cobertura (Gráfico 6).

Ao longo do mês, quatro dias apresentaram nebulosidade elevada (8-10 décimos), especificamente nos dias 7, 12, 19 e 26, o que contribuiu para a redução da insolação nesses períodos. Contudo, apesar da maior cobertura de nuvens nesses episódios, não houve registro de precipitação. Quanto aos demais parâmetros, a pressão atmosférica variou entre aproximadamente 1003 hPa e 1007 hPa durante todo o mês, enquanto os ventos predominaram nos quadrantes N, NE e NW, com intensidades entre 2 e 3 m/s (Gráfico 6).

A atuação da Massa Equatorial Continental (mEc) e de Equatorial Atlântica (mEa) aparece associada ao comportamento de baixa pressão e atmosfera quente e úmida. Embora a MEC não provoque estabilidade, sua manifestação em novembro ocorre em um contexto de fraca convecção regional, o que resulta em um período seco mesmo sob condições de baixa pressão, como pode ser constatado nas cartas sinóticas a seguir (Figura 18).

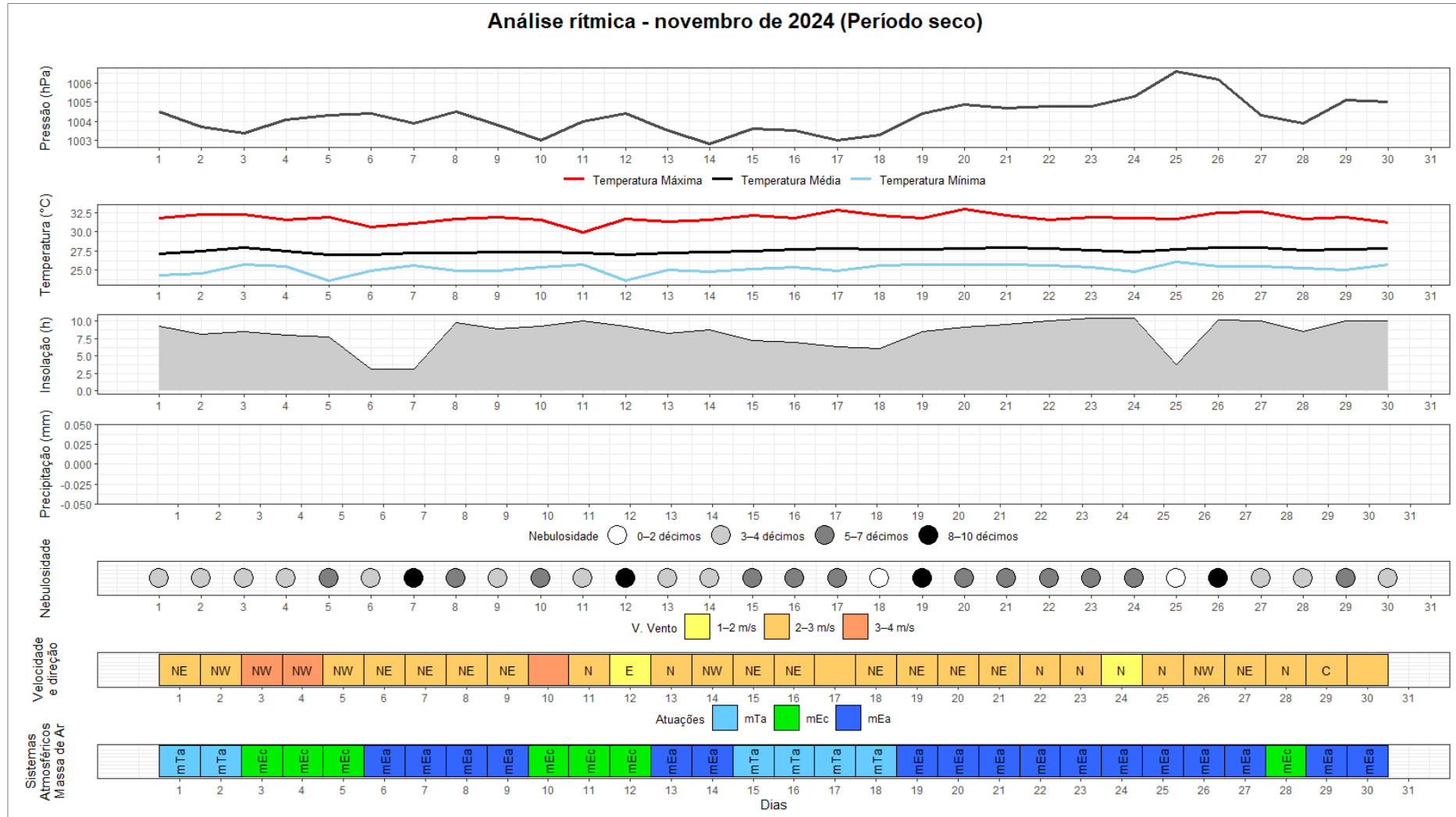
Figura 18 - Situação Sinótica recorte para o Brasil: a) 04/11/2024; b) 28/10/2024



Fonte: Marinha do Brasil – Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Em síntese, a análise rítmica de outubro e novembro de 2024 revela um cenário de baixa pressão, com temperaturas elevadas e estáveis e ventos moderados. Além disso, apesar da nebulosidade em dias específicos, há a ausência total de precipitação. Os meses expressam, portanto, a dinâmica típica do período seco.

Gráfico 6 - Análise rítmica, novembro 2024 (Período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

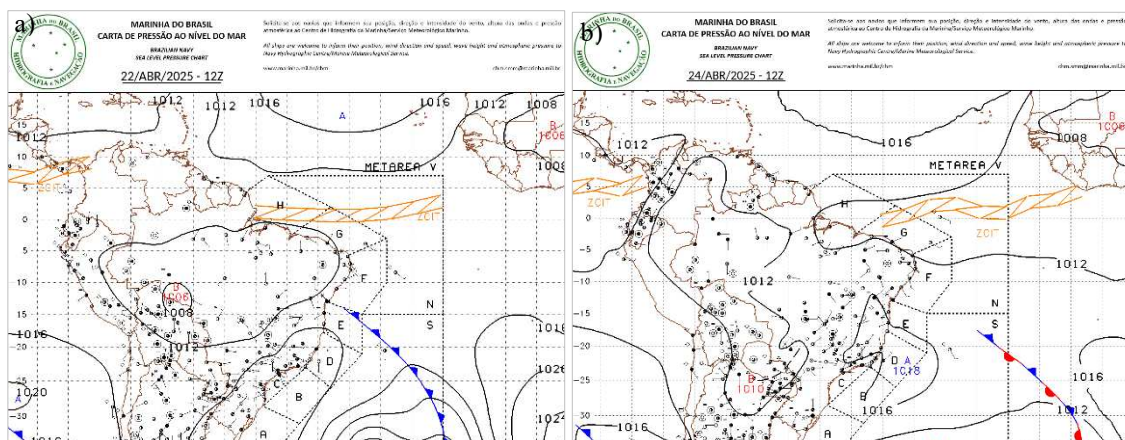
O mês de abril de 2025, período chuvoso da etapa de pesquisa, caracteriza-se pela atuação predominante da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que imprime ao mês um regime atmosférico úmido e instável. As temperaturas mostram suavização das amplitudes térmicas diárias, com máximas de 29,5 °C e mínimas de 22,5 °C. Essa menor amplitude deriva principalmente da forte cobertura de nuvens e da elevada umidade atmosférica, que reduzem o aquecimento diurno e dificultam o resfriamento noturno (Gráfico 7).

É importante destacar que os círculos brancos presentes na representação da nebulosidade não indicam céu claro, mas sim ausência de dados observacionais na estação utilizada; da mesma forma, não havia registros de insolação nesses dias, o que impossibilita a complementação dessas informações. Contudo, fica nítido que, nos dias registrados, a nebulosidade possui valores elevados (de 8 a 10 décimos), apresentando um grande contraste em relação ao período seco (Gráfico 7).

A precipitação apresenta distribuição relativamente contínua ao longo do mês, ainda que com picos concentrados nos dias 2, 11-13, 17-18 e 22-23. Desse modo, não há intervalos secos prolongados, o que confirma a manutenção desse ritmo atmosférico (Gráfico 7). Além disso, os ventos apresentam fraca intensidade ao longo de abril, em comparação ao período seco, e predomínio de direções N, NE e C (calmo), com velocidades entre 0 e 2 m/s (Gráfico 7).

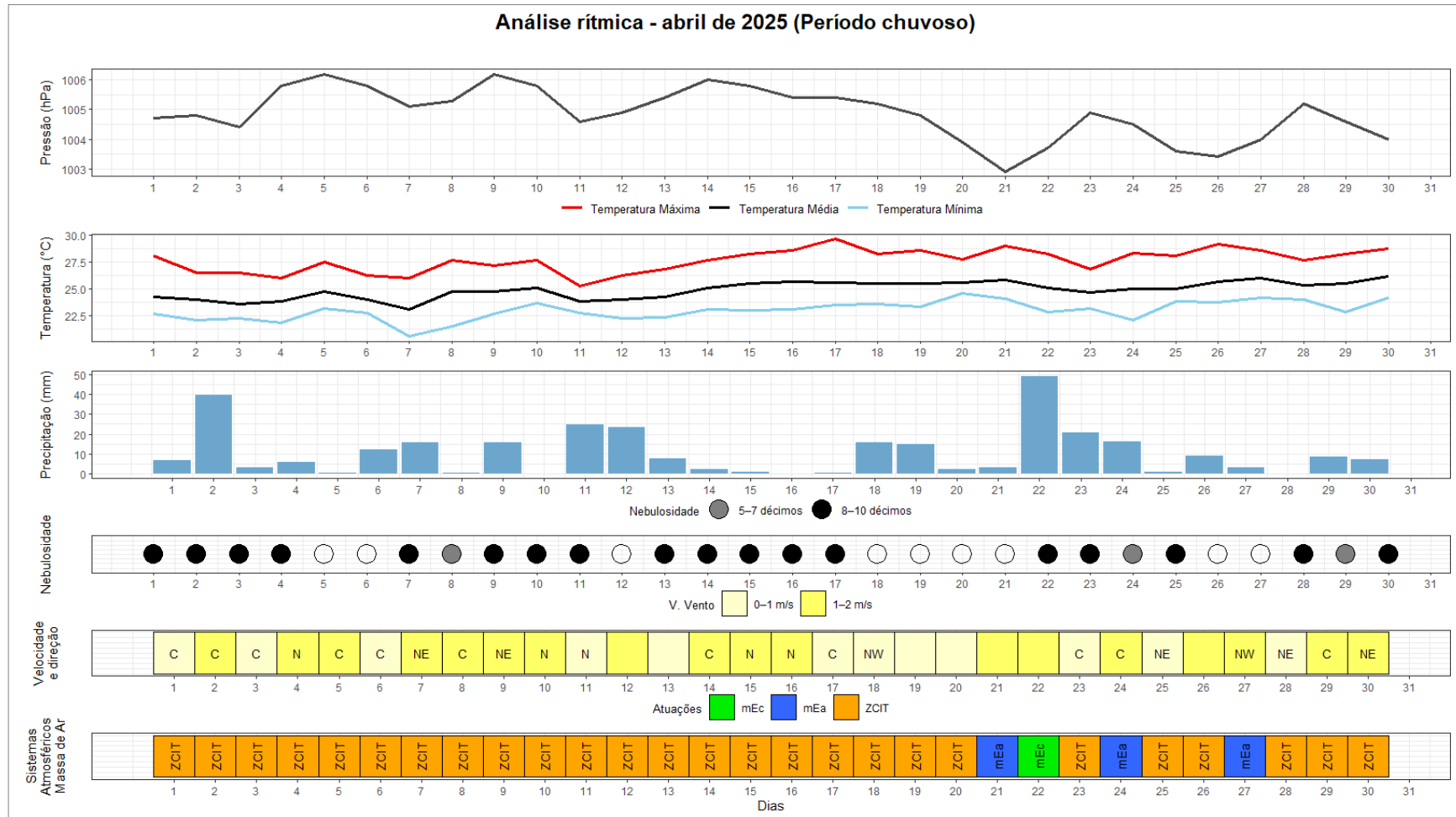
Os valores de pressão atmosférica, oscilando entre 1003 e 1007 hPa, confirmam a atuação contínua de um campo de baixa pressão difusa, típico da faixa equatorial durante a estação chuvosa. Isso representa uma configuração clássica do regime úmido na Ilha do Maranhão, com intenso controle da ZCIT sobre o ritmo atmosférico diário, conforme visto na Figura 19.

Figura 19 - Situação sinótica - recorte para o Brasil: a) 22/04/2025; b) 24/04/2025



Fonte: Marinha do Brasil – Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Gráfico 7 - Análise rítmica, abril de 2025 (Período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

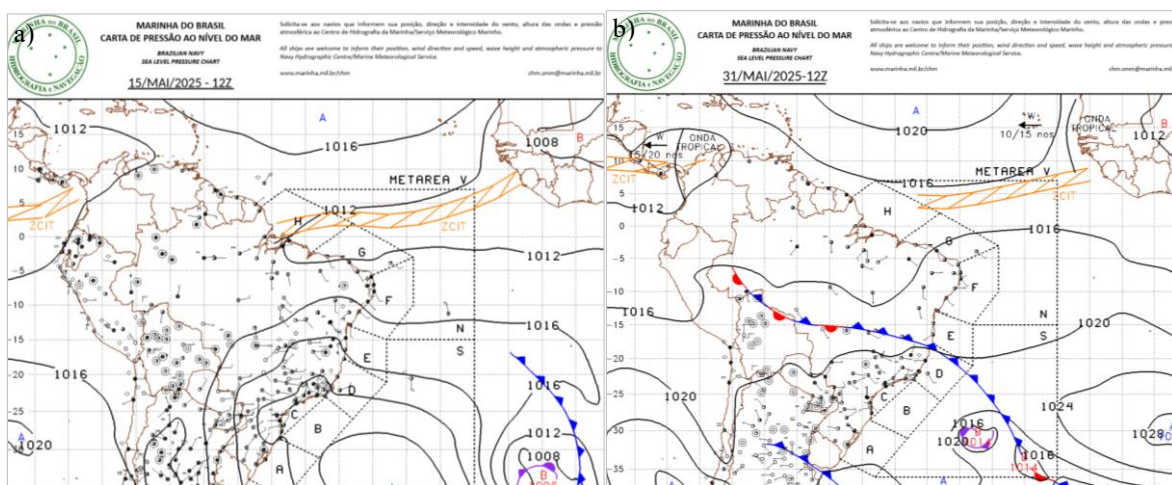
O mês de maio de 2025 ainda permanece sob domínio da ZCIT; contudo, apresenta sinais de transição para o período seco, especialmente a partir da terceira semana. As temperaturas máximas iniciam o mês próximas de 30 °C, enquanto as mínimas ficam em torno de 23 °C. A elevação gradual das máximas ao final do mês indica redução parcial da nebulosidade. Ressalta-se que, assim como em abril, os registros em círculos brancos não correspondem a céu limpo, mas sim à inexistência de dados na estação (Gráfico 8).

A precipitação mantém-se relativamente frequente, intensificando-se entre os dias 14 e 21, quando são vistos os maiores registros mensais. Após o dia 23, a chuva diminui de forma abrupta, dando lugar a vários dias consecutivos sem precipitação. Esse comportamento, somado à reorganização das massas de ar e dos sistemas atmosféricos, sinaliza o progressivo afastamento da ZCIT em direção ao hemisfério norte (Gráfico 8).

Os ventos predominam de NE, E e C (calmo), com velocidades de 0 a 2 m/s. A pressão atmosférica apresenta aumento progressivo, alcançando 1007–1009 hPa na última semana do mês, o que é coerente com a maior estabilidade e com o declínio da atividade convectiva (Gráfico 8).

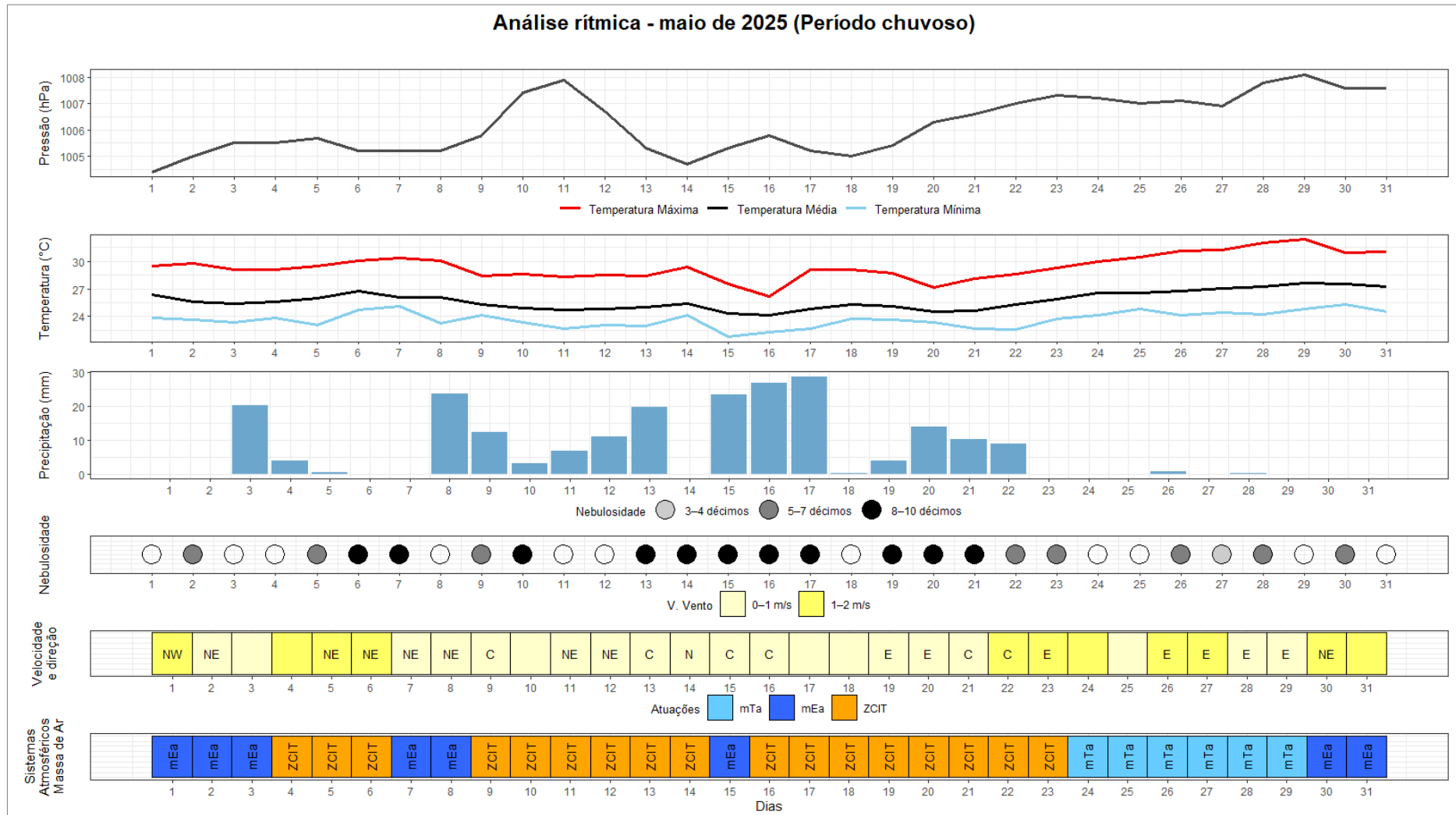
Dessa forma, maio de 2025 configura-se como um mês marcado pelos primeiros indícios de transição sazonal, no qual o regime chuvoso ainda se manifesta com vigor na primeira metade. Na Figura 20, observa-se que, em meados do mês, persiste a atuação da ZCIT associada à Massa Equatorial Atlântica (mEa), caracterizada por baixa pressão. Já no último dia do mês, nota-se o recuo da ZCIT e presença da Massa Tropical Atlântica (mTa), o que reduz a precipitação na Ilha do Maranhão.

Figura 20 - Situação sinótica - recorte para o Brasil: a) 15/05/2025; b) 31/05/2025



Fonte: Marinha do Brasil – Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

Gráfico 8 - Análise rítmica, maio de 2025 (Período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

De modo geral, as análises rítmicas mostraram-se fundamentais para o estudo, pois possibilitaram compreender o comportamento cotidiano da atmosfera na Ilha do Maranhão e verificar como cada período influenciou a dinâmica térmica e higrométrica da cidade.

Ao revelar o ritmo real dos elementos do clima, essas análises reforçam a confiabilidade dos resultados ao considerar a sucessão temporal ao interpretar adequadamente a variabilidade nas áreas comerciais, no conforto térmico e na concentração de particulados.

4.2 Análise espacial: uso do solo, cobertura vegetal e temperatura da superfície da Ilha do Maranhão

A análise espacial dos elementos físico-ambientais da Ilha do Maranhão constitui um fator fundamental para compreender como o processo de urbanização tem remodelado a superfície e influenciado diretamente as condições de conforto térmico nas áreas urbanas.

Em um território marcado por rápidas transformações e crescente pressão antrópica, torna-se indispensável examinar de forma integrada fatores como o uso e a cobertura do solo, a distribuição da vegetação e o comportamento térmico da superfície. Esses componentes, quando observados conjuntamente, permitem identificar padrões de ocupação, níveis de degradação ambiental, áreas de maior vulnerabilidade climática e regiões onde a estrutura natural ainda desempenha papel relevante na regulação microclimática.

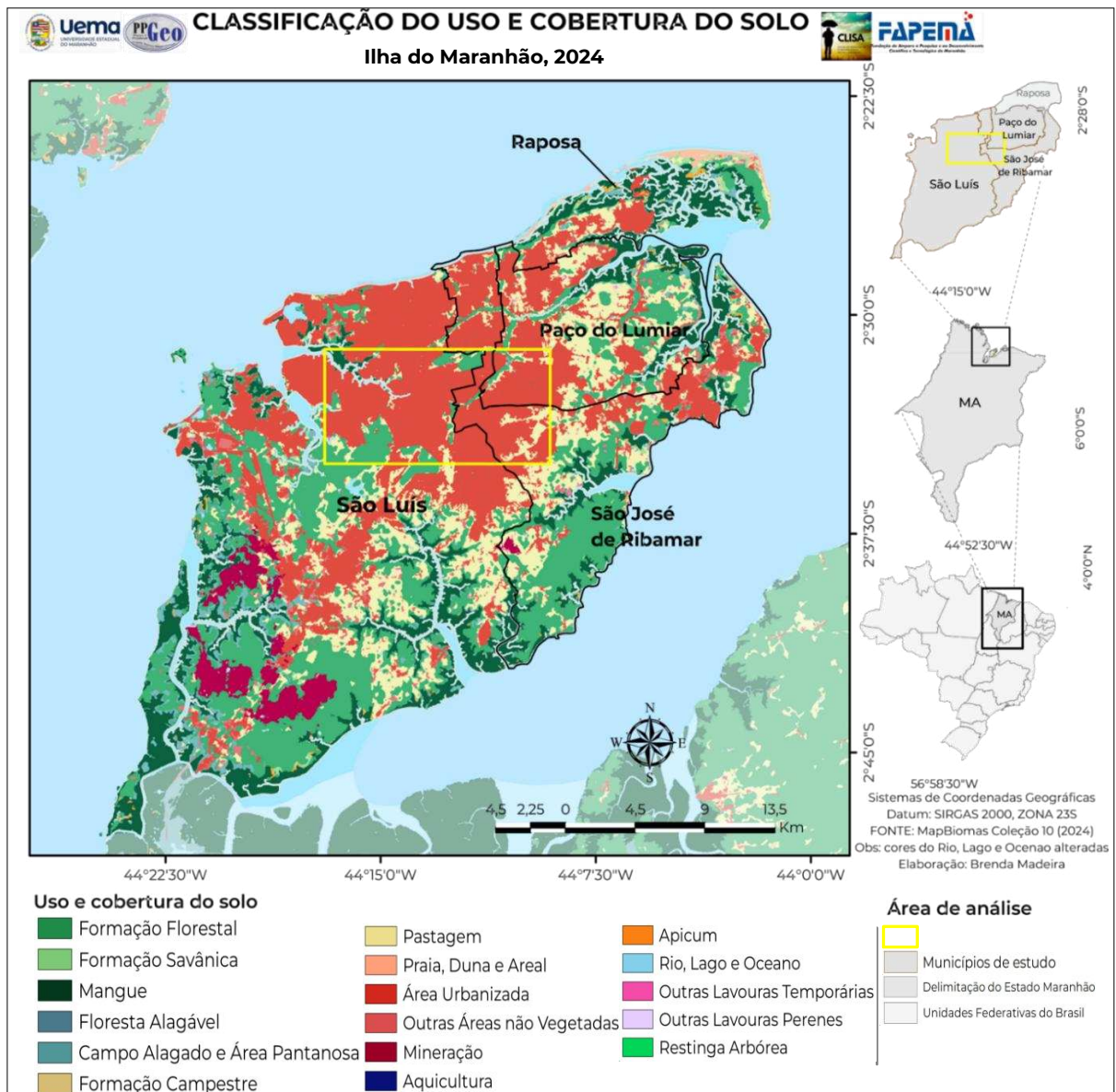
Além disso, esse tipo de abordagem espacial possibilita compreender como a expansão urbana promove mudanças na permeabilidade, na oferta de sombra, na presença de áreas verdes e na capacidade do solo de absorver calor, interferindo no equilíbrio térmico das cidades.

Nesse contexto, o mapa de uso do solo (Figura 21), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (Figura 22) e a Temperatura da Superfície (Figura 23) evidenciam a ampla concentração de áreas urbanizadas e, visualmente, o efeito dessa impermeabilização na temperatura da superfície, principalmente na região central da Ilha, onde se localizam justamente as áreas comerciais estudadas.

O mapa de uso e cobertura do solo evidencia uma forte predominância de áreas urbanizadas, concentradas principalmente na porção central da ilha e abrangendo os municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar, destacados em tons de vermelho (Figura 21).

As áreas vegetadas, como formações florestais, aparecem distribuídas principalmente nas regiões oeste e sul, revelando a pressão urbana sobre os remanescentes naturais. Os mangues, característicos da região, são marcantes nas faixas litorâneas e estuarinas. Além disso, a presença de pastagens, áreas agrícolas temporárias e campos alagados demonstra a diversidade de usos do solo. Na porção sul da ilha, destaca-se a atividade de mineração, um fator de grande relevância para a análise de materiais particulados (Figura 21).

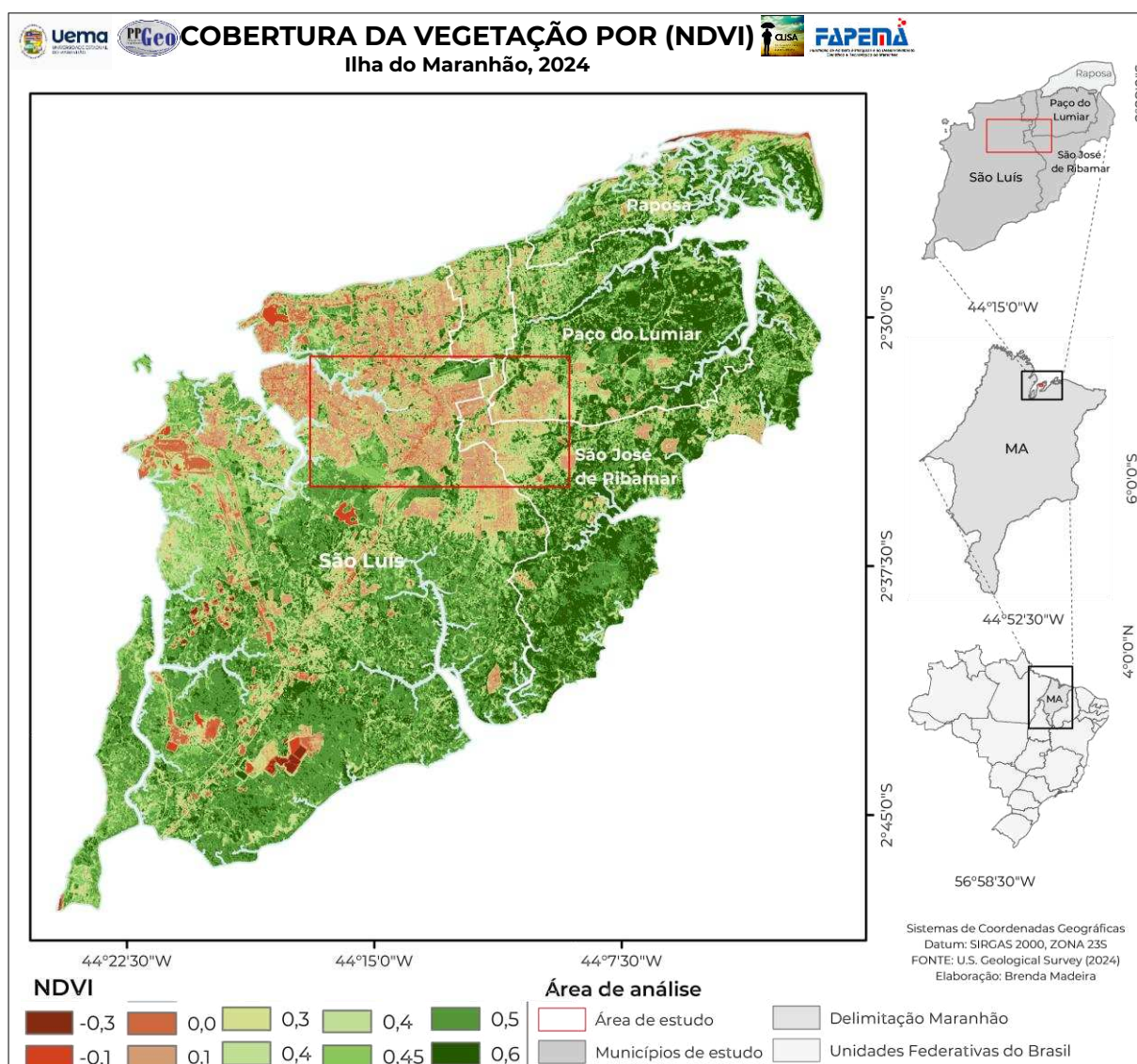
Figura 21 - Uso e cobertura do solo da Ilha do Maranhão (2024)



O mapa de NDVI apresenta valores variando de -0,3 a 0,6, conforme registrado na legenda. As áreas com NDVI negativo representam corpos d'água, superfícies altamente impermeabilizadas ou solos expostos e indicam a ausência total de vegetação (Figura 22).

Desse modo, entre 0,1 e 0,3, observam-se regiões de vegetação esparsa ou degradada, predominantes nos núcleos urbanos mais densos. Já os valores de 0,5 a 0,6 concentram-se nas áreas de maior densidade de vegetação saudável. A análise da área reforça que o avanço urbano é o principal responsável pela redução dos índices de NDVI e pela intensificação da fragmentação ambiental na Ilha (Figura 22).

Figura 22 - Cobertura da vegetação através do índice (NDVI) da Ilha do Maranhão – MA (2024)



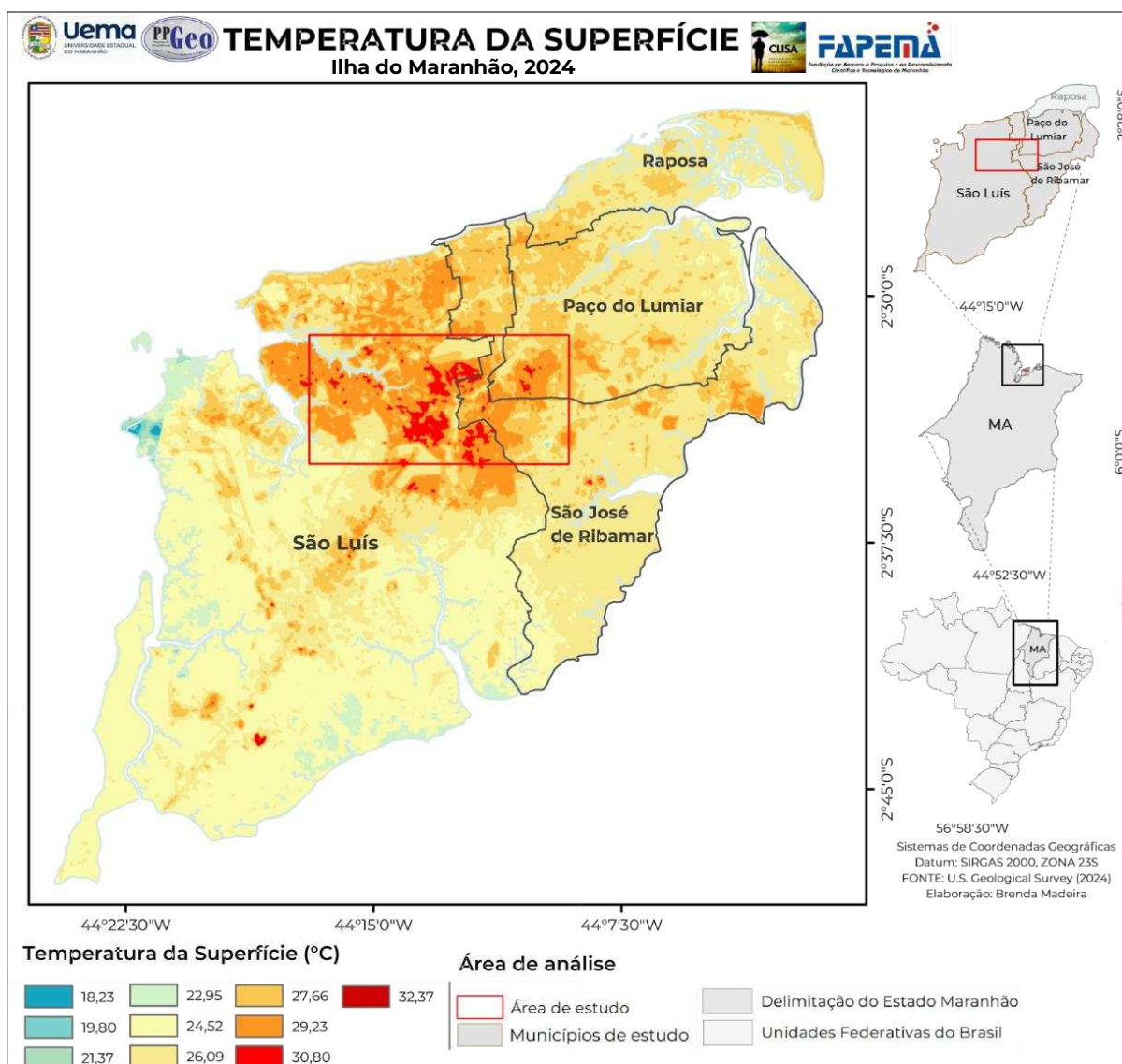
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 23 apresenta a distribuição espacial da temperatura da superfície na Ilha do Maranhão, que varia de 18,23 °C a 32,37 °C, conforme indicado na legenda. Os valores mais elevados, representados em vermelho (27,66 a 32,37 °C), concentram-se principalmente no

eixo urbano que conecta áreas de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar, coincidindo com regiões de maior densidade populacional e forte impermeabilização do solo.

Em contraste, as temperaturas mais amenas, mostradas em tons de azul e verde (18,23 a cerca de 22,95 °C), aparecem em áreas com maior cobertura vegetal e proximidade de corpos d'água. A área de estudo destacada em vermelho reforça a ocupação intensiva como condicionante direto para a formação de ilhas de calor (Figura 23).

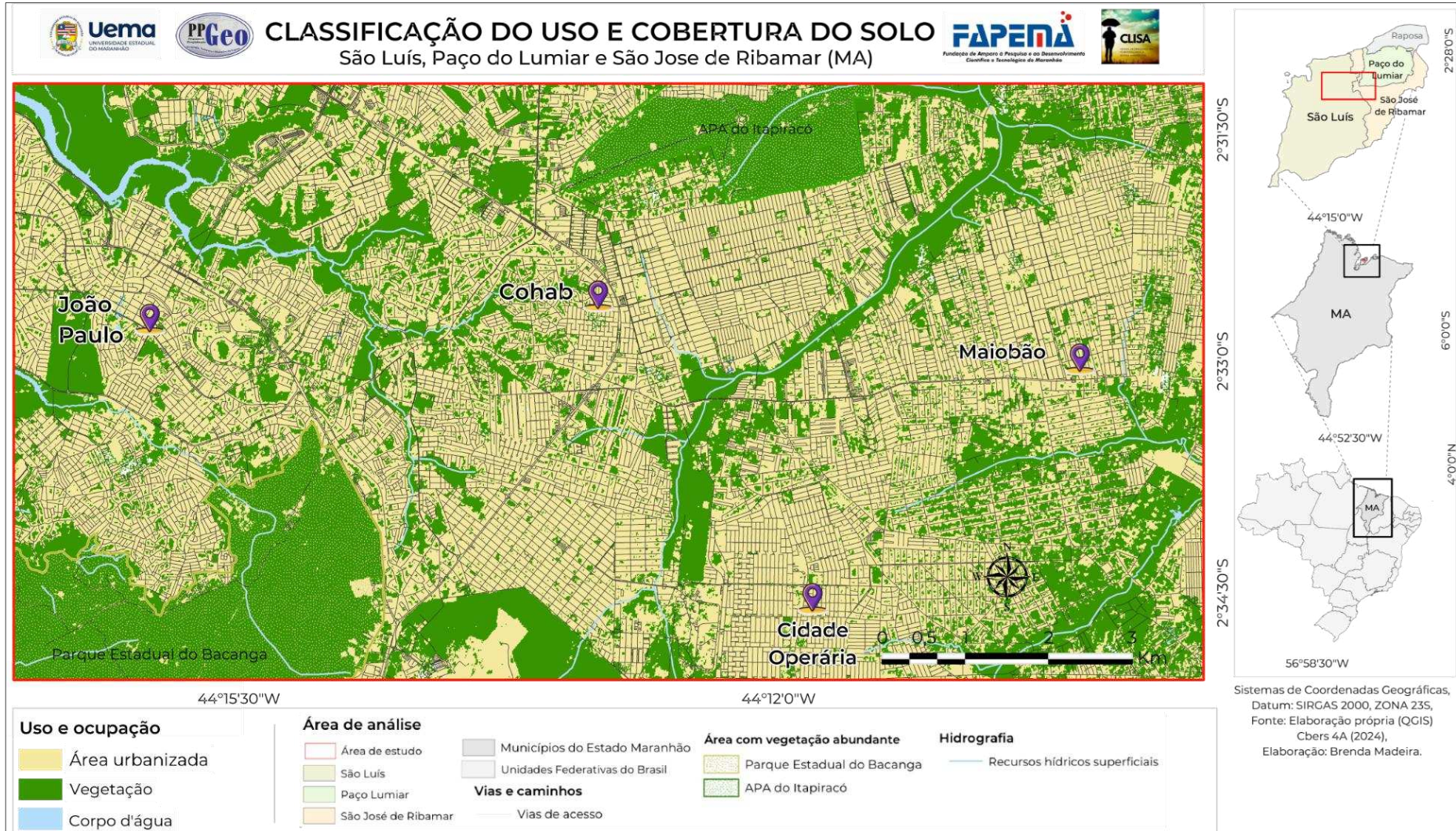
Figura 23 - Variação da Temperatura da Superfície da Ilha do Maranhão (2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

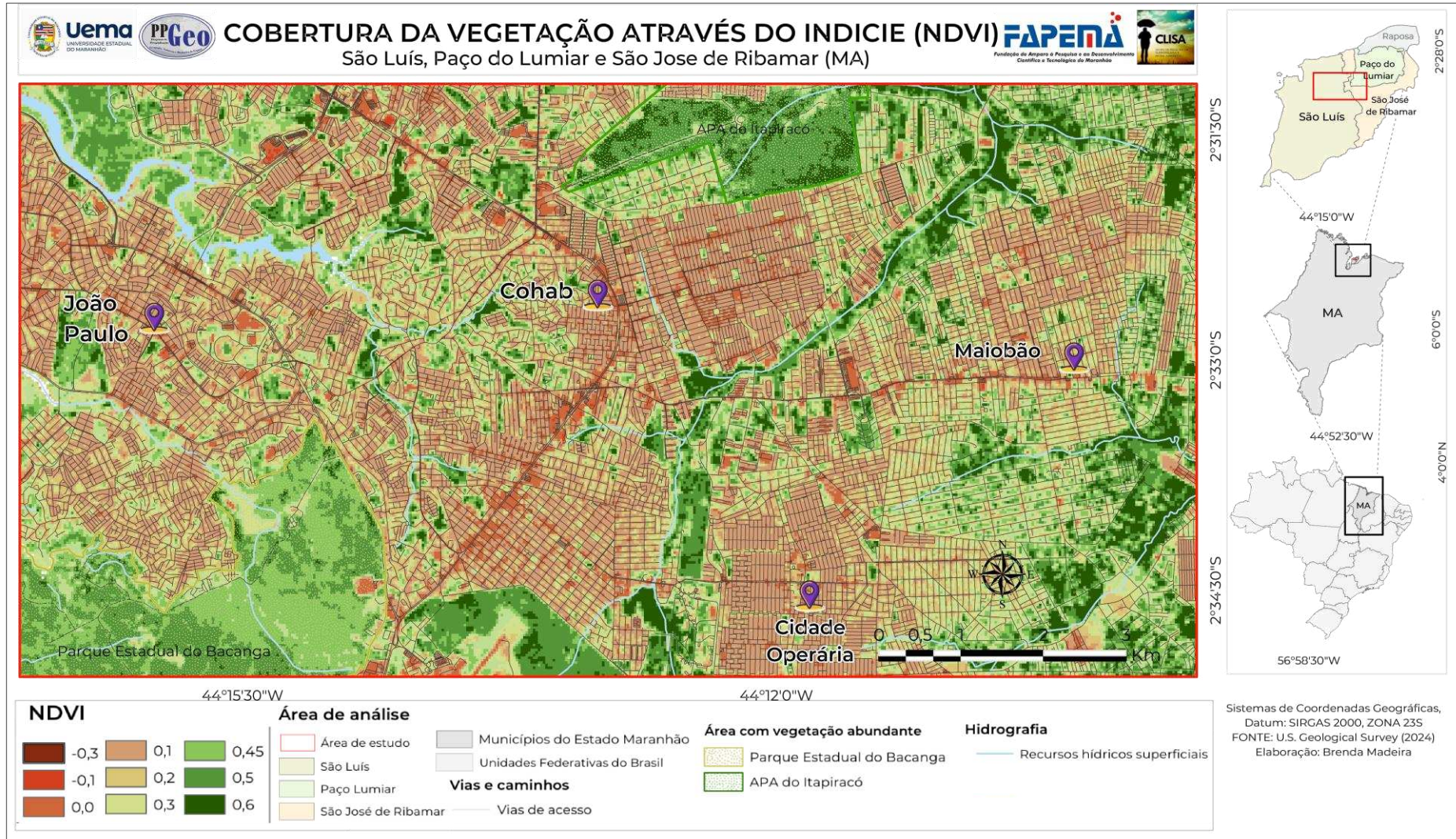
Com o intuito de aprofundar essa compreensão, as Figuras 24, 25 e 26 destacam a área específica de estudo, abrangendo os bairros João Paulo, Cohab, Cidade Operária e Maiobão, e apresentam, de forma detalhada, os elementos discutidos anteriormente:

Figura 24 - Recorte do uso e cobertura do solo da área de pesquisa (2024)



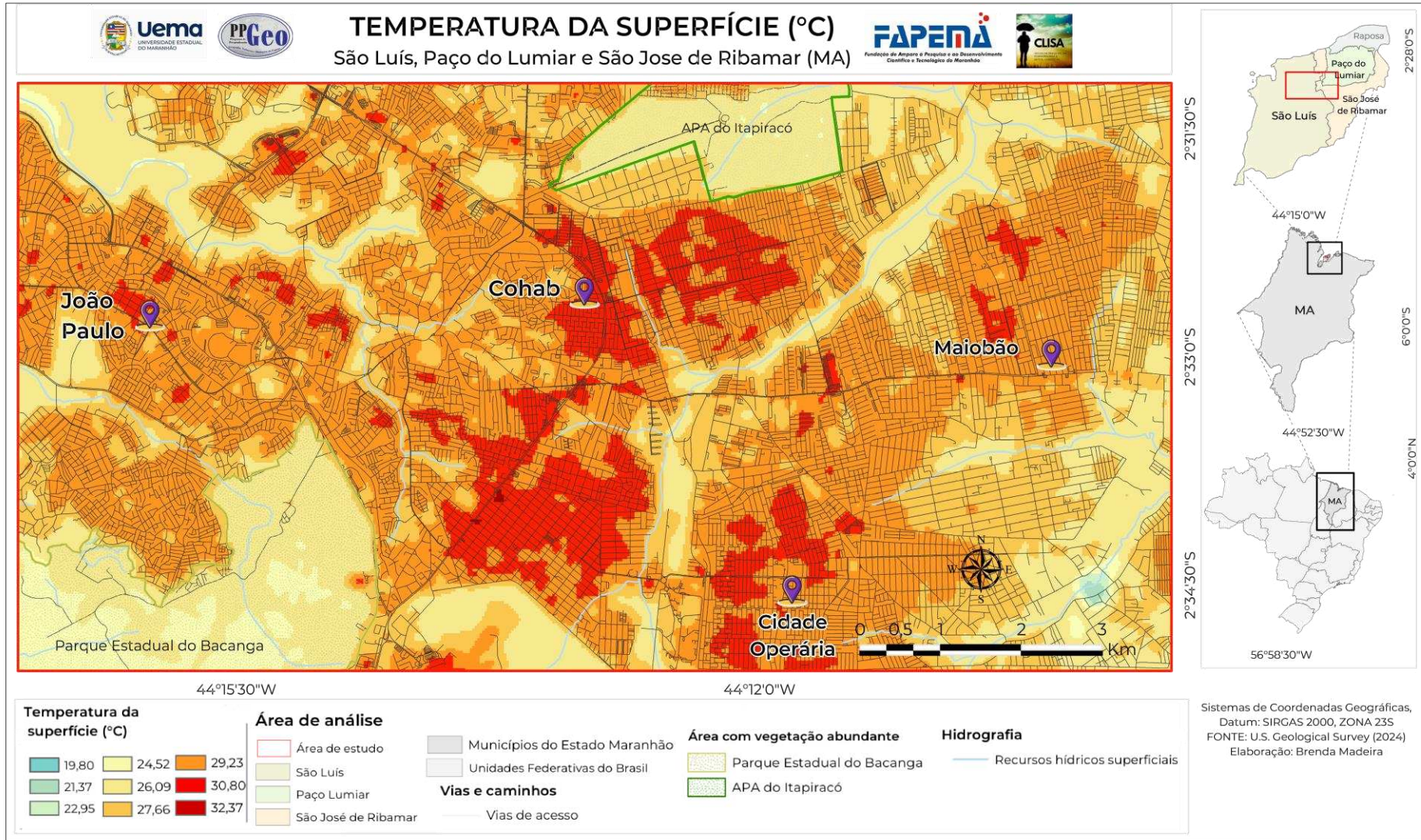
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 25 - Recorte cobertura da vegetação através do índice (NDVI) da área de pesquisa (2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 26 - Recorte de estudo variação da Temperatura da Superfície da área de pesquisa (2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3 Temperatura e umidade relativa do ar por transecto móvel nos períodos seco (2024) e chuvoso (2025)

Os dados obtidos por meio de transectos móveis permitiram identificar variações espaciais e temporais significativas no microclima urbano na Ilha do Maranhão (MA), especialmente em áreas com intensa atividade comercial. As coletas foram realizadas em dois horários contrastantes, às 15h e às 20h, durante dias úteis e finais de semana, abrangendo o período seco (outubro de 2024) e o período chuvoso (abril e maio de 2025). Essa abordagem possibilitou uma análise comparativa dos padrões térmicos urbanos em diferentes dias e sazonalidades.

4.3.1 Variação na semana 15h e 20h, 18 out. 2024 (período seco)

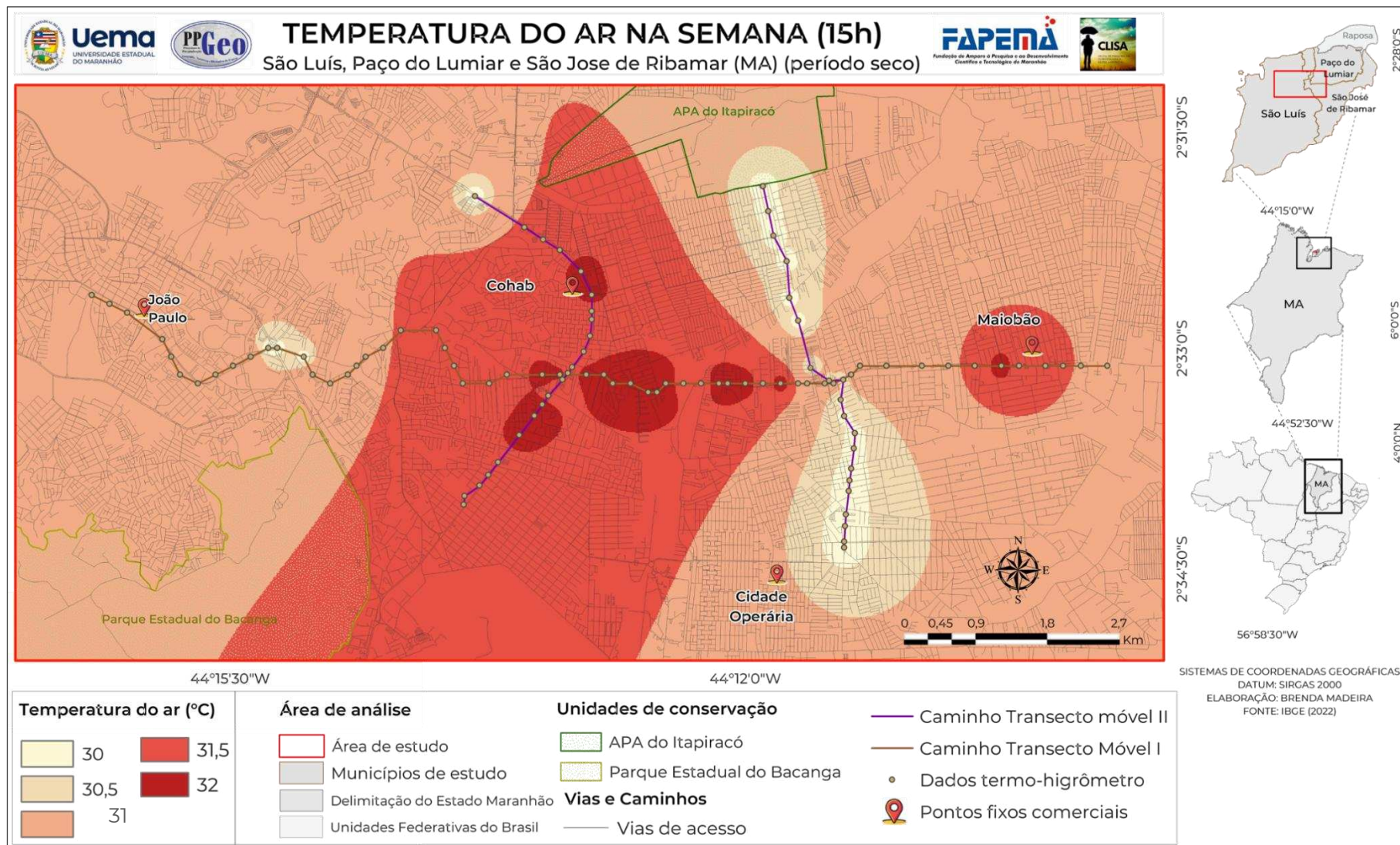
Os dados obtidos, interpolados e representados por meio de mapas temáticos, permitiram a visualização detalhada das dinâmicas de temperatura e umidade nos pontos comerciais ao longo dos trajetos analisados (Figuras 26 a 33).

Conforme apresentado nos mapas a seguir, observa-se que, no período da tarde (15h), há uma variação de temperatura entre 30 °C e 32 °C, com os núcleos mais aquecidos concentrados principalmente nos bairros da Cohab e do Maiobão. No mesmo horário, a umidade relativa do ar apresenta variação de 52% a 60% (Figuras 27 e 28).

No período noturno, verifica-se um resfriamento generalizado, com temperaturas variando de 26,5 °C a 28,5 °C, embora se mantenham mais elevadas nos setores urbanizados centrais. As áreas vegetadas permanecem relativamente mais frescas, contribuindo para um microclima local mais confortável. A umidade relativa noturna apresenta elevação expressiva, e alcança valores entre 68% e 69,5% (Figuras 29 e 30).

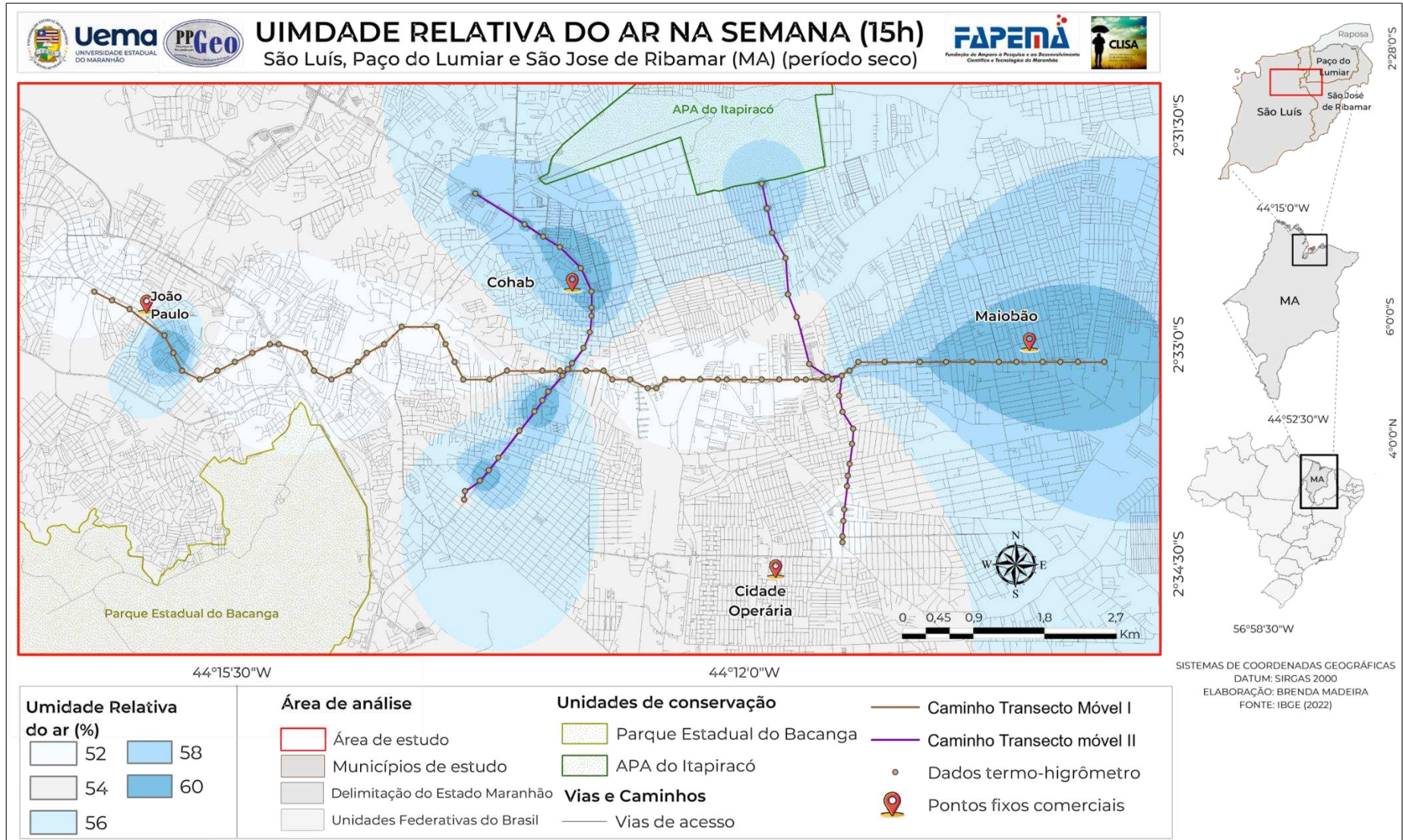
De forma geral, os resultados apontam que, durante a semana no período seco, a configuração do uso e cobertura da terra exerce influência direta sobre a dinâmica térmica. Áreas densamente construídas tendem a concentrar energia calorífica e apresentar menor umidade, especialmente no pico da tarde, enquanto a presença de vegetação atua como reguladora microclimática, atenuando extremos térmicos e favorecendo a manutenção da umidade do ar.

Figura 27 - Temperatura do ar na semana no dia 18, out. 2024 (15 h) (período seco)



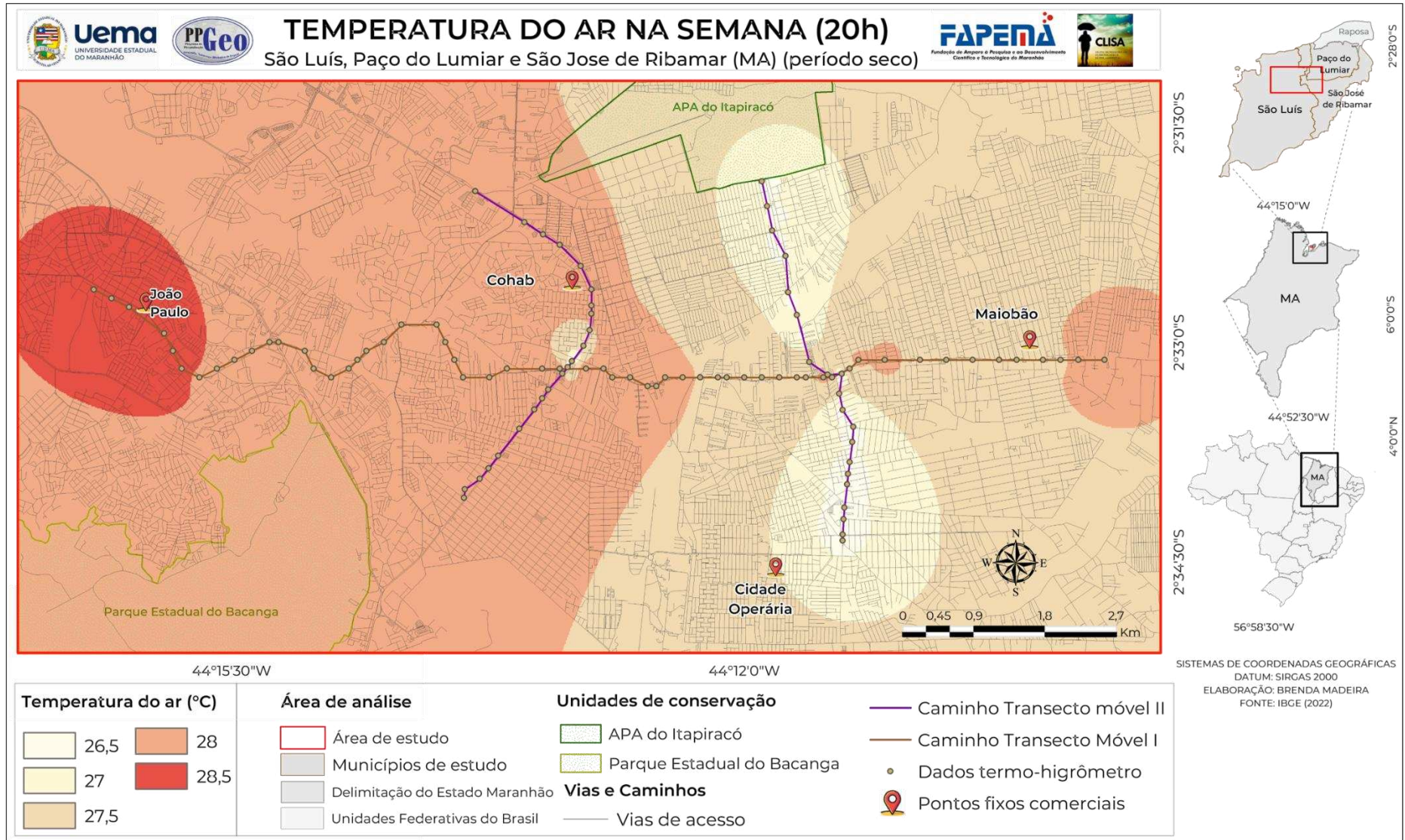
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 28 - Umidade relativa do ar na semana no dia 18, out. 2024 (15 h) (período seco)



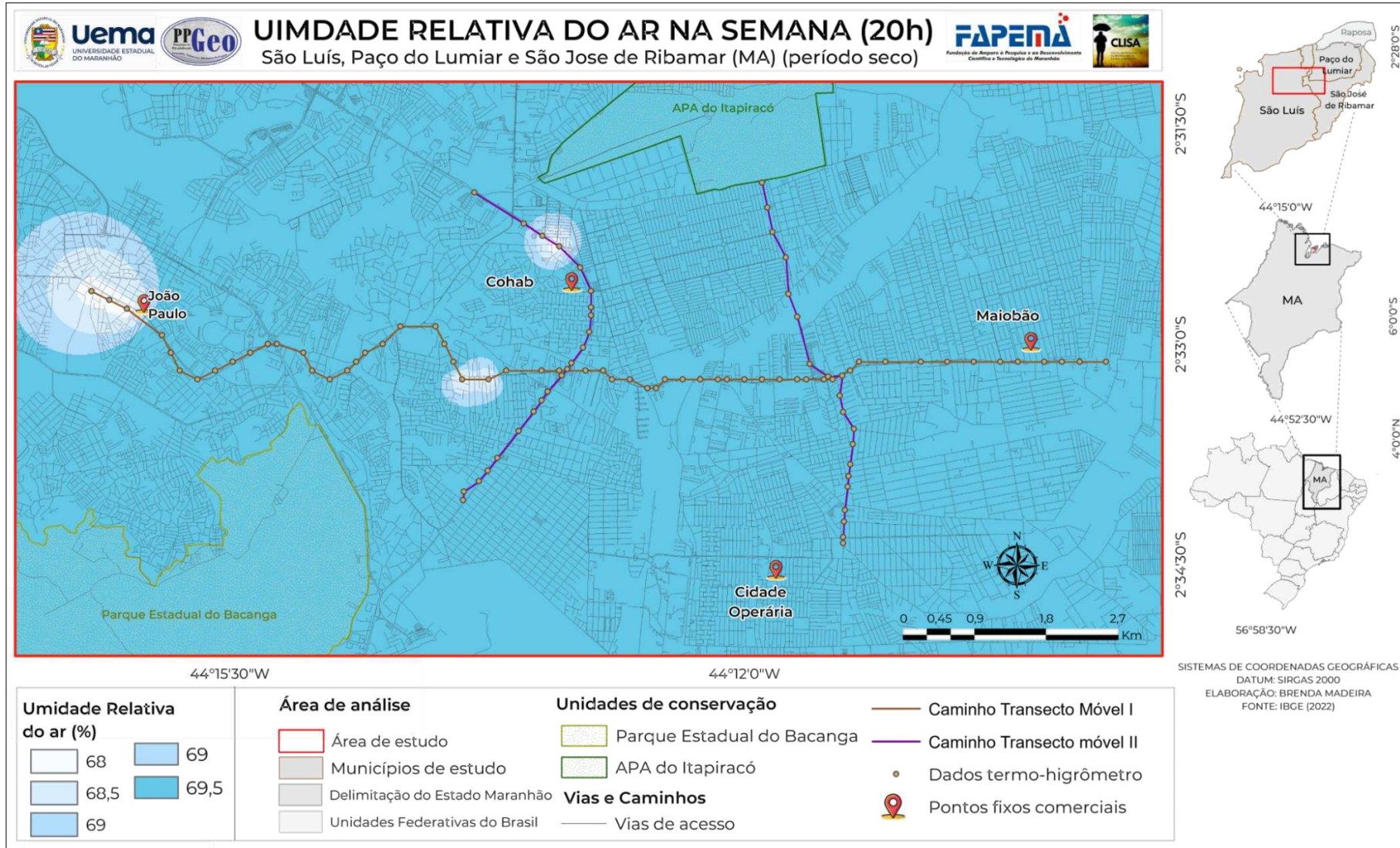
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 29 - Temperatura do ar na semana no dia 18, out. 2024 (20h) (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 30 - Umidade relativa do ar na semana no dia 18, out. 2024 (20h) (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.2 Variação no final de semana 15h e 20h, 27 out. 2024 (período seco)

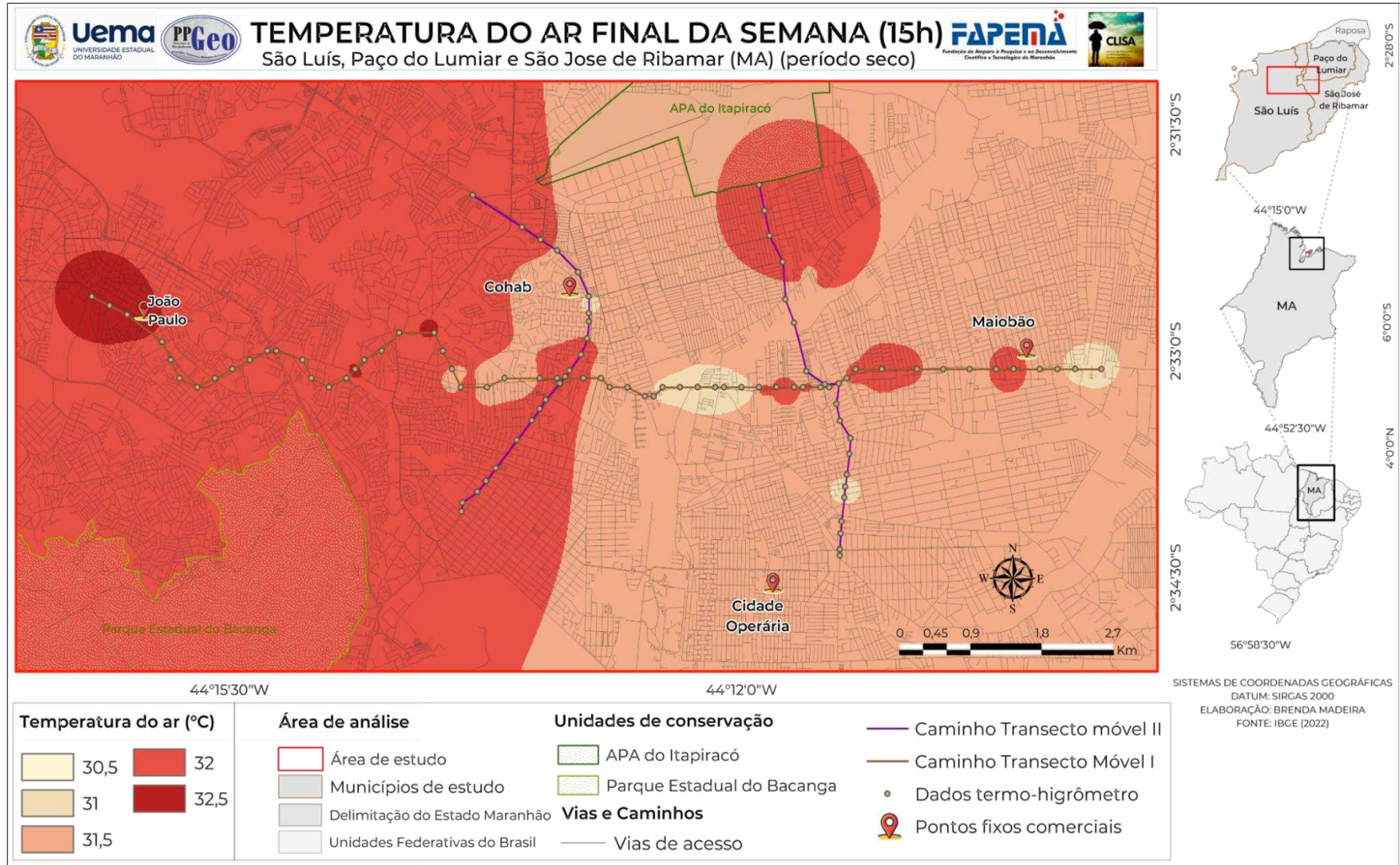
A análise dos dados coletados no final de semana revela um padrão térmico e de umidade muito semelhante ao observado durante os dias úteis.

No período da tarde (15h), as temperaturas apresentaram valores mais elevados em relação aos dias de semana, variando entre 30,5 °C e 32,5 °C. As áreas mais aquecidas concentram-se, novamente, em setores densamente urbanizados, como Cohab e Maiobão. No mesmo horário, a umidade relativa do ar variou entre 60% e 66%, com os menores valores associados às áreas mais quentes e adensadas, enquanto as áreas vegetadas e menos urbanizadas registraram índices mais elevados. Esse cenário reforça a relação inversa entre temperatura e umidade, observada também nos dias úteis (Figuras 31 e 32).

Já às 20h, ocorre o esperado resfriamento, com temperaturas entre 27 °C e 28,5 °C. Apesar da redução geral, os setores urbanizados ainda apresentam temperaturas ligeiramente superiores às das áreas verdes, evidenciando a persistência, mesmo no período noturno, dessas elevações. Em contrapartida, a umidade relativa nesse horário apresentou aumento expressivo, alcançando valores entre 68% e 74%. A distribuição espacial da umidade no período noturno revela uma homogeneização maior do que a verificada no turno da tarde (Figuras 33 e 34).

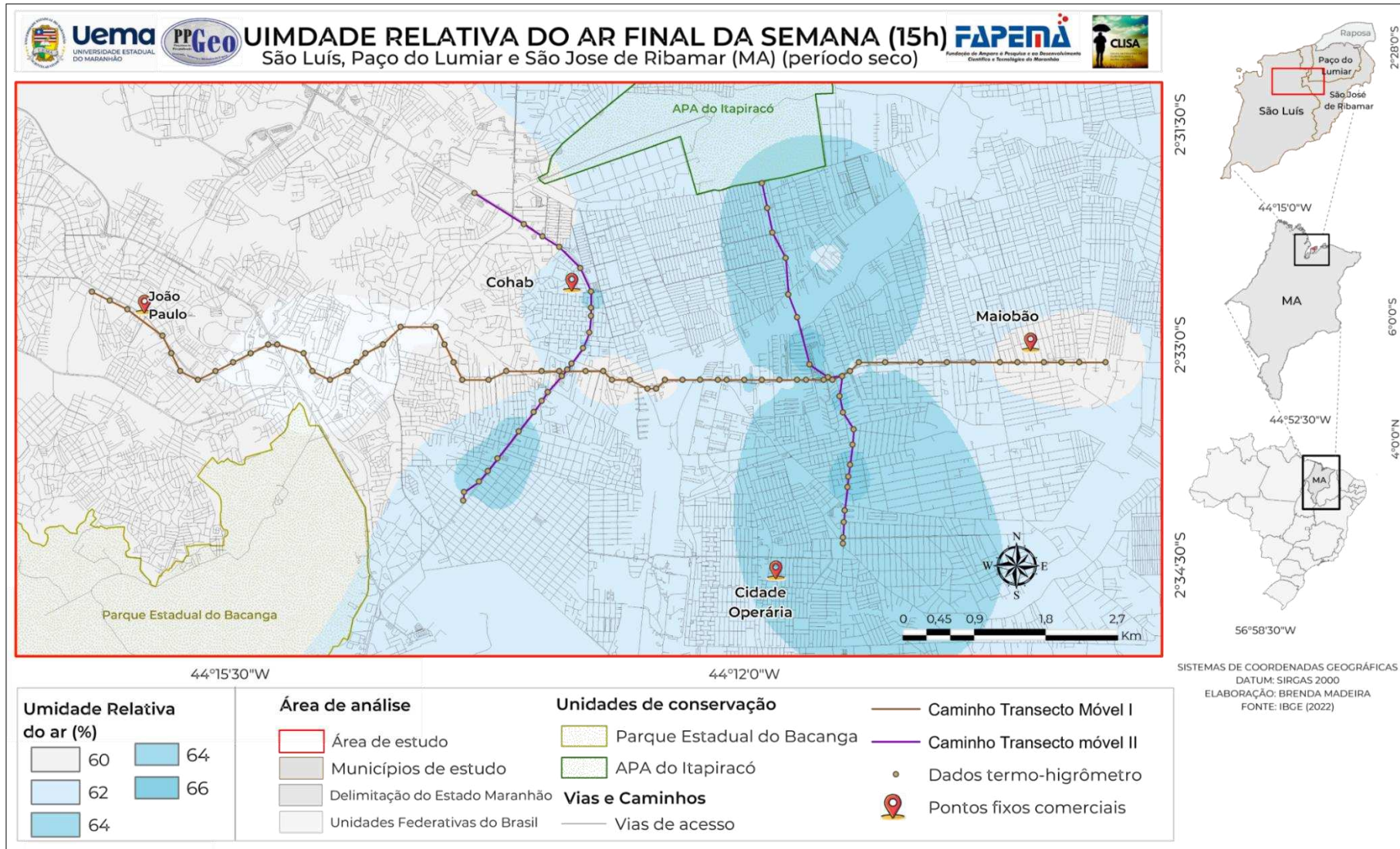
De forma geral, a análise do final de semana indica que as dinâmicas térmicas seguem o mesmo padrão dos dias de semana, mas com temperaturas diurnas ligeiramente mais elevadas e umidade relativa levemente reduzida durante a tarde.

Figura 31 - Temperatura do ar final de semana no dia 27, out. 2024 (15 h) (período seco)



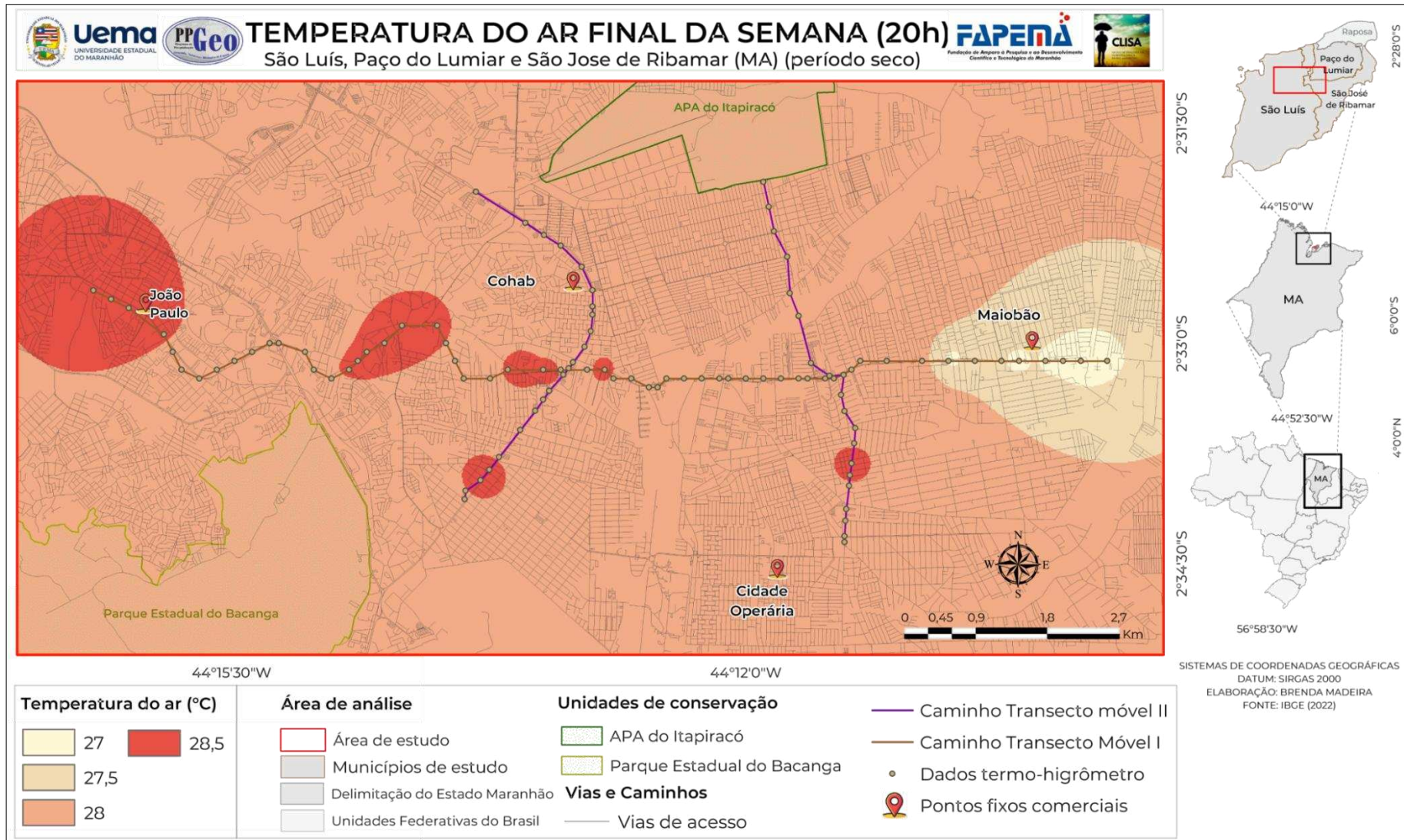
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 32 - Umidade relativa do ar final de semana no dia 27, out. 2024 (15 h) (período seco)



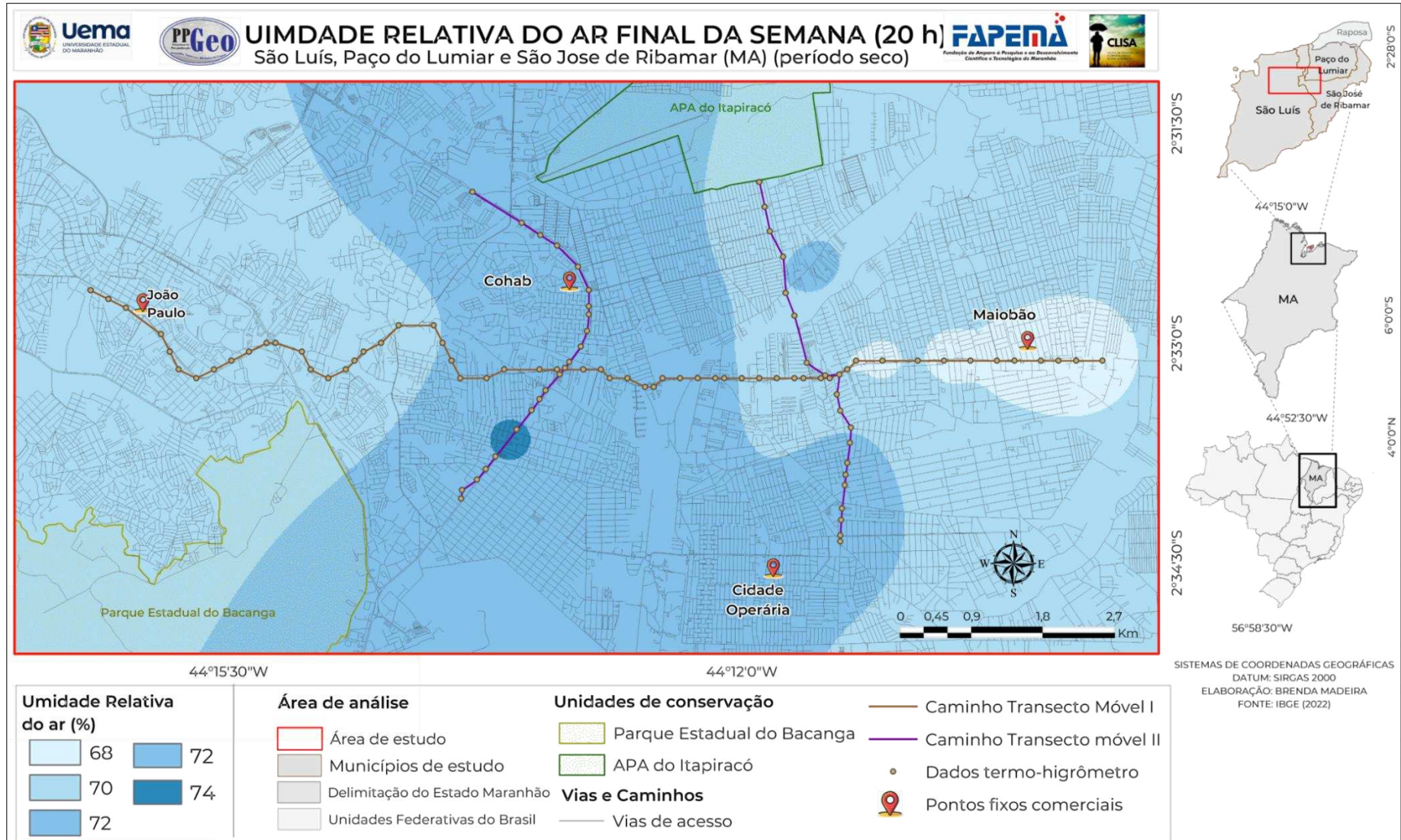
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 33 - Temperatura do ar final de semana no dia 27, out. 2024 (20 h) (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 34 - Umidade relativa do ar na semana no dia 27, out. 2024 (20h) (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

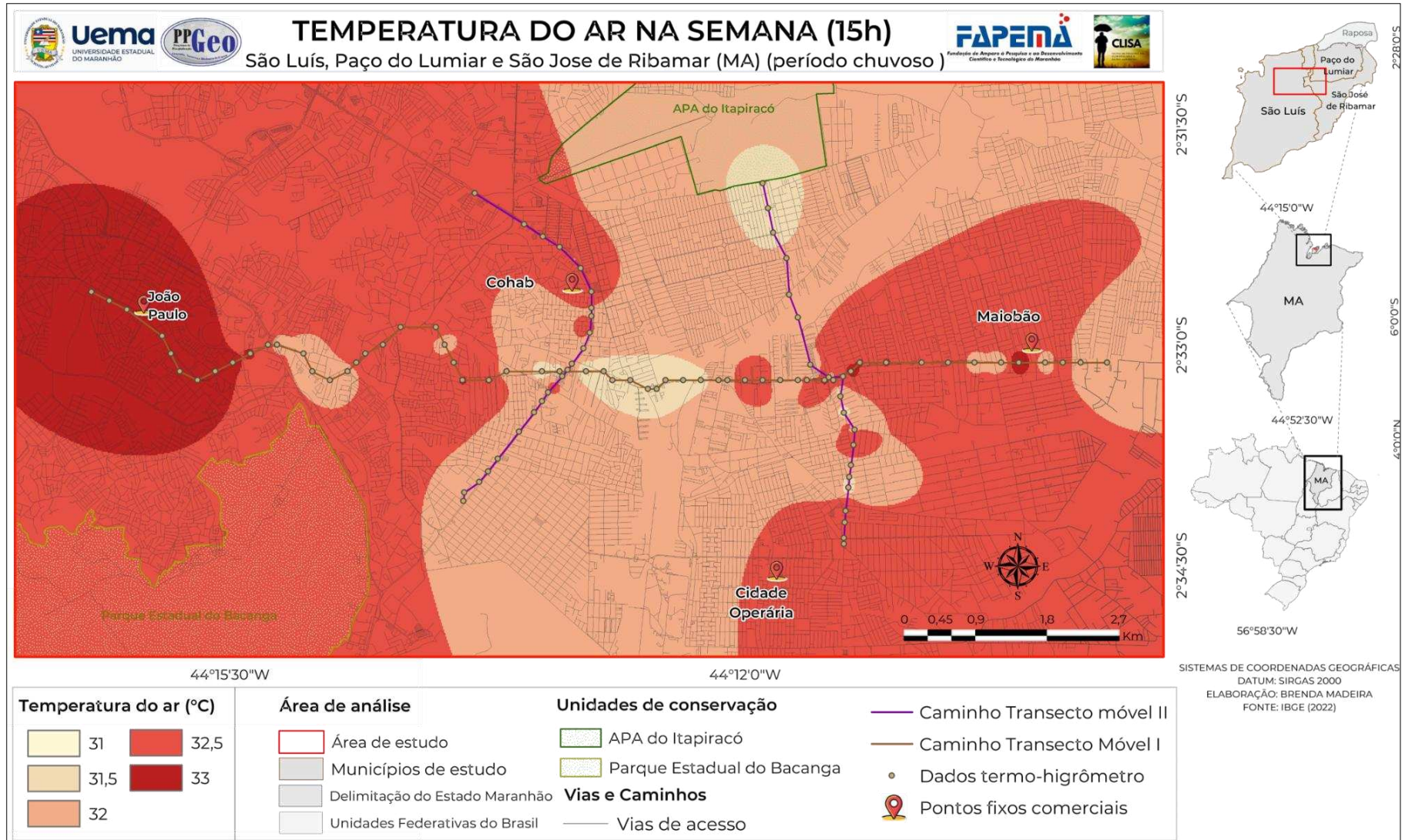
4.3.3 Variação na semana 15h e 20h, 10 abr. 2025 (período chuvoso)

A análise dos dados coletados durante a semana no período chuvoso revela um padrão mais acentuado de umidade relativa do ar. À tarde (15h), as temperaturas do ar variaram de 31 °C a 33 °C, sendo registradas as temperaturas mais altas nas áreas comerciais investigadas do João Paulo e no trecho da Estrada de Ribamar, localizada no bairro do Maiobão. A umidade relativa do ar, nesse mesmo horário, oscilou entre 45% e 60% (Figuras 35 e 36).

Durante a noite (20h), observam-se temperaturas variando de 28 °C a 30 °C. Cabe ressaltar que, mesmo com a redução térmica generalizada, os pontos mais elevados continuam evidentes, como no João Paulo e em uma pequena parte da Cohab. Já a umidade relativa do ar apresentou um aumento expressivo, alcançando valores entre 71% e 74% (Figuras 37 e 38).

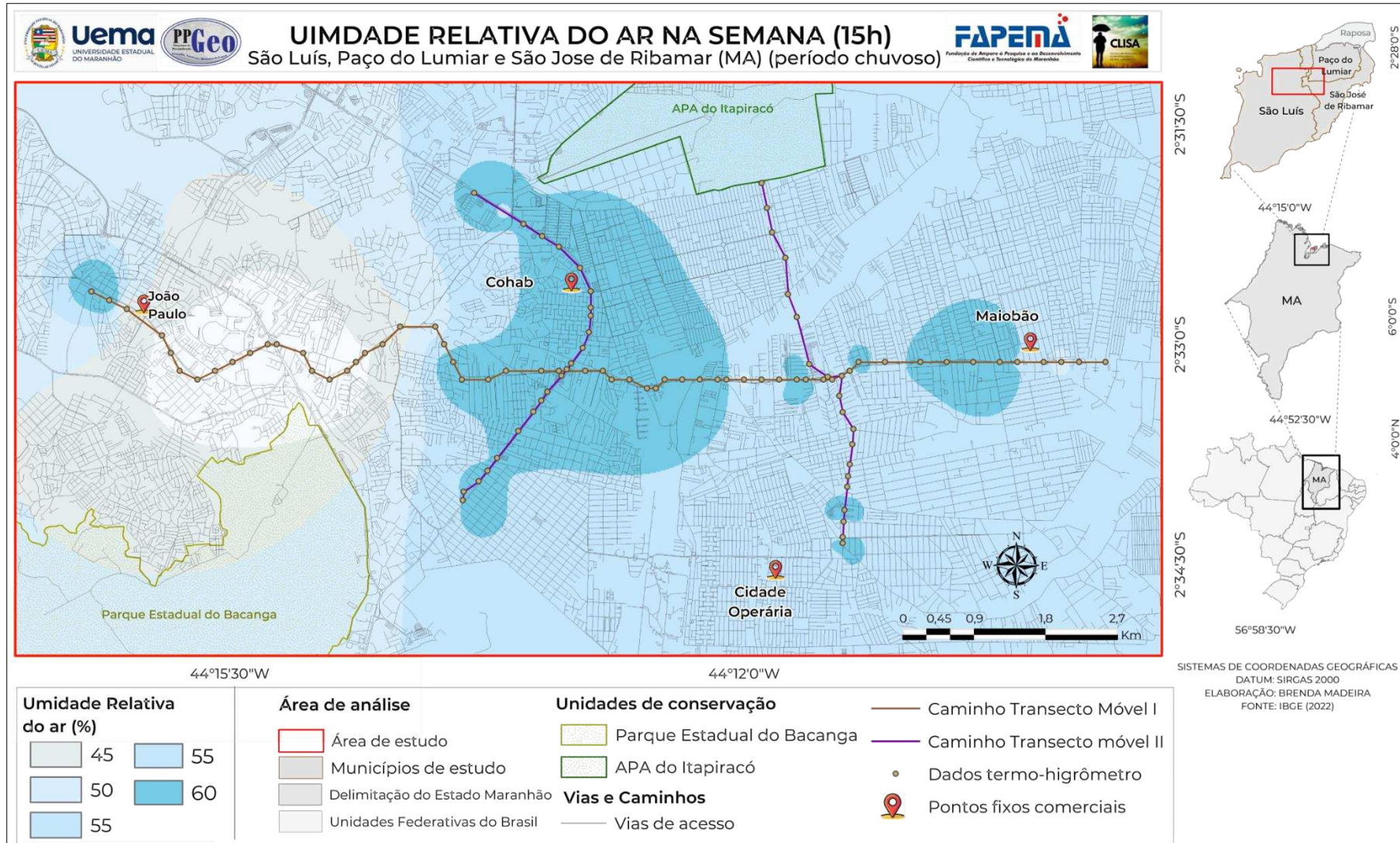
De modo geral, os dados do período chuvoso confirmam a existência de pequenas variações sazonais. Mesmo em uma estação caracterizada por maior umidade atmosférica, as áreas urbanas continuam a apresentar temperaturas mais elevadas e umidade relativa inferior, especialmente durante o período da tarde.

Figura 35 - Temperatura do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (15 h) (período chuvoso)



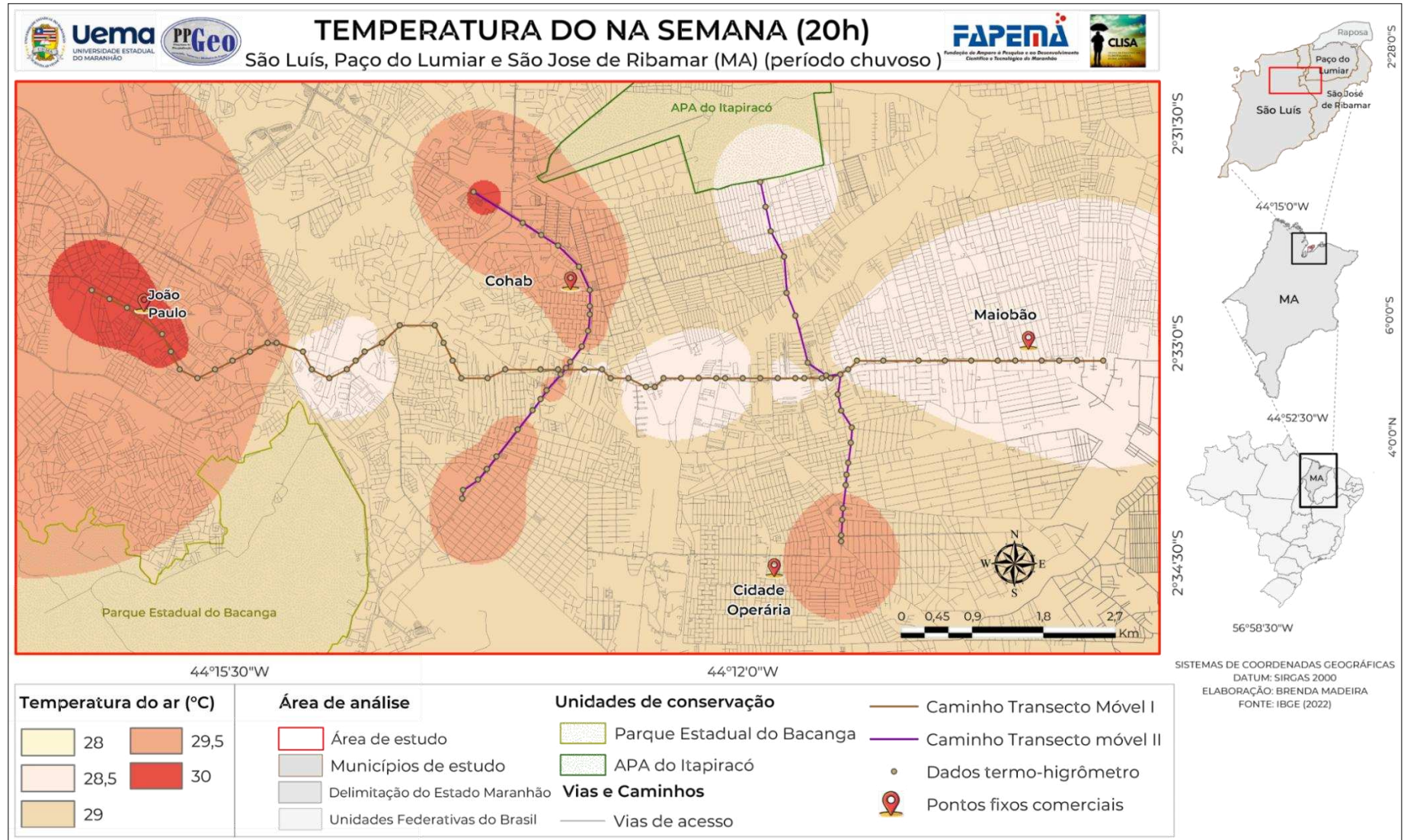
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 36 - Umidade relativa do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (15 h) (período chuvoso)



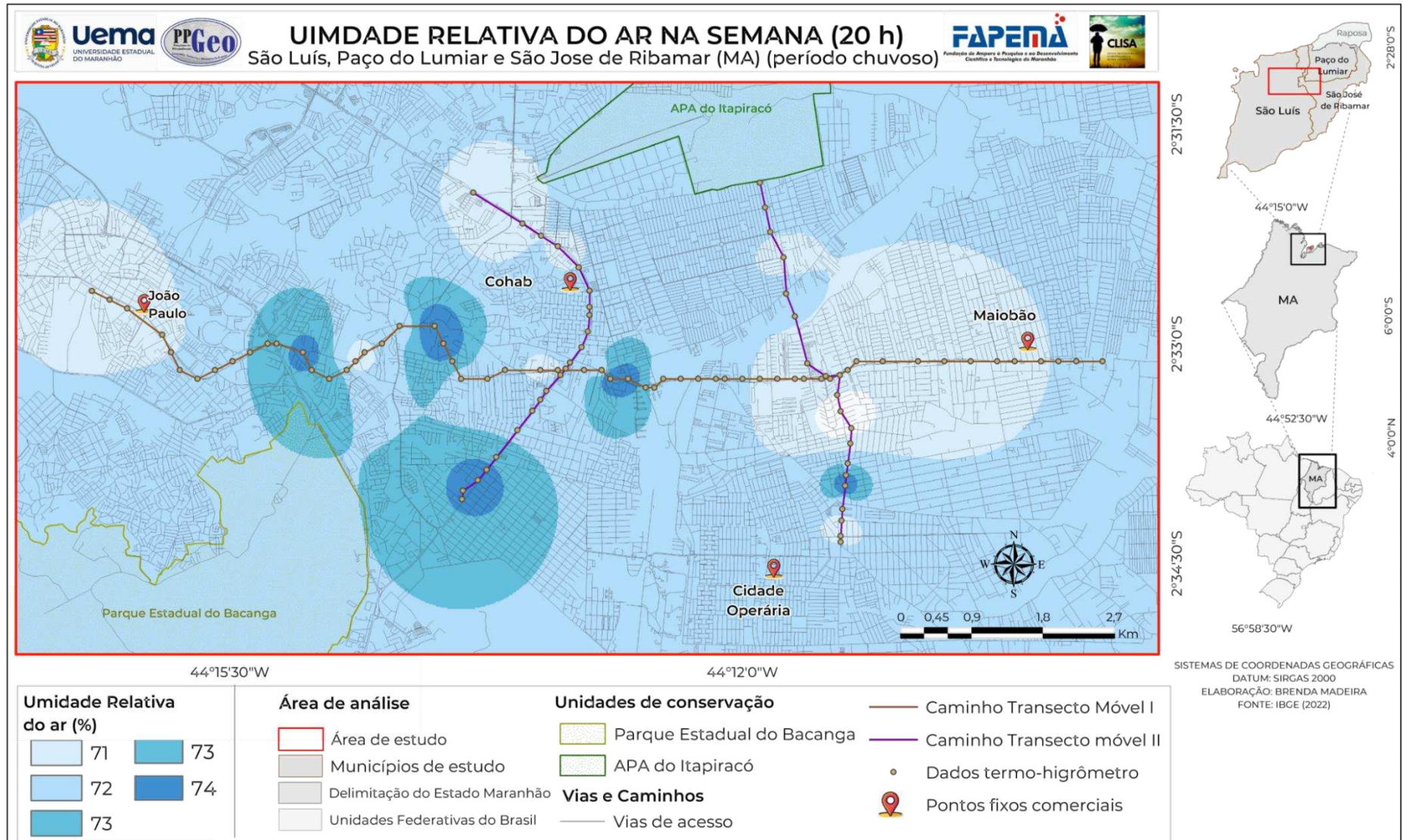
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 37 - Temperatura do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (20 h) (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 38 - Umidade relativa do ar na semana no dia 10, abr. 2025 (20 h) (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.4 Variação no final de semana 15h e 20h, 17 mai. 2025 (período chuvoso)

Ao analisar os dados do transecto móvel no final de semana, durante o período chuvoso, observou-se que a temperatura às 15h variou entre 30,5 °C e 32,5 °C, com máximas registradas na Cohab e na Cidade Operária. A umidade relativa do ar ficou entre 60% e 75% (Figuras 39 e 40).

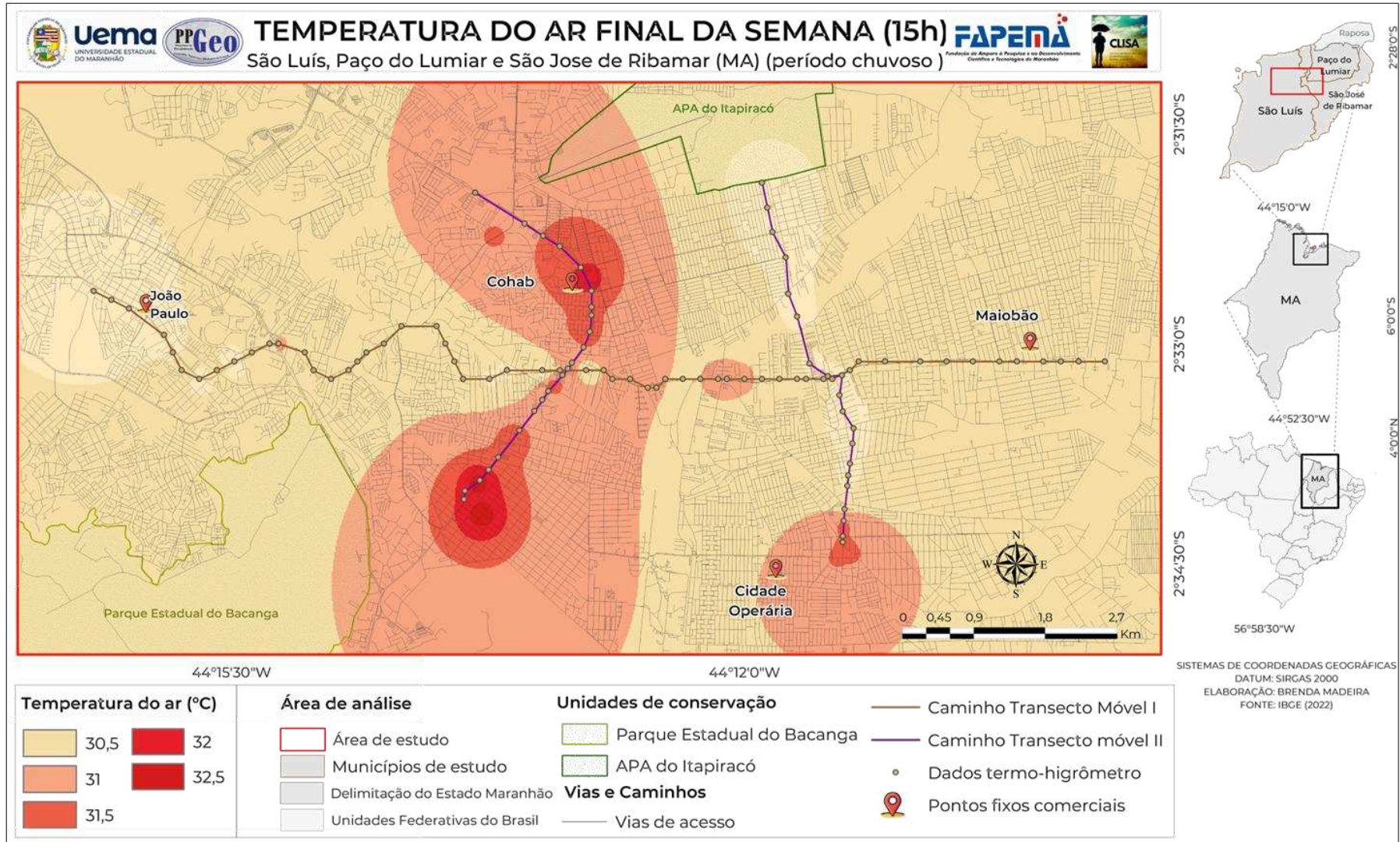
Às 20h, a temperatura reduziu-se para valores entre 27 °C e 29 °C, com máximas no Maiobão e em partes do João Paulo e mínimas nas regiões mais arborizadas. A distribuição térmica tornou-se mais homogênea em comparação ao período da tarde. Quanto à umidade relativa, houve uma pequena variação noturna de 74% a 77%, resultando também em uma representação espacial mais homogênea. Em relação à tarde, verificou-se um aumento generalizado da umidade e a diminuição das discrepâncias entre os pontos medidos (Figuras 41 e 42).

Pode-se observar que, embora o período chuvoso presente, em geral, maior umidade relativa do ar, os dados obtidos revelam a persistência de pontos de elevadas temperaturas em setores específicos da área de estudo. Essa permanência, mesmo sob condições climáticas mais úmidas, evidencia que fatores urbanos locais, como a elevada impermeabilização do solo, a escassez de arborização e a presença de materiais com alta capacidade de retenção térmica, exercem influência direta sobre a dinâmica microclimática, muitas vezes sobrepondo-se aos efeitos sazonais.

Por outro lado, áreas próximas a unidades de conservação, como a APA do Itapiracó e o Parque Estadual do Bacanga, demonstraram comportamento térmico mais estável e ameno, mesmo nos horários mais quentes do dia. A presença contínua de cobertura vegetal densa nesses espaços atua como uma reguladora microclimática natural, o que contribui para a redução das temperaturas locais.

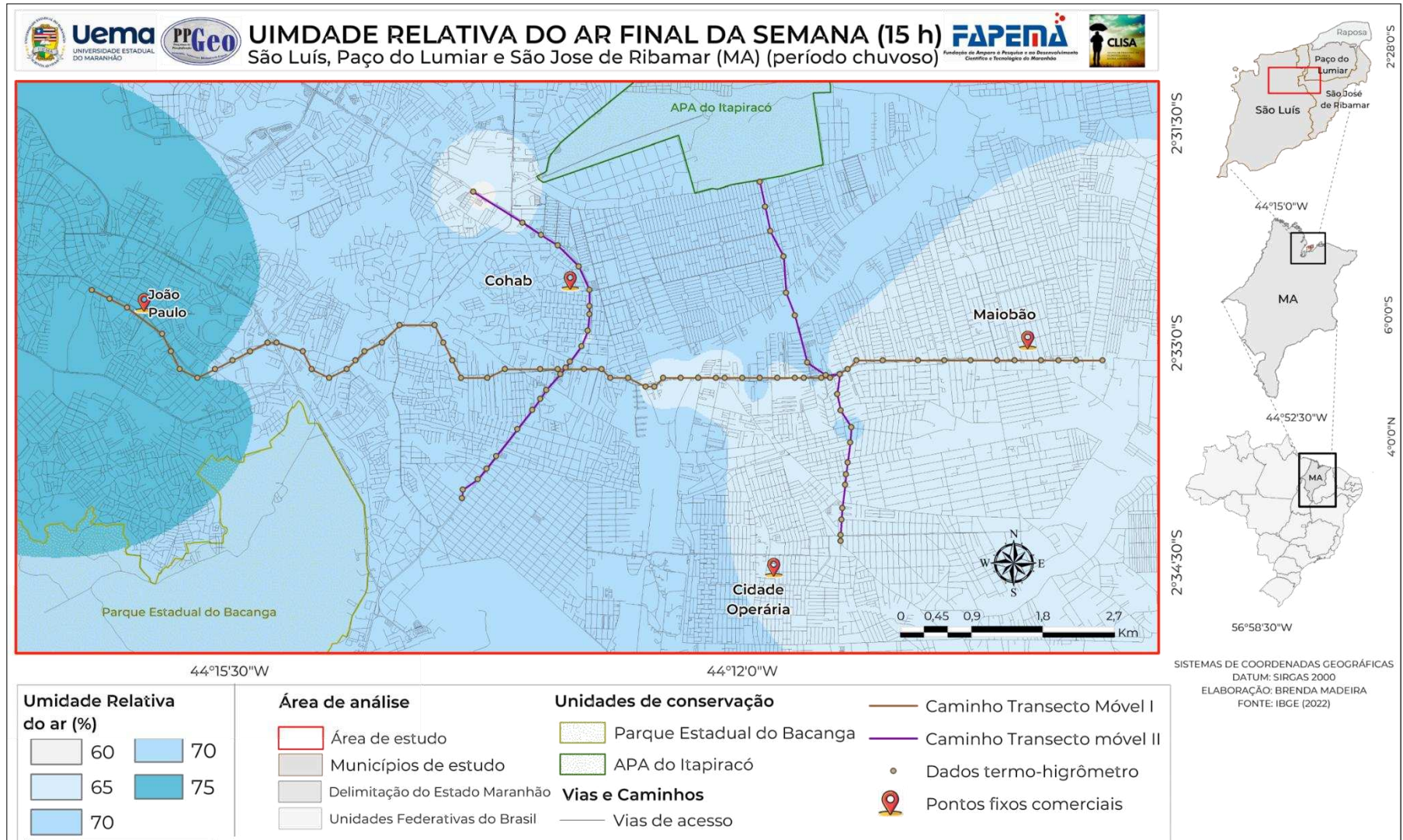
Os resultados indicam que as ilhas de calor urbanas não se limitam ao período seco, manifestando-se de forma recorrente ao longo do ano. Observou-se que a configuração das cidades, caracterizada pelo clima tropical úmido e pelos contrastes entre áreas vegetadas e setores altamente urbanizados, influencia o equilíbrio térmico e, por consequência, a sensação de conforto térmico.

Figura 39 - Temperatura do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (15 h) (período chuvoso)



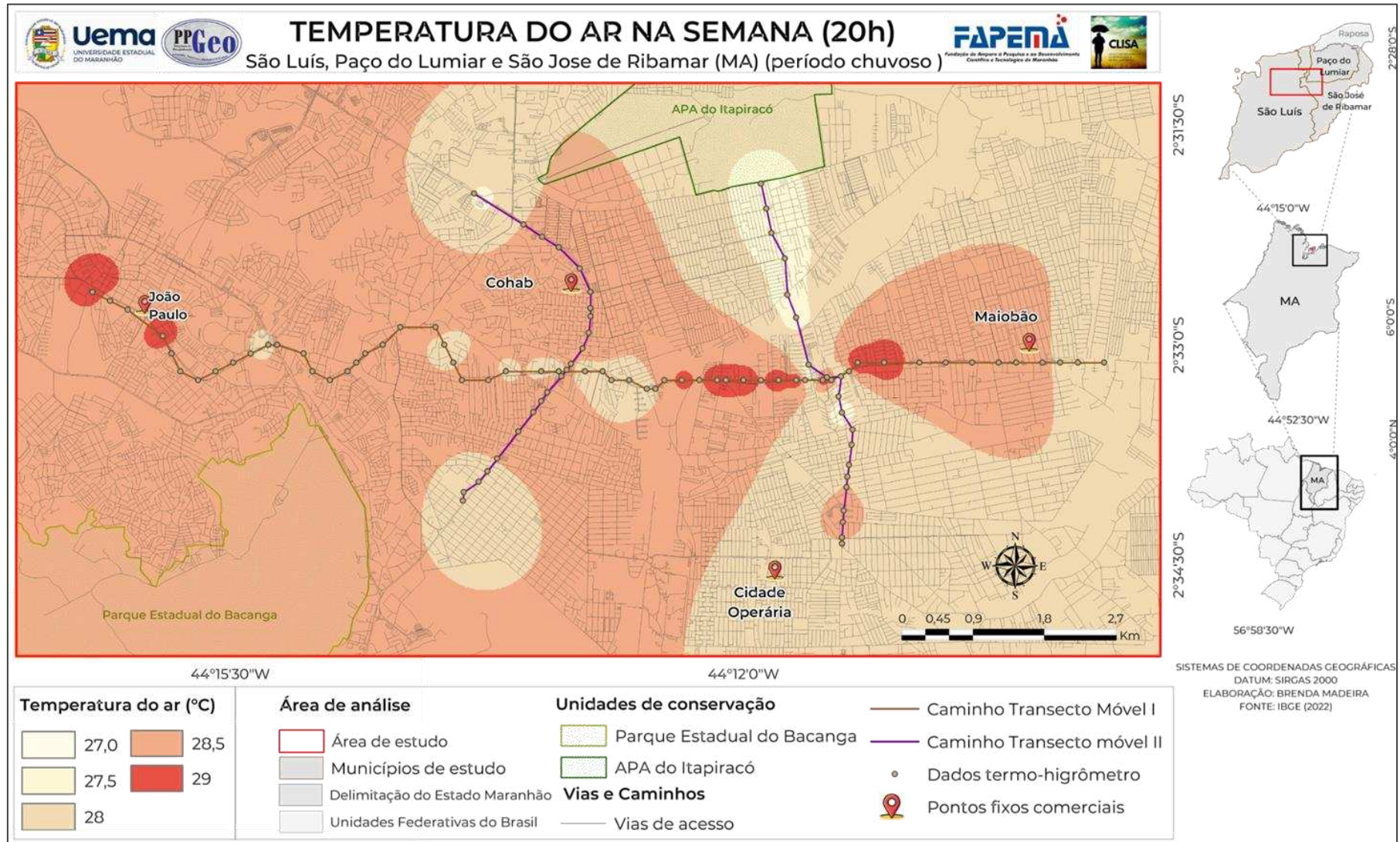
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 40 - Umidade relativa do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (15 h) (período chuvoso)



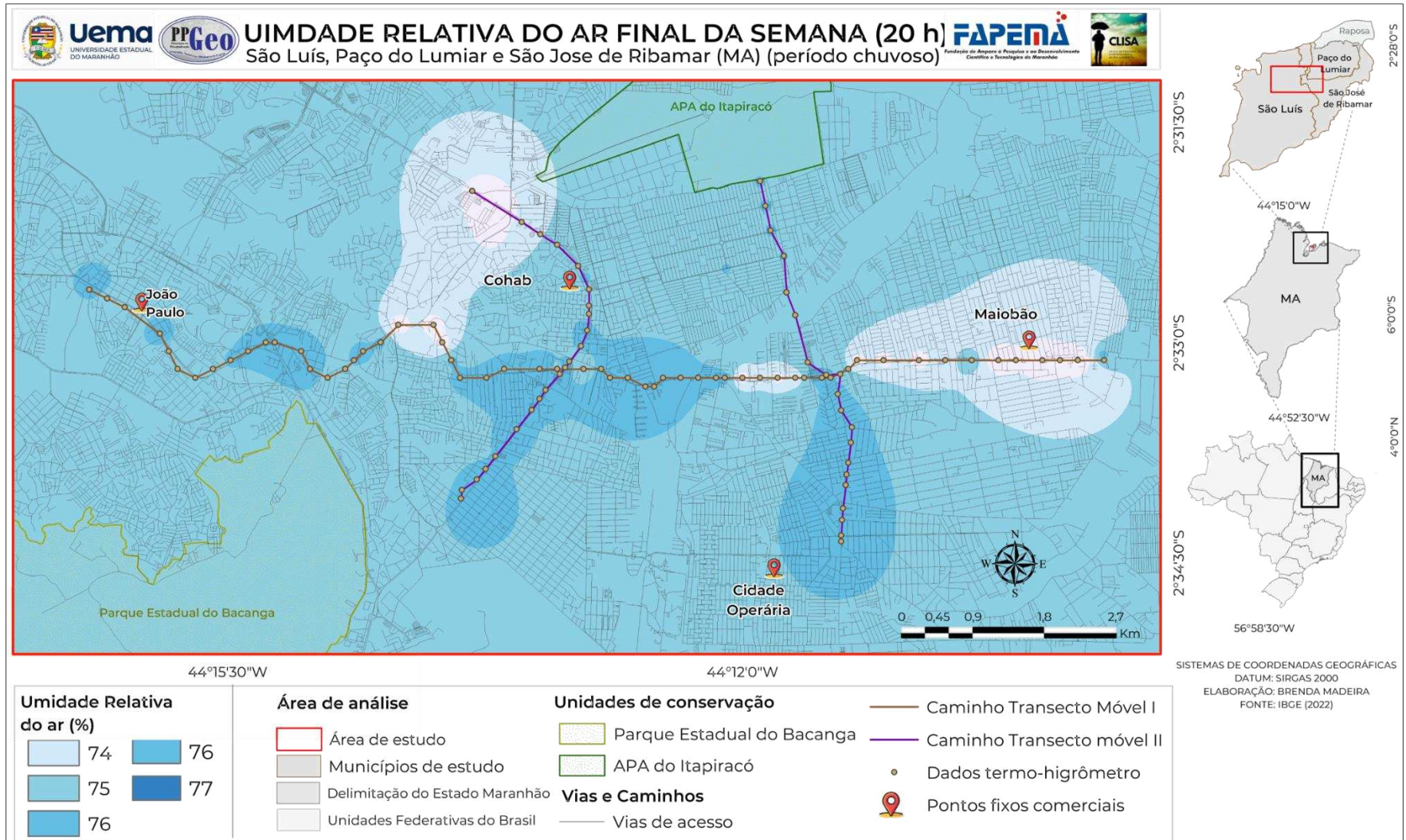
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 41 - Temperatura do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (20 h) (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 42 - Temperatura do ar final de semana no dia 17, mai. 2025 (20 h) (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.3.5 Análise comparativa das variações dos transectos entre dias úteis e finais de semana, e entre os períodos seco e chuvoso

Esta seção apresenta um panorama resumido e comparativo dos principais resultados obtidos. O objetivo é sintetizar as variações observadas entre os dias úteis e os finais de semana, bem como a amplitude alcançada entre os períodos seco e chuvoso, facilitando a interpretação dos padrões térmicos e de umidade identificados por meio do transecto móvel.

Conforme a Tabela 5, observa-se que, durante o período seco de 2024, não houve expressiva variação térmica nos dias da semana em relação aos finais de semana. Às 15h, a temperatura praticamente não oscilou, com a apresentação de um leve aumento de 0,08 °C; às 20h, o incremento foi de 0,53 °C. A umidade relativa do ar apresentou elevação de 8,6% às 15h e de apenas 0,76% às 20h.

Tabela 5 - Diferença das variações nos horários da semana e nos fins de semana (período seco 2024)

Média dos transectos e diferenças (período seco 2024)						
Dias e horários	15 h		Diferença:	20 h		Diferença:
	Na semana (18/10)	Final da semana (27/10)		Na semana (18/10)	Final da semana (27/10)	
Temperatura (° C)	31,48	31,56	Aumentou 0,08	27,30	27,82	Aumentou 0,53
Umidade Relativa (%)	52,40	61,0	Aumentou 8,6	69,23	69,99	Aumentou 0,76

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Já no período chuvoso de 2025, as diferenças entre os dias de semana e os finais de semana tornaram-se mais evidentes. Às 15h, a temperatura apresentou uma queda mais acentuada nos finais de semana, com redução de 1,81 °C, enquanto às 20h também se verificou uma diminuição de 0,71 °C. A umidade relativa registrou uma elevação de 10,86% às 15h e de 3,95% no período noturno (Tabela 6)

Tabela 6 - Diferença das variações nos horários da semana e nos fins de semana (período seco 2024)

Média dos transectos e diferenças (período chuvoso 2025)						
Dias e horários	15 h		Diferença:	20 h		Diferença:
	Na semana (10/04)	Final da semana (17/05)		Na semana (10/04)	Final da semana (17/05)	
Temperatura (° C)	32,17	30,36	Diminuiu 1,81	28,71	28	Diminuiu 0,71
Umidade Relativa (%)	55,68	66,55	Aumentou 10,86	71,38	75,35	Aumentou 3,97

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A comparação entre os períodos seco e chuvoso revela diferenças importantes nas condições microclimáticas. A temperatura média às 15h apresentou pouca variação entre os

dois períodos (-0,26 °C), mas às 20h foi registrada uma elevação de 0,71 °C no período chuvoso. A umidade relativa do ar foi consistentemente mais alta no período chuvoso, com aumentos de 5,11% às 15h e 3,75% às 20h (Tabela 7).

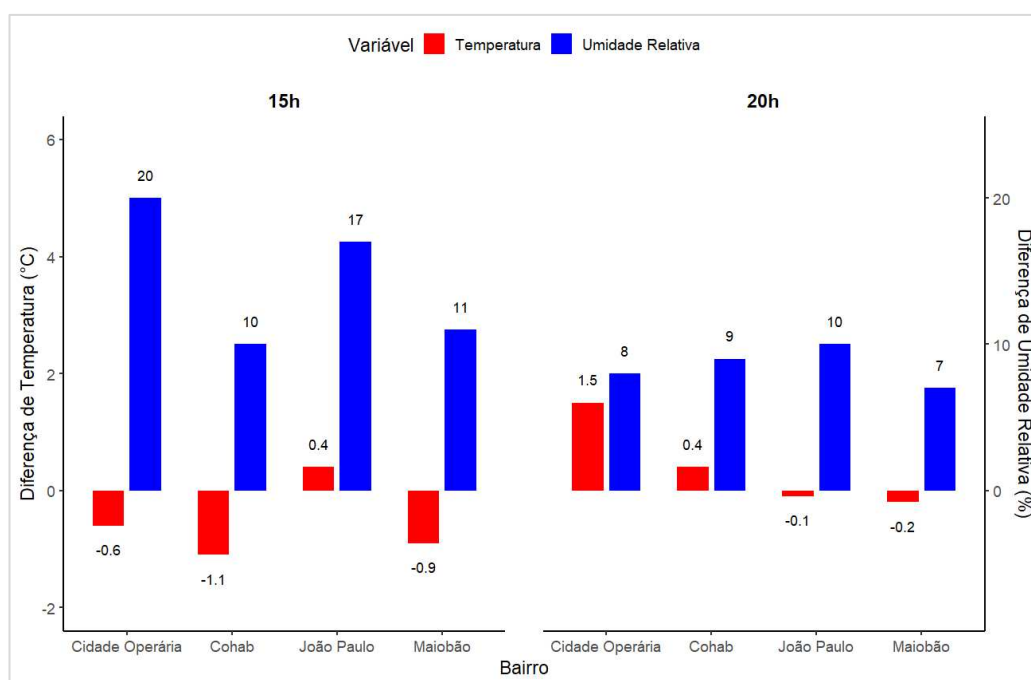
Tabela 7 - Comparação temperatura e umidade relativa do ar por período a partir da média dos transectos

Comparação por período a partir da média dos transectos						
Dias e horários	15 h		Diferença:	20 h		Diferença:
	seco	chuvoso		seco	chuvoso	
Temperatura (° C)	31,52	31,26	Diminuiu 0,26	27,56	28,35	Aumentou 0,79
Umidade Relativa (%)	56,7	61,11	Aumentou 5,11	69,61	73,36	Aumentou 3,75

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Os gráficos apresentados a seguir (Gráficos 9 e 10) foram elaborados a partir da sistematização dos dados exatos de cada ponto comercial na área estudada. Eles permitem uma avaliação mais precisa e detalhada das variações de temperatura e umidade relativa, considerando as condições específicas de cada setor comercial.

Gráfico 9 - Diferença entre a semana (18/10) e o fim o de semana (27/20) (período seco, 2024)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

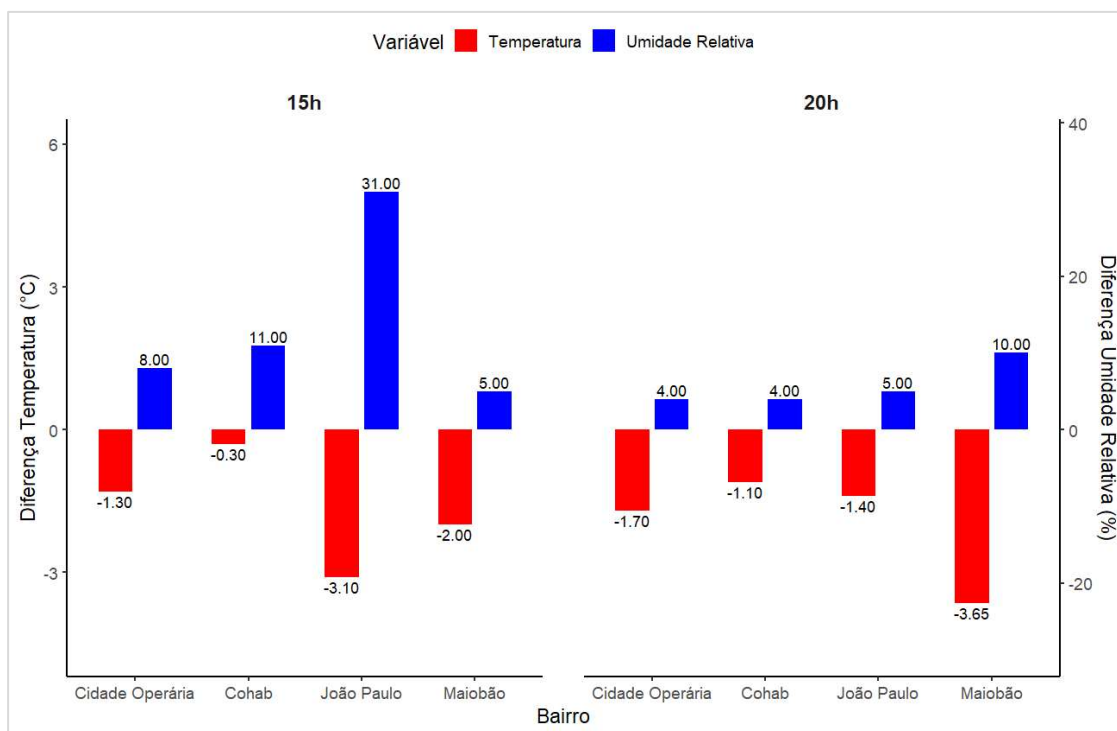
No período seco (Gráfico 9), observou-se uma leve redução de temperatura na maioria dos bairros durante os finais de semana, especialmente às 15h, com destaque para a Cohab (-1,1 °C) e o Maiobão (-0,9 °C). A exceção foi o bairro João Paulo, que apresentou discreto aumento (+0,4 °C). Às 20h, as variações térmicas foram ainda menores; no entanto, áreas como a Cidade Operária e a Cohab tiveram uma acentuação positiva na temperatura.

Já no período chuvoso (Gráfico 10), os contrastes entre semana e final de semana foram significativamente mais acentuados. Às 15h, todas as áreas comerciais apresentaram reduções

expressivas de temperatura nos finais de semana, com destaque para o João Paulo (-3,1 °C) e o Maiobão (-2,0 °C).

As variações de umidade relativa foram também marcantes, especialmente no João Paulo, que atingiu +31% de diferença. Durante a noite (20h), a tendência de resfriamento se manteve, com ocorrência mais intensa no Maiobão (-3,65 °C), acompanhada de um aumento de 10% na umidade, conforme apresenta o Gráfico 10.

Gráfico 10 - Diferença entre a semana (10/04) e o fim de semana (17/05) (período chuvoso, 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

É importante ressaltar que, nesta análise entre dias de semana e final de semana, a comparação só foi possível devido à estabilidade climática observada entre os períodos chuvoso e seco. Acrescido a isso, também foi possível porque a análise rítmica confirmou que as datas comparadas estavam sob a influência do mesmo sistema atmosférico, a ZCIT, na estação chuvosa, apresentando valores semelhantes de pressão atmosférica, insolação e velocidade dos ventos.

4.4 Análises estatísticas, conforme pontos fixos das áreas comerciais

Em uma escala mais detalhada, as variáveis de temperatura e umidade relativa foram monitoradas continuamente em pontos fixos, com registros horários ao longo dos meses de outubro e novembro de 2024 (período seco) e abril e maio de 2025 (período chuvoso). Esses dados, organizados em gráficos e tabelas, evidenciam a dinâmica térmica e higrométrica das áreas comerciais analisadas.

Para a avaliação do conforto térmico, foram utilizados dois índices: o Índice de Calor (*Heat Index*) e a Temperatura Efetiva (TE). Ambos integram temperatura e umidade, permitindo interpretar de forma mais precisa as condições térmicas reais experimentadas pela população ao longo do dia, o que amplia a compreensão dos diferentes níveis de desconforto presentes nos microclimas estudados.

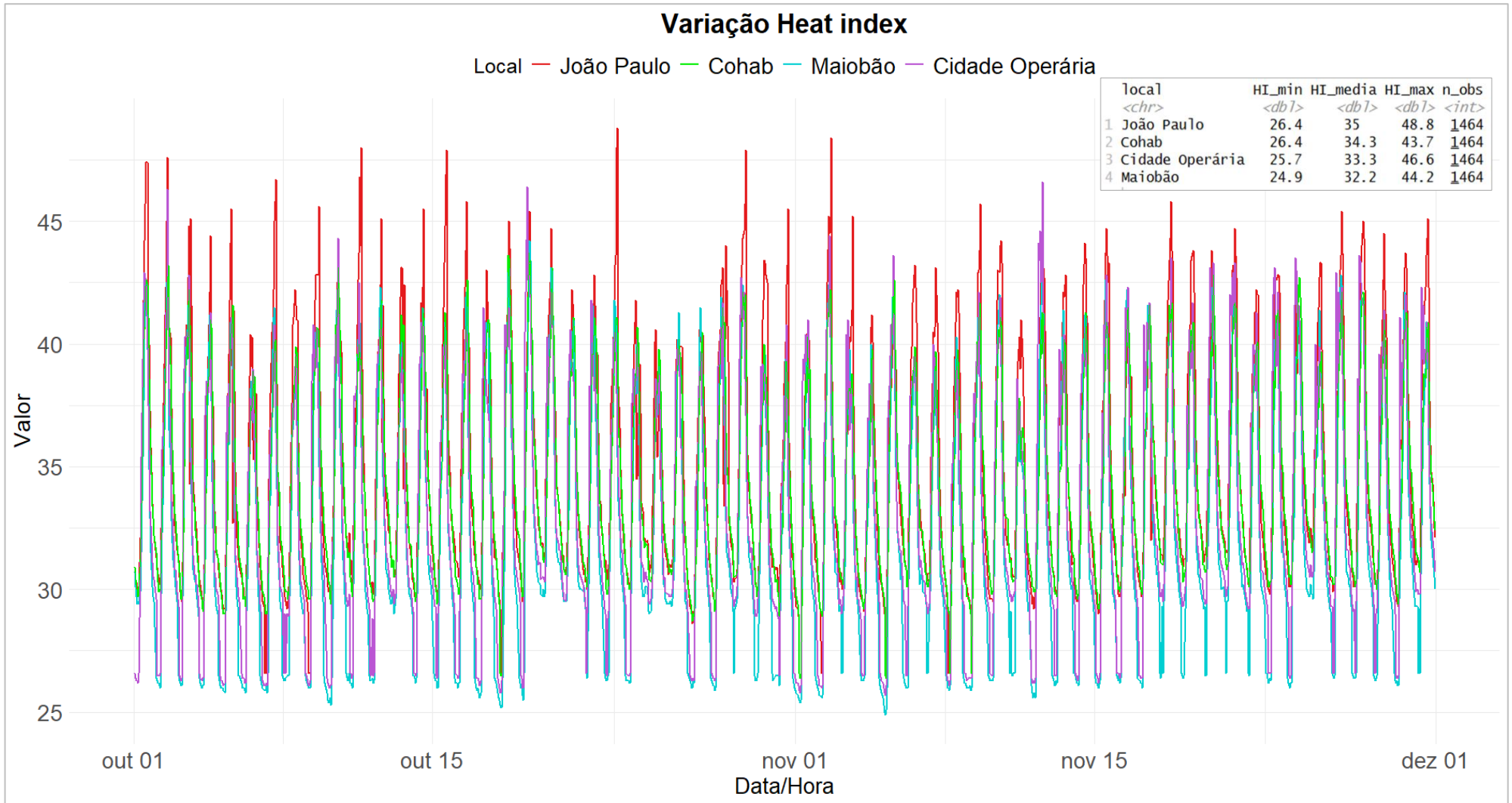
4.4.1 Conforto térmico por meio do *Heat Index* no período seco

A variação do *Heat Index* (HI) durante o período seco apresenta um padrão diário consistente, com valores mínimos durante a madrugada e máximos no período da tarde, alcançando picos acima de 48, o que, na escala de classificação, insere-se na categoria "Perigo" (Gráfico 11).

Ainda no gráfico 11, podem ser observados, complementarmente a esta análise, os valores mínimos, médios e máximos do *Heat Index* nas áreas comerciais do João Paulo, da Cohab, do Maiobão e da Cidade Operária.

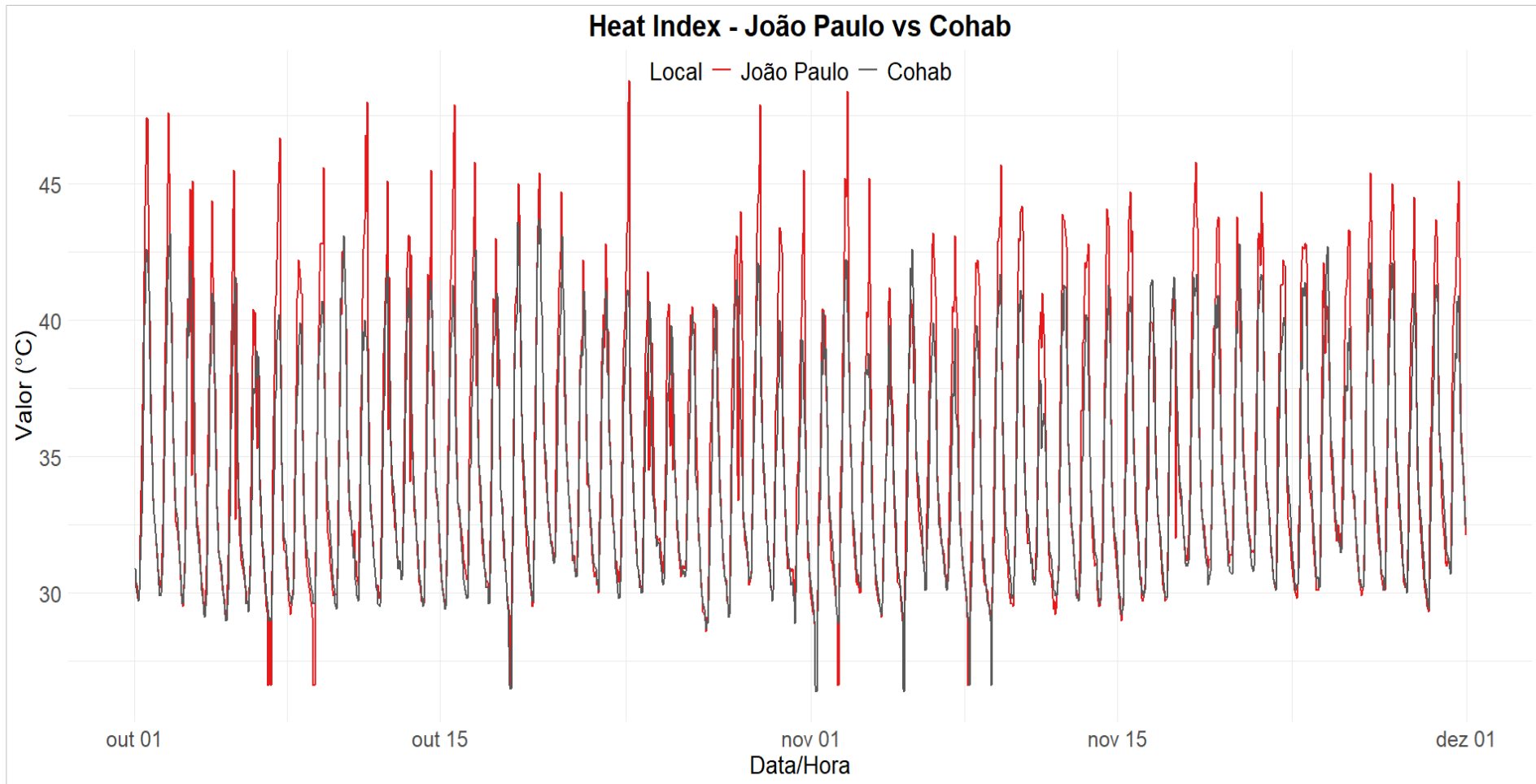
Já o Gráfico 12 destaca especificamente as áreas com maior e menor variação, sendo o Ponto 1 (João Paulo) o que apresenta os maiores valores e o Ponto 2 (Cohab) o de menor variação. Essa comparação evidencia padrões térmicos semelhantes entre as áreas, porém com ligeira predominância de maior desconforto térmico.

Gráfico 11 - Variação no Heat Index nos pontos comerciais de análise (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 12 - Variação máxima e mínima *Heat Index* (Período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise horária do *Heat Index* por meio de *boxplots*, apresentada no Gráfico 13, evidencia variações significativas entre as quatro áreas comerciais, revelando padrões distintos de aquecimento, picos térmicos e resfriamento ao longo do dia. Todos os bairros apresentam valores elevados, o que indica desconforto térmico recorrente, com a presença de valores extremos que reforçam a complexidade do ciclo diário nesses ambientes urbanos.

Durante a madrugada e o início da manhã (1h-6h), os valores do HI permanecem relativamente mais baixos; porém, já se observam diferenças entre os bairros do João Paulo e da Cohab, que apresentaram as maiores medianas, indicando maior retenção de energia térmica e resfriamento mais lento durante a noite. O Maiobão registrou os menores valores, enquanto a Cidade Operária ocupa uma posição intermediária, com valores superiores aos do Maiobão, mas inferiores aos do João Paulo e da Cohab (Gráfico 13).

Com o início do aquecimento solar, entre 7h e 9h, ocorre um aumento generalizado do *Heat Index* em todos os bairros. Nesse intervalo, as diferenças espaciais se reorganizam: a Cidade Operária passa a apresentar medianas ligeiramente superiores às do João Paulo, indicando um aquecimento matinal mais rápido. A Cohab acompanha a tendência de elevação, mantendo-se próxima aos valores do João Paulo, enquanto o Maiobão, embora também aqueça, permanece como o bairro menos quente, com crescimento térmico mais gradual (Gráfico 13).

Entre as 9h e 11h, o aquecimento torna-se mais intenso. A Cidade Operária mantém valores relativamente elevados, permanecendo momentaneamente acima ou muito próxima aos do João Paulo, o que reforça o seu comportamento de resposta térmica inicial mais rápida. Entretanto, observa-se que esse crescimento começa a perder intensidade na Cidade Operária; em contraste, o João Paulo apresenta elevação contínua, sinalizando maior capacidade de acumulação de energia térmica. A Cohab mantém valores intermediários-altos, enquanto o Maiobão continua a apresentar os menores índices (Gráfico 13).

Entre o final da manhã e o início da tarde (12h-14h), ocorre a transição para o pico térmico diário. Nesse intervalo, o João Paulo iguala e ultrapassa a Cidade Operária, passando a registrar as maiores medianas e os valores máximos de HI. A Cidade Operária, por sua vez, apresenta crescimento mais moderado, não atingindo patamares tão elevados quanto os do João Paulo. A Cohab acompanha a elevação, porém com intensidade menor, enquanto o Maiobão, embora atinja seus maiores valores do dia, permanece como o bairro menos afetado (Gráfico 13).

O pico térmico (14h-16h) concentra os maiores valores do HI e a maior variabilidade dos dados, com amplitudes interquartis mais largas e um maior número de *outliers*. O João

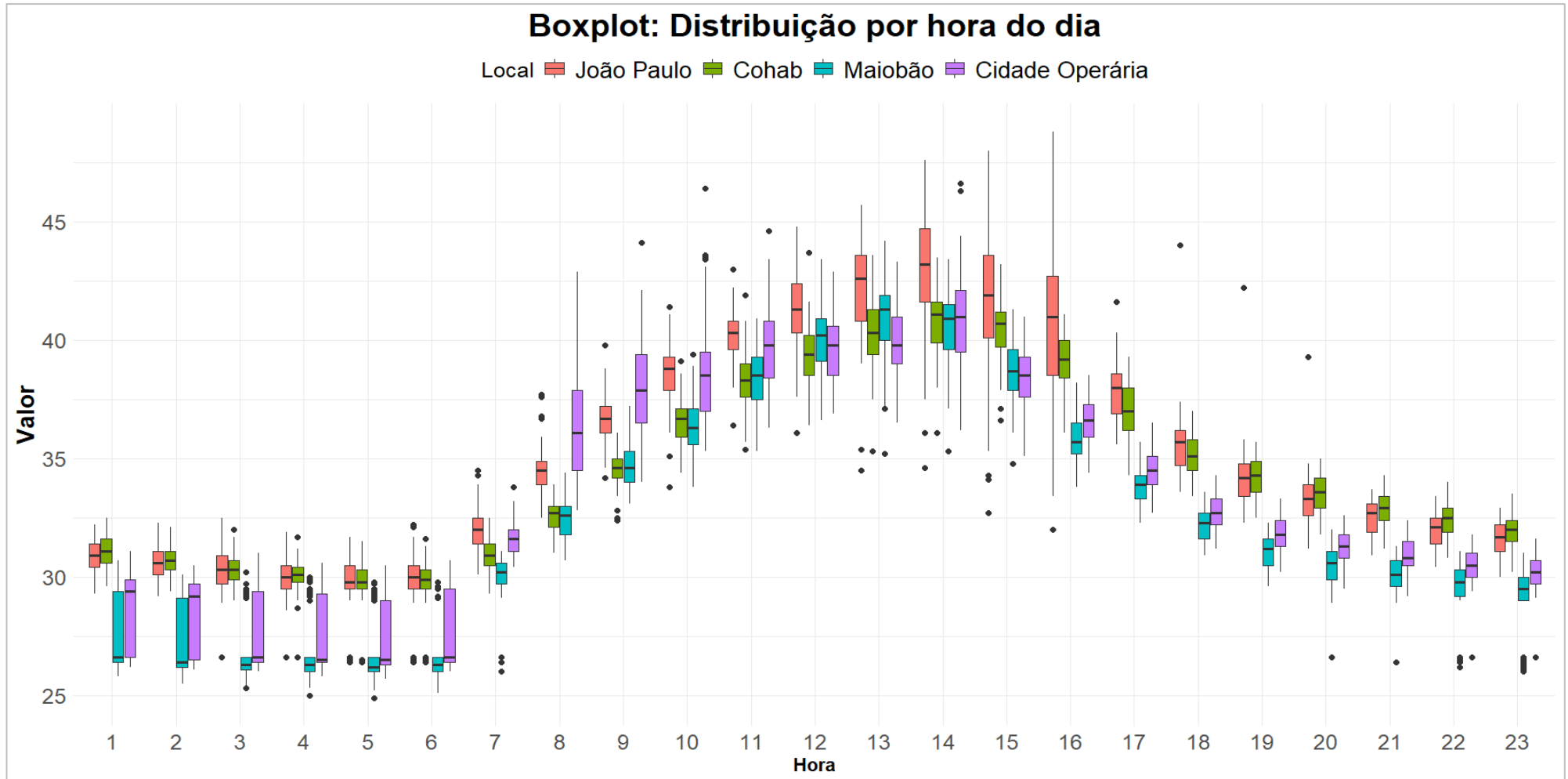
Paulo destaca-se como o setor mais crítico, apresentando os valores mais altos e a maior dispersão, o que indica forte desconforto térmico e instabilidade das condições atmosféricas locais. A Cohab mantém valores elevados, porém inferiores aos do João Paulo. A Cidade Operária ocupa uma posição intermediária, com picos menos extremos, enquanto o Maiobão apresenta os menores valores (Gráfico 13).

Entre as 17h e 19h, observa-se uma queda progressiva do HI em todos os bairros, marcando o início do resfriamento noturno. Contudo, esse processo ocorre de forma desigual: o João Paulo e a Cohab apresentam um resfriamento mais lento, mantendo valores elevados por mais tempo, o que indica uma maior inércia térmica nesses setores (Gráfico 13).

No período noturno (20h-23h), os valores do HI tendem a se estabilizar em níveis mais baixos, aproximando-se das condições observadas na madrugada. Ainda assim, persistem diferenças importantes: o João Paulo e a Cohab continuam a apresentar os maiores valores residuais, o que evidencia uma maior retenção de energia térmica ao longo do dia, enquanto o Maiobão registra os menores índices. Quanto à Cidade Operária, nota-se que esta permanece em posição intermediária (Gráfico 13).

De forma sintética, no período seco, o João Paulo é o bairro que mais aquece e que mais lentamente resfria, configurando-se como o ambiente termicamente mais crítico ao longo do dia. A Cohab apresenta comportamento semelhante, embora menos extremo. A Cidade Operária aquece rapidamente pela manhã, mas não atinge os maiores picos térmicos. Já o Maiobão destaca-se pelo aquecimento mais lento, menores picos e resfriamento mais rápido em relação às demais áreas comerciais analisadas (Gráfico 13).

Gráfico 13 - Boxplot Heat Index dos quatro pontos comerciais (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O Gráfico 14 apresenta a variação horária do *Heat index*, classificado segundo a NOAA, para os meses de outubro e novembro de 2024 nos diferentes pontos analisados. Observa-se a predominância das classes “Perigo” e “Cuidado necessário” em todos os locais, indicando condições térmicas frequentemente desfavoráveis ao conforto humano.

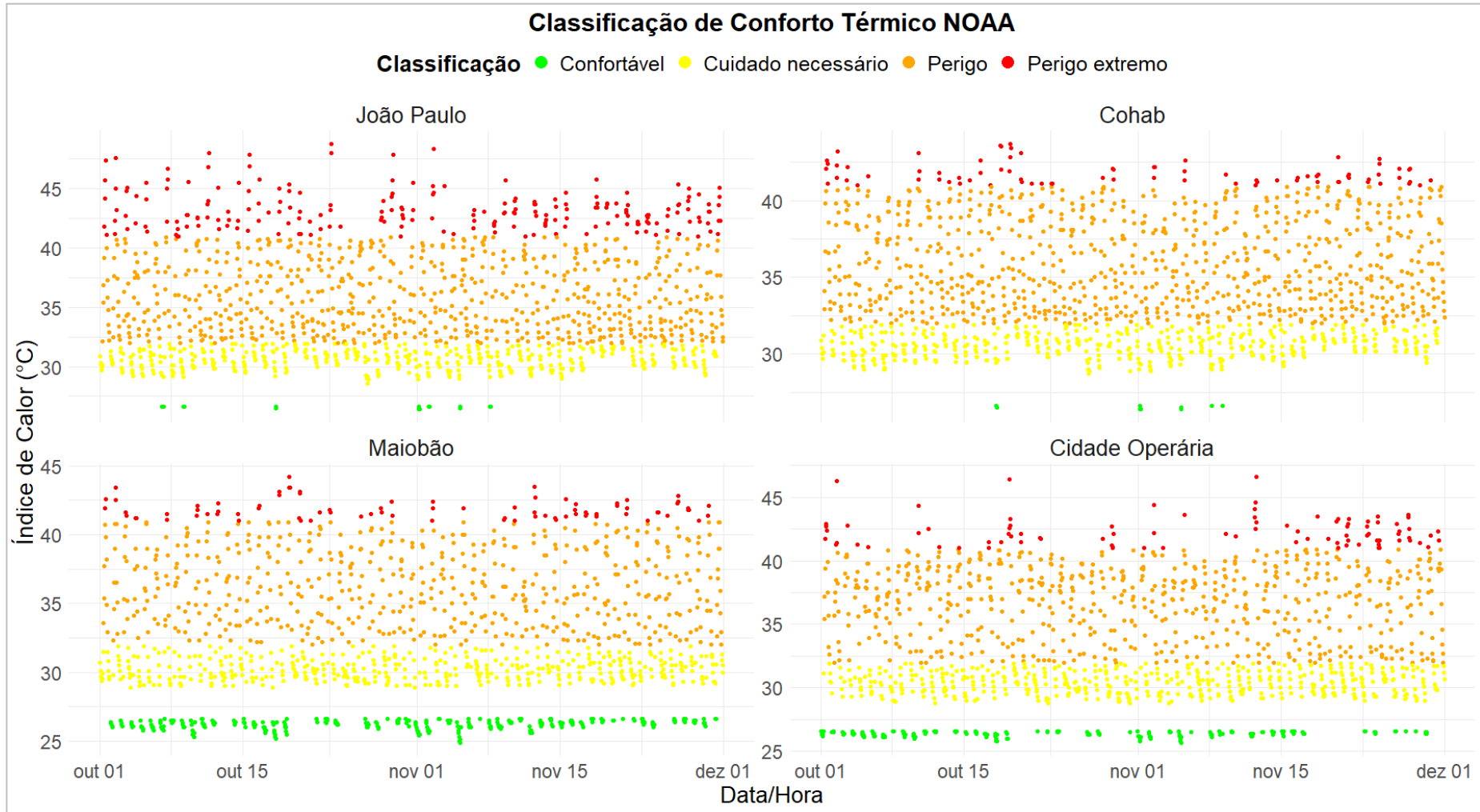
O ponto João Paulo destaca-se pela maior ocorrência da classe "Perigo extremo", associada aos valores mais elevados do Índice de Calor. Em contraste, o Maiobão apresentou maior frequência da classe "Cuidado", evidenciando condições térmicas mais amenas ao longo do período analisado. Nos pontos Cohab e Cidade Operária, predomina a classe "Perigo", com baixa participação da faixa de conforto, o que caracteriza uma condição intermediária de desconforto térmico.

No Gráfico 15, é observável a frequência mensal dos registros horários de conforto térmico, agregados por classe e local. As barras empilhadas representam o total de horas enquadradas em cada classe, aproximando-se do número total de horas mensais (aproximadamente 744 horas em outubro e 720 horas em novembro).

Nesse enquadre, vê-se novamente a predominância das classes “Perigo” e “Cuidado necessário” na maioria das áreas. A classe “Confortável” apresentou menor participação relativa, com destaque para o Maiobão, que concentrou o maior número de horas nessa faixa, indicando condições ambientais mais favoráveis (Gráfico 15). Já o João Paulo registrou a maior ocorrência de “Perigo extremo”, com aproximadamente 100 horas, o que sugere uma maior exposição ao estresse térmico, possivelmente associada ao maior adensamento urbano e à menor presença de áreas vegetadas (Gráfico 15).

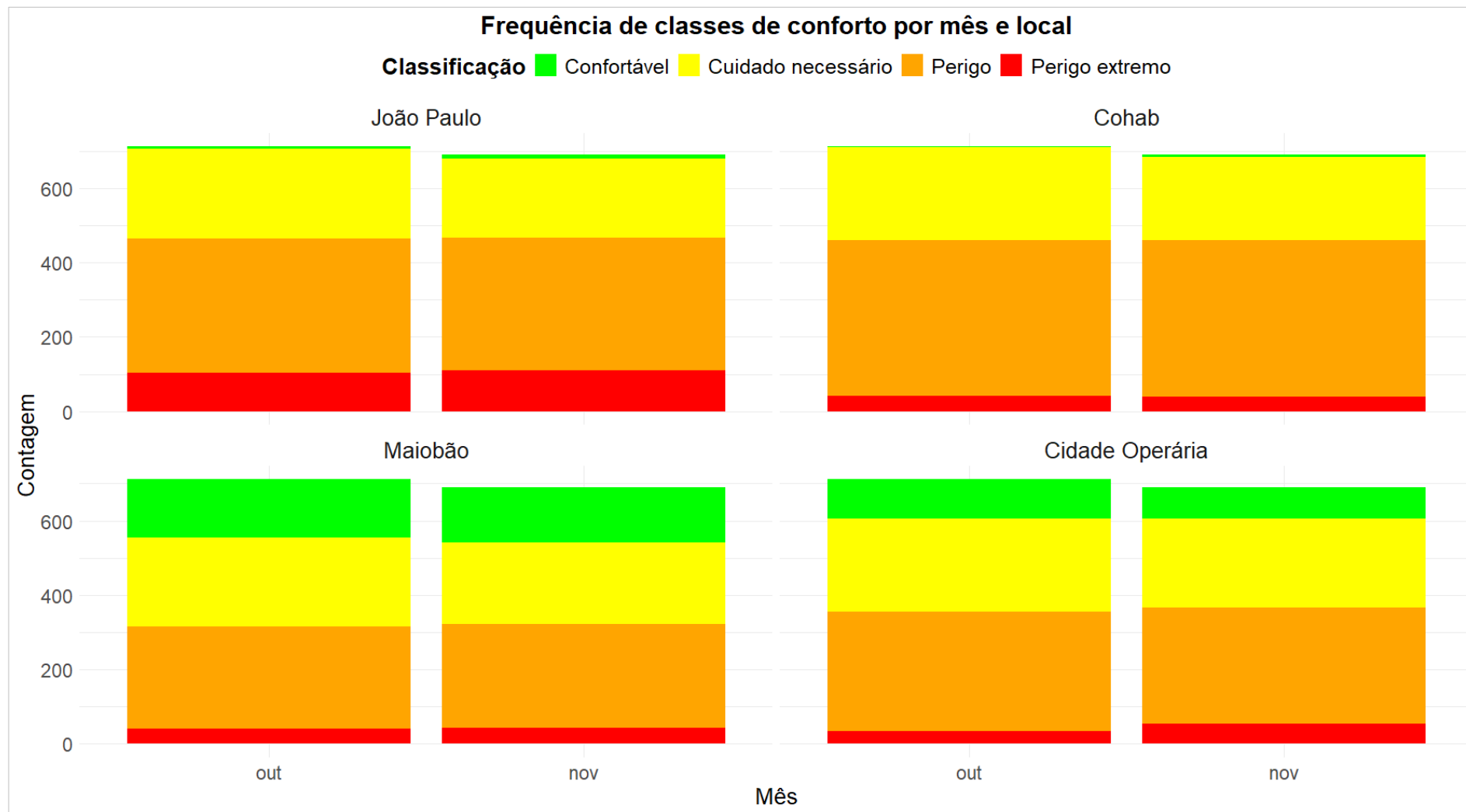
Concomitantemente, a Cohab e a Cidade Operária apresentaram uma distribuição intermediária das classes, com predomínio de condições térmicas desfavoráveis ao conforto humano (Gráfico 15).

Gráfico 14 - Variação do desconforto térmico em pontos comerciais com base na escala NOAA (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 15 - Frequência de classes de desconforto térmico por ponto comercial (período seco)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4.4.2 Conforto térmico por meio do *Heat Index* no período chuvoso

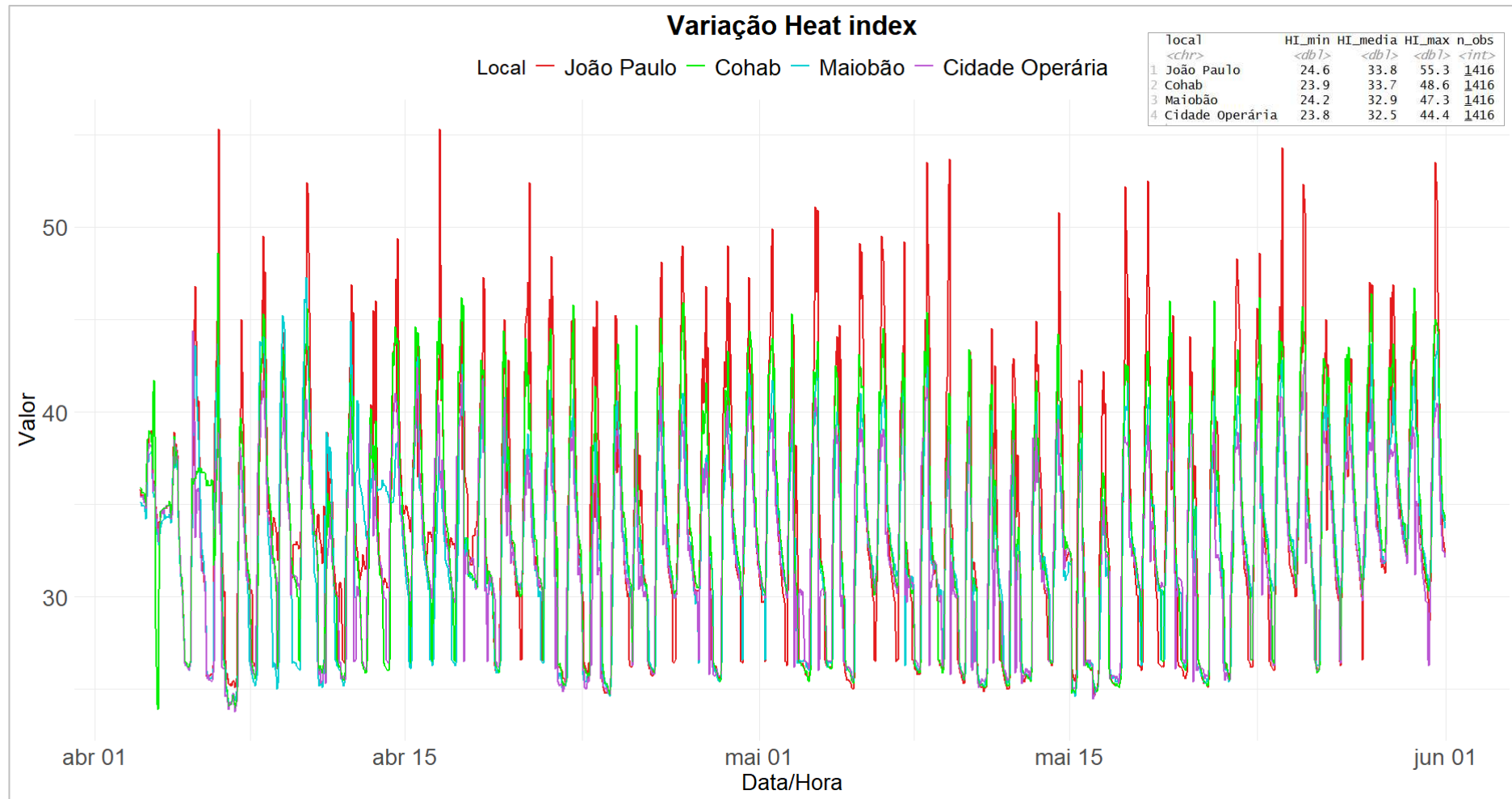
Durante o período chuvoso, o *Heat Index* apresenta um comportamento marcado por um padrão diário bem definido, caracterizado pela elevação progressiva ao longo do dia e pela redução nos períodos noturnos.

Conforme observado no Gráfico 16, embora haja um padrão de elevação progressiva, os picos atingem valores elevados, superando 55 °C em alguns episódios. Isso indica situações de desconforto térmico severo, mesmo em um período tradicionalmente associado à ocorrência de chuvas.

Ainda no Gráfico 16, observa-se que os valores mínimos se mantêm relativamente próximos entre os pontos analisados; contudo, os valores médios e, sobretudo, os máximos revelam diferenças espaciais significativas, que indicam distintos níveis de exposição ao desconforto térmico entre as áreas estudadas.

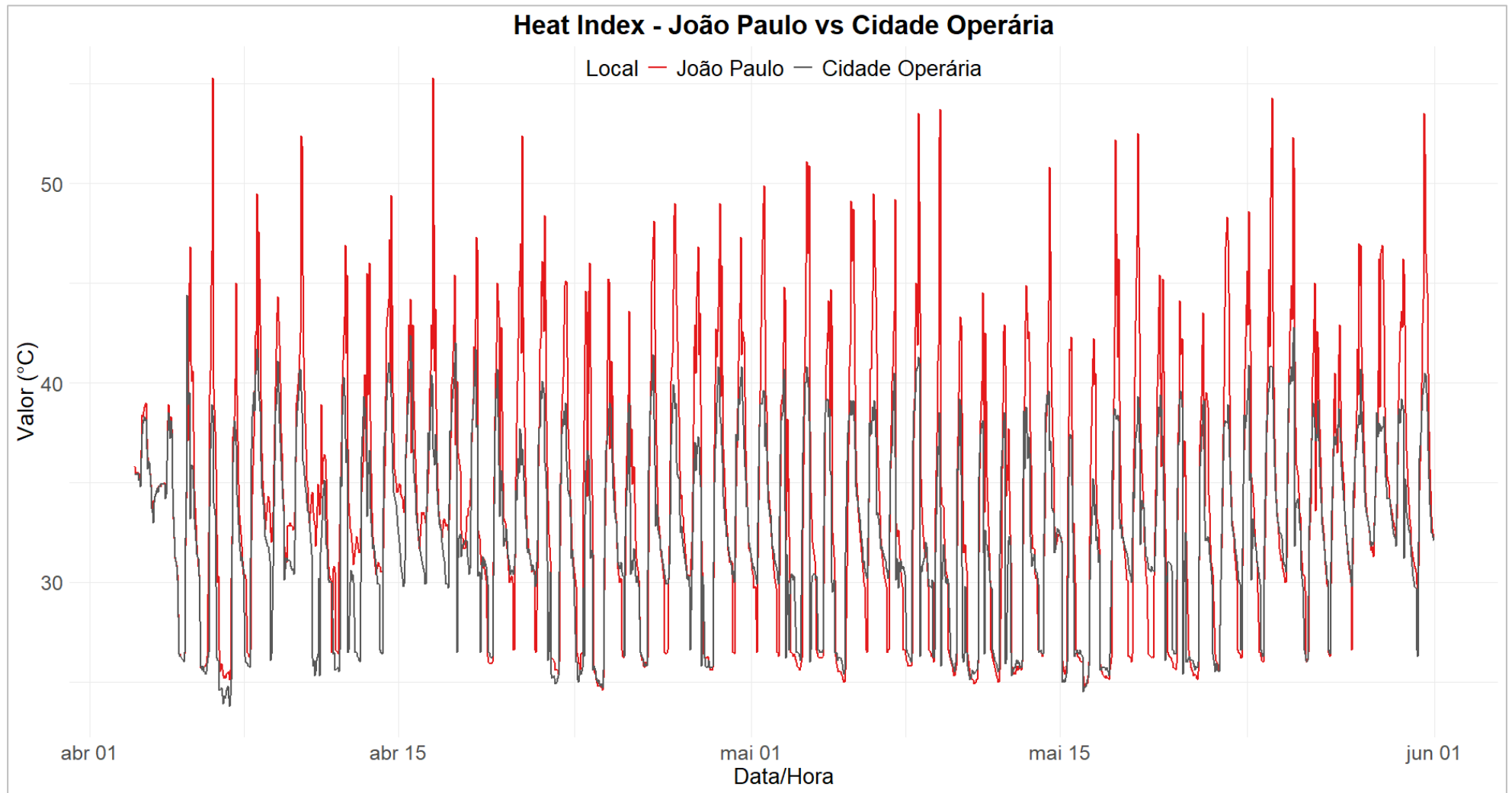
A comparação entre as áreas com variação mínima e máxima do HI mostra que, no período chuvoso, o Ponto 1 (João Paulo) permanece com os maiores índices, enquanto o Ponto 2 (Cidade Operária) apresenta uma variação inferior (Gráfico 17).

Gráfico 16 - Heat Index nos pontos comerciais de análise (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 17 - Variação máxima e mínima no Heat Index (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A análise do *Heat Index* por meio de *boxplots* nos quatro pontos comerciais revelou dados fundamentais para a compreensão do conforto térmico desses ambientes no período chuvoso, conforme vê-se a seguir.

O HI apresentou menor variação entre os pontos monitorados, o que indica uma maior homogeneidade espacial ao longo do dia. No entanto, a escala dos valores permaneceu elevada, evidenciando que o desconforto térmico continua sendo uma condição recorrente, mesmo sob a influência das chuvas (Gráfico 18).

Durante a madrugada (1h-6h), os valores mantiveram-se relativamente estáveis e próximos entre os bairros. Ao longo da manhã (7h-11h), o aquecimento ocorre de forma gradual e bastante semelhante em todos os locais, com contrastes superiores no João Paulo e na Cohab, embora as diferenças espaciais sejam pouco expressivas (Gráfico 18).

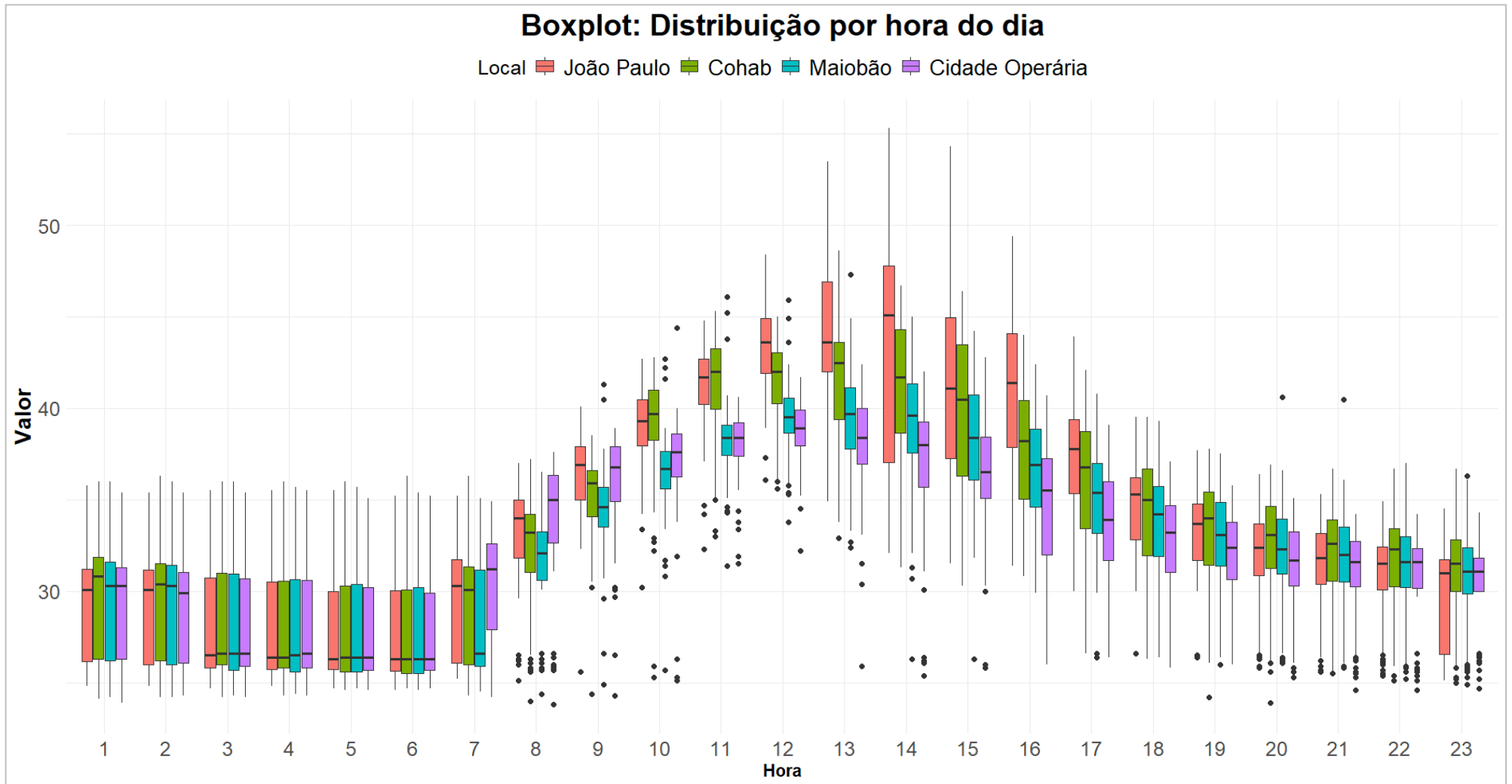
O pico de aquecimento (12h-16h) concentra os maiores valores do HI, mantendo a escala elevada em todos os pontos. O João Paulo apresenta as maiores medianas e a maior dispersão de dados, seguido pela Cohab, enquanto a Cidade Operária e o Maiobão apresentam valores ligeiramente inferiores (Gráfico 18).

No anoitecer (17h-23h), observa-se uma redução progressiva do HI, com comportamento semelhante entre os bairros. Apesar do resfriamento, o João Paulo e a Cohab mantêm valores mais elevados, o que indica um resfriamento mais lento, enquanto o Maiobão apresenta condições relativamente mais amenas e a Cidade Operária permanece em nível intermediário (Gráfico 18).

Essa análise permite observar que, no período chuvoso, os diferentes bairros passam a responder de forma mais semelhante às condições atmosféricas, reduzindo os contrastes espaciais de aquecimento e resfriamento. Isso sugere que os mecanismos locais de retenção de energia térmica (como a impermeabilização) tornam-se relativamente menos dominantes quando comparados à forte influência das condições meteorológicas regionais, especialmente a elevada umidade, a nebulosidade e a ocorrência de precipitação (Gráfico 18).

Destaca-se ainda que, apesar dessa maior homogeneidade, o HI permanece elevado, conforme demonstrado nos Gráficos 19 e 20 a seguir.

Gráfico 18 - Variação máxima e mínima do Heat Index (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

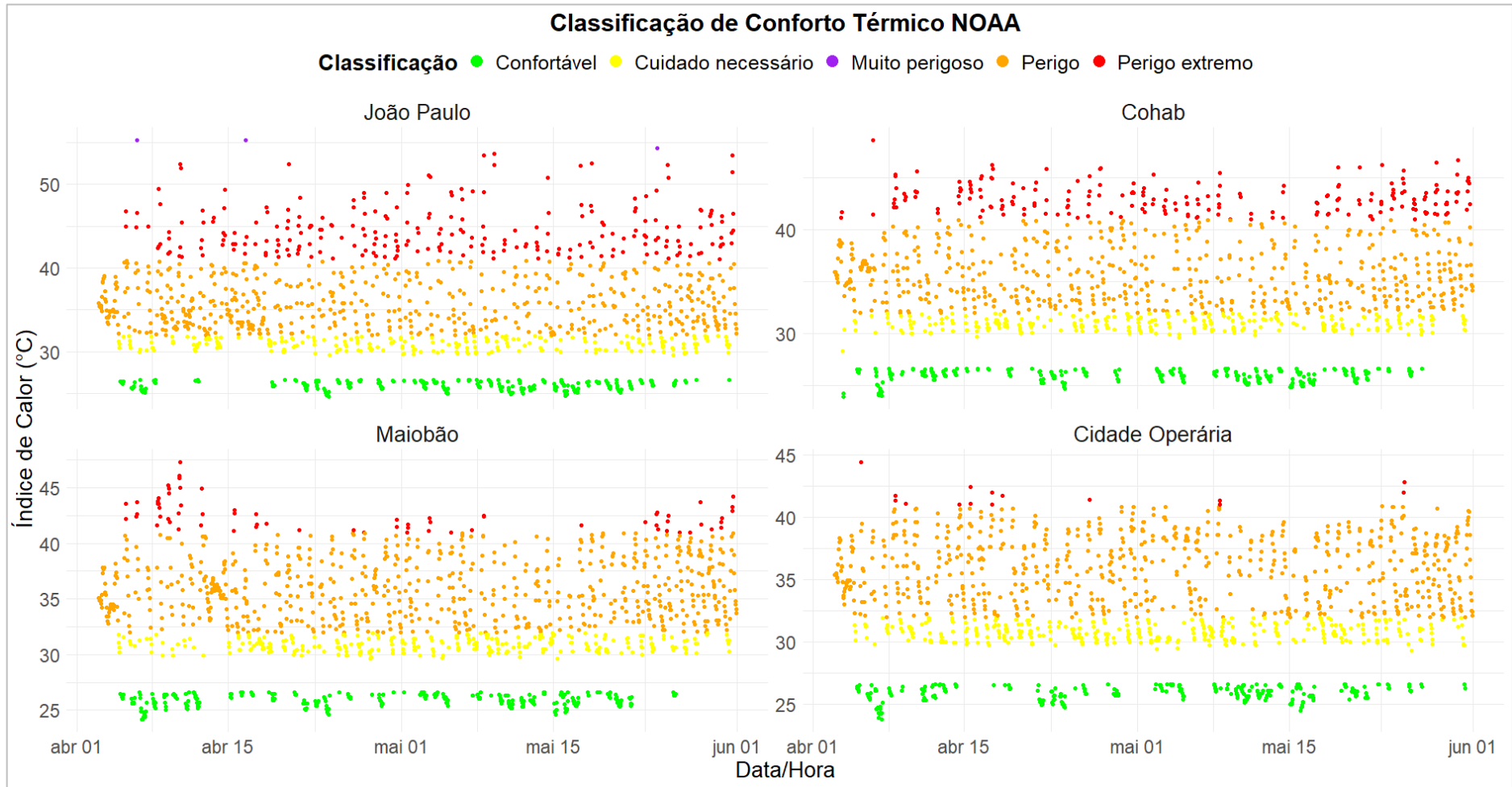
A variação do desconforto térmico em pontos comerciais, com base na escala da NOAA, evidencia um aumento na frequência da categoria “Confortável”. No período seco, a condição “Confortável” se apresentou nitidamente no Maiobão e na Cidade Operária (Gráfico 14); já no período chuvoso, ela ficou nítida nos quatro bairros (Gráfico 19). No entanto, essa condição não elimina a ocorrência do desconforto térmico, uma vez que, no mesmo período, foram registrados episódios classificados como “Perigo” e “Muito perigo” em alguns pontos (Gráfico 19).

Desse modo, é possível observar que, desde o período seco, o bairro João Paulo vem apresentando os maiores níveis de desconforto térmico entre os pontos analisados. No período chuvoso, esse comportamento se confirma mais uma vez, mantendo-se como a área mais crítica; conforme o Gráfico 19, observa-se que, na área comercial desse bairro, foram registrados episódios classificados como “Muito perigoso”, ocorrendo em três momentos distintos no mês de abril de 2025.

Embora pontuais, esses registros indicam que o bairro atingiu a faixa mais elevada da escala NOAA, associada a condições potencialmente graves para a saúde humana, como o maior risco de exaustão térmica, insolação e agravamento de doenças cardiovasculares (Gráfico 19).

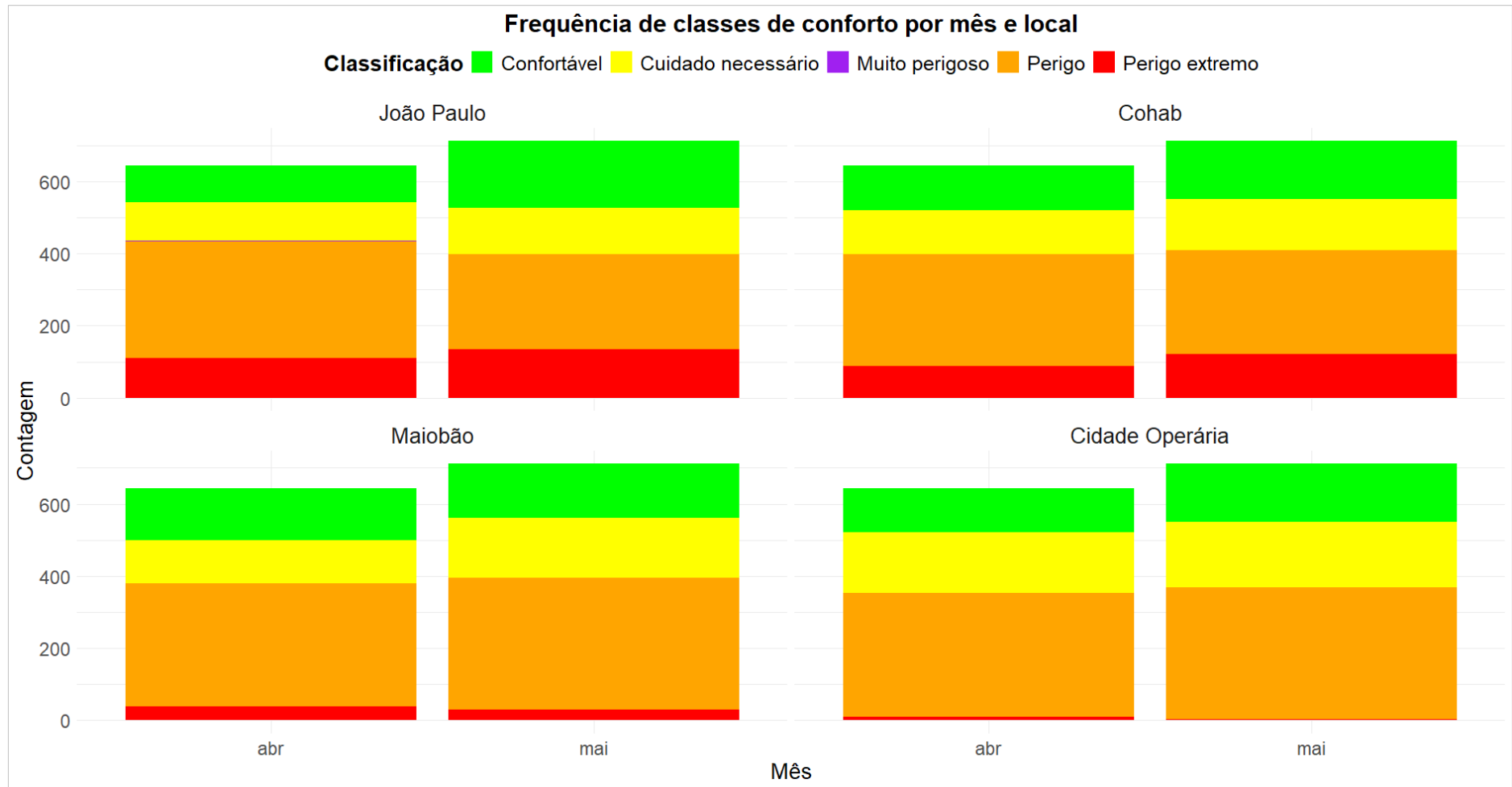
O Gráfico 20, referente à frequência mensal dos registros horários de conforto térmico, reforça os padrões observados anteriormente, evidenciando um aumento expressivo das horas classificadas como “Confortável” em todos os bairros. No entanto, apesar dessa melhora relativa, a classe “Perigo” permanece com frequência elevada em todos os pontos, sendo mais pronunciada no João Paulo e na Cohab, enquanto a classe “Muito perigoso” apresenta ocorrência residual, restrita a poucas horas e concentrada especificamente no bairro João Paulo (Gráfico 20).

Gráfico 19 - Variação do desconforto térmico em pontos comerciais, com base na escala NOAA (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 20 - Frequência de classes de desconforto térmico por ponto comercial (período chuvoso)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

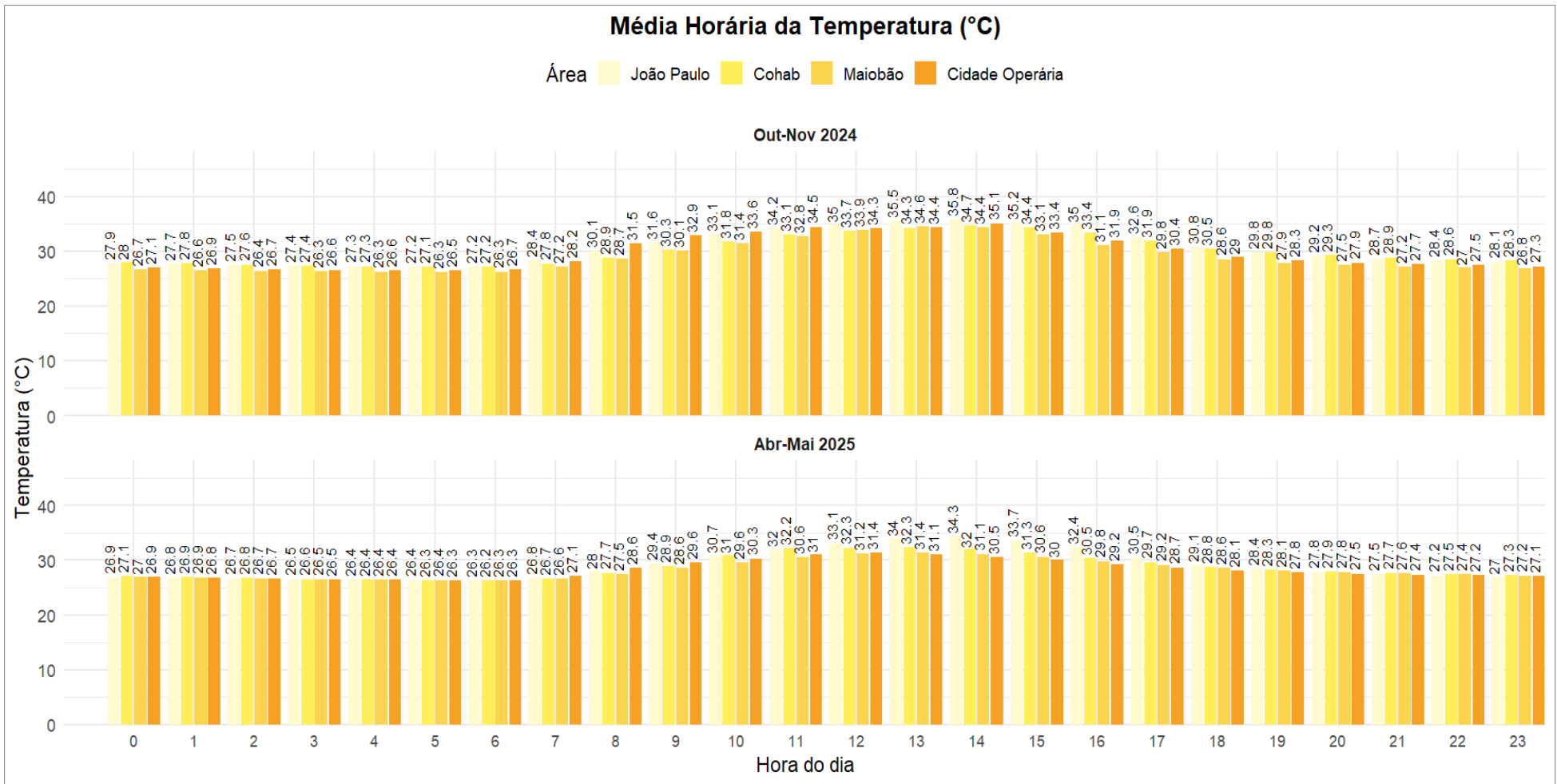
4.4.3 Conforto térmico por meio do Índice de Temperatura Efetiva (TE)

Antes da classificação do nível de conforto térmico, são demonstradas, nos Gráficos 21 e 22, as médias horárias da temperatura e da umidade relativa do ar obtidas pela metodologia de pontos fixos, a fim de ilustrar os cálculos do Índice de Temperatura Efetiva (TE).

No Gráfico 21, verifica-se que, nos dois períodos analisados, as temperaturas mantêm um padrão diário coerente com o clima quente da região, iniciando as madrugadas em torno de 27 °C e alcançando valores médios entre 33 °C e 35 °C nos horários de maior aquecimento, com pequenas variações entre as áreas estudadas.

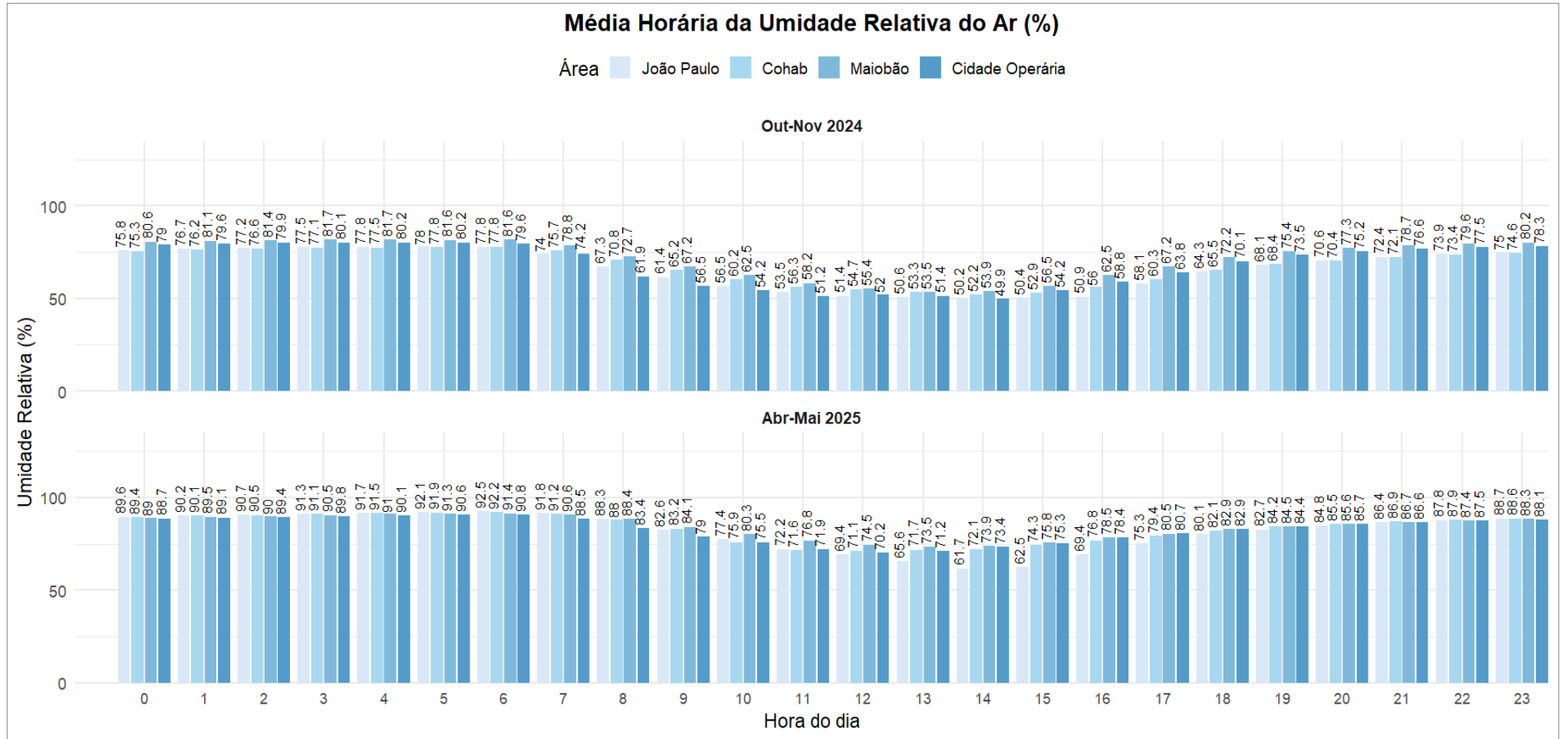
De modo complementar, no Gráfico 22, observa-se uma variação expressiva ao longo do dia, com valores que se mantêm elevados nas primeiras horas da manhã, em torno de 85% a 90%, e reduzem-se para faixas entre 50% e 65% nos períodos de maior aquecimento.

Gráfico 21 - Média da temperatura horária nas áreas comerciais da Ilha do Maranhão - MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 22 - Média da umidade relativa do ar nas áreas comerciais da Ilha do Maranhão - MA







Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Durante o período seco (Tabela 8), observa-se um padrão de desconforto em todos os ambientes comerciais em horários específicos do dia, o que vai ao encontro dos registros encontrados anteriormente pelo *Heat Index*.

No período seco, pelo índice de Temperatura Efetiva (TE), a partir das 8h, todos os pontos passam a demonstrar níveis de desconforto térmico considerável, alcançando faixas de forte desconforto entre 12h e 16h, especialmente no bairro João Paulo, onde os valores ultrapassam 32 °C em diversos horários (Tabela 8).

Tabela 8 - Classes de conforto térmico no período seco (out. e nov. de 2024)

Conforto térmico nas áreas comerciais durante o período seco na Ilha do Maranhão - MA					
Hora	João Paulo (Ponto 1)	Cohab (Ponto 2)	Maiobão (Ponto 3)	Cidade Operária (Ponto 4)	INMET-A203 (APA Itapiracó)
00:00h	26,9	27	25,9	26,2	25,7
01:00h	26,7	26,8	25,8	26,1	25,5
02:00h	26,6	26,6	25,7	25,9	25,4
03:00h	26,5	26,5	25,6	25,8	25,3
04:00h	26,3	26,3	25,6	25,8	25,2
05:00h	26,3	26,2	25,5	25,7	25,1
06:00h	26,3	26,3	25,6	25,9	24,9
07:00h	27,3	26,8	26,3	27,1	24,9
08:00h	28,5	27,6	27,5	29,6	24,8
09:00h	29,7	28,7	28,6	30,7	24,7
10:00h	30,8	29,8	29,6	31,1	24,8
11:00h	31,7	30,8	30,6	31,8	25,3
12:00h	32,2	31,3	31,5	31,6	26
13:00h	32,7	31,7	32	31,7	26,7
14:00h	32,9	32	31,8	32,3	27,4
15:00h	32,3	31,8	30,9	30,9	28,1
16:00h	32,2	31,1	29,3	29,9	28,6
17:00h	30,4	29,9	28,3	28,7	28,8
18:00h	29,1	28,9	27,4	27,7	28,9
19:00h	28,4	28,4	26,8	27,2	28,5
20:00h	27,9	28	26,5	26,9	27,9
21:00h	27,5	27,7	26,3	26,7	27,2
22:00h	27,2	27,4	26,2	26,5	26,4
23:00h	27	27,2	26,1	26,4	25,9

	50% da população possui um crescente desconforto	$24 \leq TE < 27$
	A maioria possui um relativo desconforto comum e significativo deterioramento da condição psicofísica	$27 \leq TE < 29$
	Todos possuem um forte desconforto	$29 \leq TE < 32$
	Estado de emergência médica, um desconforto muito forte	$TE \geq 32$





Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Ainda na Tabela 8, observa-se que as áreas comerciais apresentam níveis de desconforto térmico mais severos quando comparadas aos valores registrados pela estação oficial (INMET-A203). Tal constatação reforça a ideia de que os ambientes de atividade comercial possuem uma dinâmica térmica distinta das demais áreas da cidade; suas características funcionais atraem grande circulação de pessoas e, ao mesmo tempo, ampliam a exposição da população a esse desconforto, o que potencializa os riscos ao bem-estar e à saúde ambiental.

Já no período chuvoso (Tabela 9), embora os valores de TE apresentem uma redução geral quando comparados aos do período seco, as áreas comerciais continuam exibindo níveis de desconforto térmico consideráveis:

Tabela 9 - Classes de conforto térmico no período chuvoso (abr. e mai. de 2025).

Conforto térmico nas áreas comerciais durante o período chuvoso na Ilha do Maranhão- MA					
Hora	João Paulo (Ponto 1)	Cohab (Ponto 2)	Maiobão (Ponto 3)	Cidade Operária (Ponto 4)	INMET-A203 (APA Itapiracó)
00:00h	26,5	26,7	26,6	26,5	24,5
01:00h	26,4	26,5	26,5	26,4	24,3
02:00h	26,3	26,4	26,3	26,3	23,7
03:00h	26,2	26,2	26,2	26,1	24,1
04:00h	26,1	26,1	26,1	26	23,9
05:00h	26,1	26	26	25,9	23,8
06:00h	26	25,9	25,9	25,9	23,7
07:00h	26,5	26,3	26,3	26,7	23,6
08:00h	27,5	27,2	27	27,9	23,1
09:00h	28,6	28,2	27,9	28,6	23,5
10:00h	29,6	29,8	28,7	29,2	23,6
11:00h	30,6	30,7	29,5	29,7	24,3
12:00h	31,5	30,8	29,9	30	24,9
13:00h	32,1	30,9	30,1	29,7	25,4
14:00h	32,2	30,6	29,9	29,3	25,8
15:00h	31,7	30,1	29,5	28,9	26,4
16:00h	30,8	29,4	28,8	28,2	26,7
17:00h	29,3	28,7	28,3	27,8	26,6
18:00h	28,2	28	27,8	27,4	26,3
19:00h	27,7	27,6	27,5	27,2	26
20:00h	27,2	27,3	27,2	26,9	25,7
21:00h	26,9	27,2	27,1	26,8	25,3
22:00h	26,7	27	26,9	26,7	24,9
23:00h	26,6	26,8	26,7	26,6	24,7

	50% da população possui um crescente desconforto	24 ≤ TE < 27
	A maioria possui um relativo desconforto comum e significativo deterioramento da condição psicofísica	27 ≤ TE < 29
	Todos possuem um forte desconforto	29 ≤ TE < 32
	Estado de emergência médica, um desconforto muito forte	TE ≥ 32

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se que, entre 10h e 15h, todos os pontos atingem novamente as faixas de forte desconforto, com o João Paulo apresentando os maiores picos, superando 32 °C e atingindo a condição de emergência médica nos horários das 13h e 14h (Tabela 9).

4.4.4 Conforto Térmico *Heat Index* (HI) vs Temperatura Efetiva (TE)

Para melhor esclarecimento, apresenta-se, na Tabela 10, uma síntese dos resultados obtidos, o que permite uma visualização comparativa das diferenças de conforto térmico encontradas nos dois índices aplicados.

A apresentação desses dois índices não tem como objetivo estabelecer um ranqueamento das áreas, mas sim oferecer uma leitura comparativa coerente com o que se evidenciou ao longo do período analisado. Isso se justifica porque o clima urbano é dinâmico e responde continuamente às formas de ocupação e às interações estabelecidas no espaço, o que impede conclusões absolutas.

Os resultados indicam que, segundo o HI, os pontos avaliados alcançaram valores entre 32 e 41, faixa classificada como “Perigo”. Isso sinaliza um forte estresse térmico, com risco de exaustão por temperatura elevada e necessidade de cuidados imediatos, especialmente para quem permanece por longos períodos ao ar livre (Tabela 10).

Por outro lado, a Temperatura Efetiva (TE) situou-se majoritariamente entre $27 \leq TE < 29$, nível que representa um desconforto térmico significativo, associado à piora da condição psicofísica, manifestada por fadiga, irritabilidade e redução da capacidade de desempenhar atividades com conforto (Tabela 10).

Tabela 10 - Comparação das categorias de conforto térmico HI e TE

HI e TE média mensal variação				
Área/índice	Seco (out. e nov. de 2024)		Chuvoso (abr. e mai. de 2025)	
	HI	TE	HE	TE
João Paulo	35	28,89	33,8	28,22
Cohab	34,3	28,53	33,7	27,93
Maiobão	33,3	27,72	32,9	27,61
Cidade Operária	32,2	28,25	32,5	27,52
HI 32 - 41 "Perigo"				
TE $27 \leq TE < 29$ “A maioria possui um relativo desconforto comum e significativo deterioramento da condição psicofísica”				

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A combinação desses dois índices mostra que, apesar de utilizarem metodologias distintas, ambos convergem ao apontar condições ambientais desfavoráveis, revelando um cenário de desconforto térmico relevante nas áreas estudadas. É importante destacar que os

diferentes intervalos não representam inconsistências, mas sim a natureza própria de cada índice, que utiliza parâmetros e escalas específicas para expressar a sensação térmica. Dessa forma, os indicadores complementam-se ao evidenciar o estresse térmico a que a população está exposta.

Diante desses resultados, tornou-se essencial compreender como as pessoas que vivenciam diariamente essas condições percebem e lidam com o desconforto térmico, sobretudo aquelas que permanecem por longas horas nas áreas mais críticas e que apresentam alguma comorbidade. Foi com essa preocupação que se realizou a pesquisa de campo, a fim de observar a realidade local e entender, por meio de entrevistas, como esses indivíduos experimentam as altas temperaturas, de que forma isso afeta seu bem-estar e quais estratégias adotam para minimizar seus efeitos.

4.5 Percepção térmica conforme os entrevistados

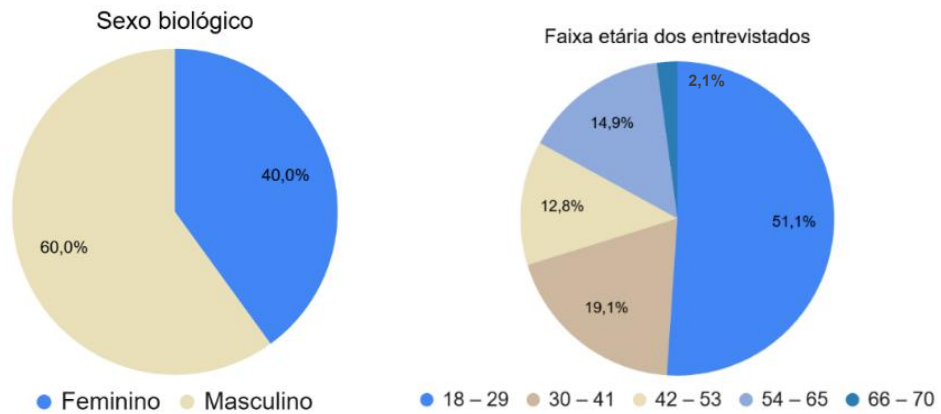
Para compreender a percepção subjetiva da população sobre o conforto térmico, aplicou-se um questionário aos usuários dos espaços analisados. O levantamento de dados exigiu um esforço contínuo em campo, envolvendo diálogos com transeuntes e trabalhadores em diferentes contextos de circulação e permanência.

As perguntas, embora estruturadas, foram conduzidas de forma acessível, buscando captar as realidades vividas, as motivações que levavam cada indivíduo a estar no local, o tempo de permanência, a presença de comorbidades e suas percepções. Dessa forma, foi possível registrar não apenas opiniões pontuais, mas também impressões construídas a partir do cotidiano e das condições concretas de uso desses espaços.

Percepção de conforto térmico - João Paulo, ponto comercial de análise 1:

A análise das variáveis fisiológicas dos usuários do ambiente comercial do bairro João Paulo revela uma distribuição de 60% para o gênero masculino e 40% para o feminino. A maior parte dos entrevistados pertence à faixa etária de 18 a 29 anos (51,1%), seguida por indivíduos entre 30 e 41 anos (19,1%), conforme o Gráfico 23. Tal distribuição é relevante para compreender como diferentes perfis etários percebem e reagem às condições microclimáticas urbanas.

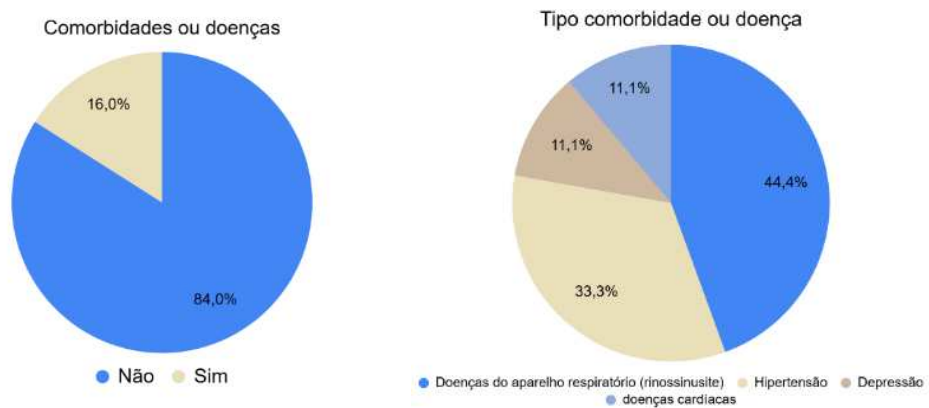
Gráfico 23 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – João Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação ao estado de saúde, 84% dos entrevistados não apresentam comorbidades. Entre os 16% que relataram problemas, destacam-se as doenças do aparelho respiratório (44,4%), a hipertensão (33,3%), além de doenças cardíacas e depressão (ambas com 11,1%), conforme o Gráfico 24. Essas enfermidades podem influenciar diretamente a termorregulação corporal e a sensibilidade a temperaturas elevadas, configurando fatores agravantes do desconforto térmico.

Gráfico 24 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – João Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 43 apresenta os deslocamentos realizados pelos entrevistados em direção à área comercial do bairro João Paulo, localizada na zona central de São Luís (MA).

Figura 43 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

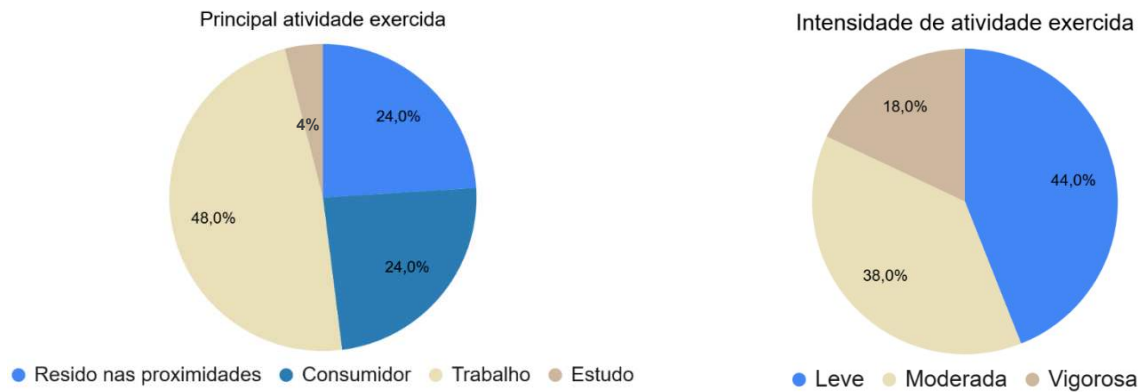
A leitura espacial do mapa (Figura 43) evidencia que esse núcleo comercial exerce forte influência sobre diversos bairros da cidade, com destaque para fluxos advindos do próprio bairro do João Paulo e, com maior intensidade, daqueles localizados em um raio de até 5 km, como o Bairro de Fátima, a Areinha, o Coroado e a Jordoa, configurando uma centralidade comercial de média escala. Ademais, essa área é responsável por atender não apenas a população local, mas também residentes de áreas periféricas e intermediárias, como o bairro do Maiobão (município de Paço do Lumiar) e o Jardim Tropical (cidade de São José de Ribamar). A presença de vias arteriais pavimentadas, como a Avenida São Marçal e a Estrada do João Paulo, facilita essa conectividade urbana.

A concentração de deslocamentos revela a dependência funcional de moradores de bairros distantes em relação ao centro comercial do João Paulo. Essa dinâmica se reflete na vulnerabilidade térmica dos frequentadores, especialmente no caso daqueles que permanecem no local por períodos prolongados. Como ilustra o Gráfico 25, muitos desses indivíduos estão ali a trabalho e realizam atividades físicas ou laborais expostas à radiação solar direta e à baixa ventilação.

Essa configuração favorece um acúmulo intenso de pessoas ao longo do dia, especialmente nos horários comerciais. A junção entre a elevada densidade populacional e a grande extensão de superfícies pavimentadas gera um microclima urbano desfavorável. Portanto, a área comercial do João Paulo atua como um eixo de convergência urbana, cuja pressão populacional recorrente sobrecarrega a infraestrutura térmica local. Essa situação demanda políticas públicas que aliem planejamento comercial e arborização urbana, a fim de mitigar os impactos negativos sobre o bem-estar e a saúde dos usuários da área.

Conforme o Gráfico 25, 48% dos entrevistados utilizam o espaço para trabalho, enquanto 24% o frequentam para consumo ou por residirem nas proximidades. Apenas 2% estão no local por motivos de estudo. Em relação ao esforço físico, observa-se que 44% dos indivíduos realizam atividades classificadas como predominantemente leves.

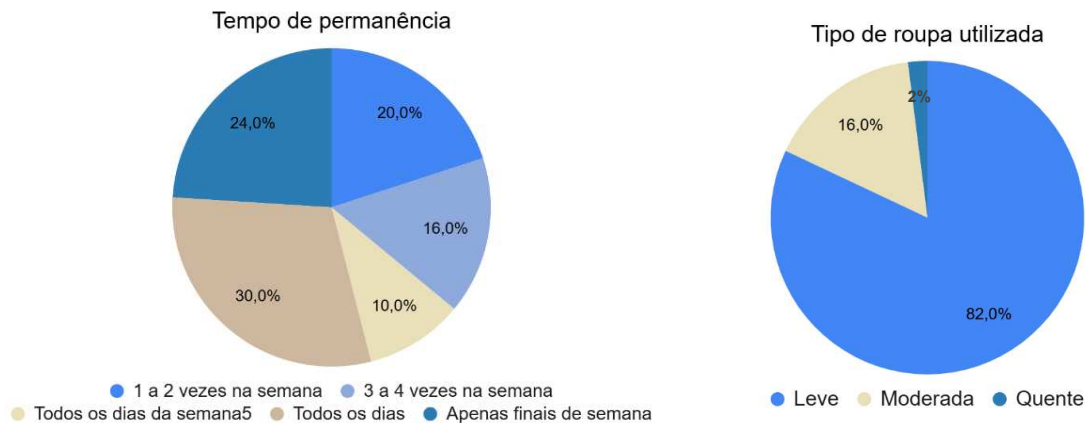
Gráfico 25 - Principal atividade exercida e a sua intensidade – João Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quanto à frequência de permanência, observa-se que 30% das pessoas frequentam o ambiente todos os dias, enquanto 24% o fazem apenas nos finais de semana. Outros 20% comparecem uma ou duas vezes por semana, 16% de três a quatro vezes e apenas 10% estão presentes em todos os dias da semana (segunda a sexta). Sobre a vestimenta, 82% utilizam roupas leves, adequadas ao clima quente, 16% usam roupas moderadas e apenas 2% vestem roupas pesadas, conforme o Gráfico 26. Esses dados indicam que há um grau considerável de adaptação individual às condições ambientais da cidade.

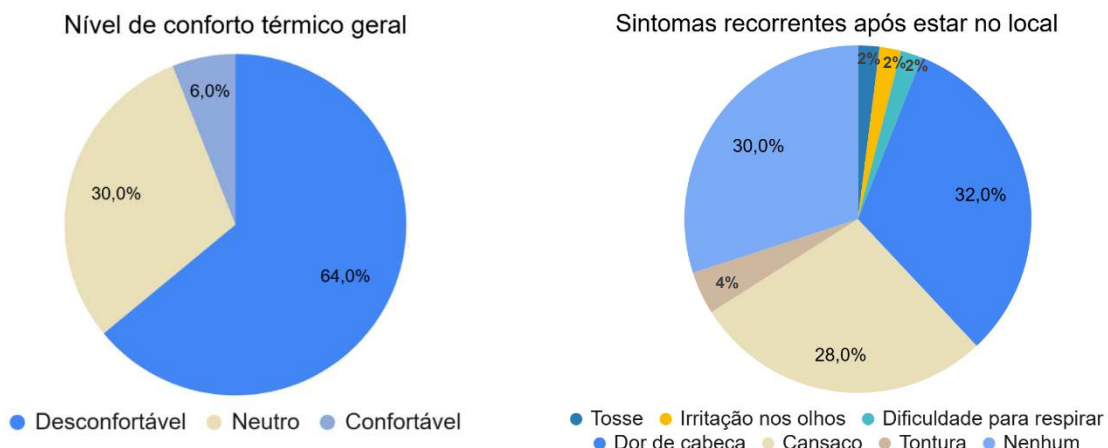
Gráfico 26 - Tempo de permanência e vestimenta –João Paulo



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A percepção de desconforto térmico foi relatada por 64% dos entrevistados, que apontaram como sintomas mais recorrentes a dor de cabeça (32%) e o cansaço (28%), conforme o Gráfico 27.

Gráfico 27 - Nível de conforto térmico e sintomas recorrentes



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Por meio do registro fotográfico, é possível observar nitidamente a configuração da área comercial do João Paulo. Nas imagens, percebe-se que o comércio informal avança sobre a via pública, o que restringe a mobilidade e obriga os pedestres a circular próximos aos veículos, sob exposição direta ao Sol. A predominância de superfícies impermeáveis acentua o acúmulo de energia térmica no local. Além disso, a improvisação de sombras com lonas e guarda-sóis pelos próprios comerciantes reforça a carência de infraestrutura urbana adequada para lidar com as altas temperaturas (Figura 44).

Figura 44 - Área comercial do João Paulo, São Luís - MA



Foto: Brenda Graziela



Foto: Brenda Graziela



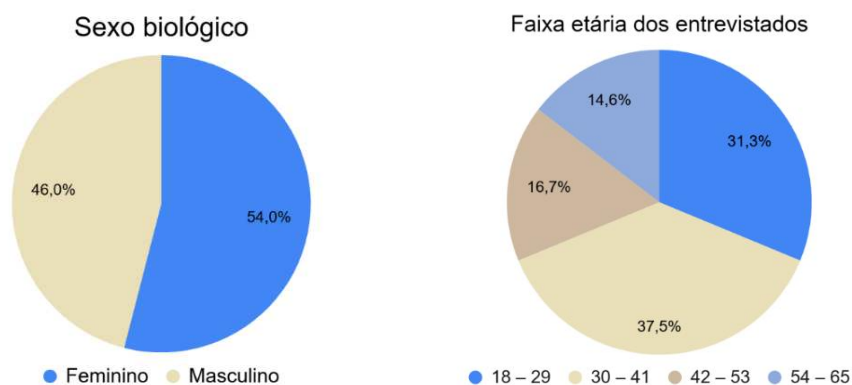
Foto: Brenda Graziela

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Percepção de conforto térmico - Cohab, ponto comercial de análise 2:

Em relação às variáveis fisiológicas, o público entrevistado apresenta uma distribuição de 54% para o gênero feminino e 46% para o masculino. A faixa etária predominante situa-se de 30 a 41 anos (37,5%), seguida pelo grupo de 18 a 29 anos (31,3%), conforme os dados apresentados no Gráfico 28.

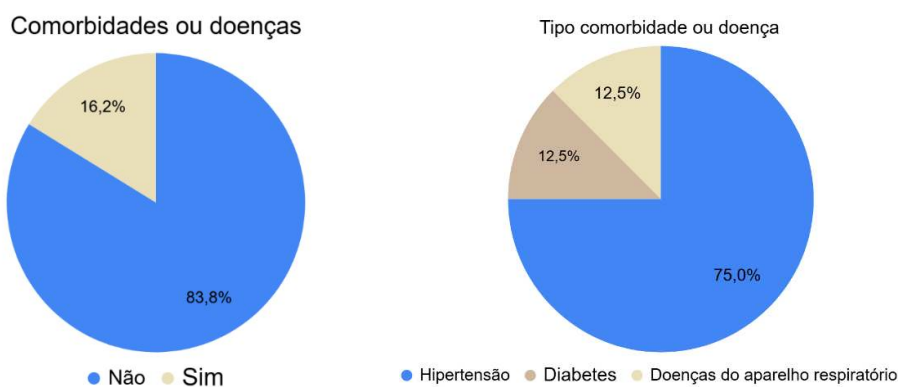
Gráfico 28 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – Cohab



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quanto às comorbidades, 83,8% dos entrevistados não apresentam doenças pré-existentes. Os demais 16,2% relataram, principalmente, hipertensão (75%), seguida por diabetes e outras condições, como problemas respiratórios ou circulatórios (12,5% cada), conforme o Gráfico 29.

Gráfico 29 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – Cohab



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 45 representa os fluxos de deslocamento dos entrevistados desde seus bairros de origem até a área comercial da Cohab, localizada em São Luís (MA). A densidade dos fluxos, evidenciada pelo diâmetro dos círculos, revela uma clara centralidade funcional. Essa influência alcança bairros adjacentes e periféricos, sendo potencializada pela presença de um terminal que integra e facilita a mobilidade urbana intermunicipal.

Figura 45 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial-Cohab

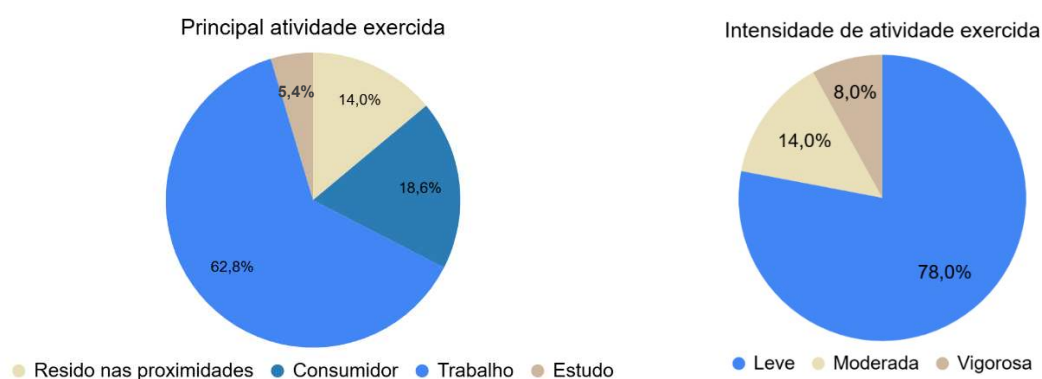


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa expansão dos fluxos para além do município de São Luís alcança regiões limítrofes como Paço do Lumiar e São José de Ribamar, o que reforça o caráter regionalizado da centralidade da Cohab. Trata-se de uma centralidade intermediária que articula fluxos locais e metropolitanos, desempenhando um papel estratégico na dinâmica urbana. Sob a ótica do conforto térmico, essa concentração de pessoas ocorre em um espaço funcionalmente sobrecarregado, caracterizado pela escassez de vegetação e pela intensa atividade comercial.

A atividade mais exercida no local é o trabalho (62,8%), seguida pelo consumo (18,6%) e pela residência (15%). Em termos de intensidade de esforço físico, 78% dos entrevistados relataram realizar atividades leves, 15% atividades moderadas e 8% atividades intensas (Gráfico 30).

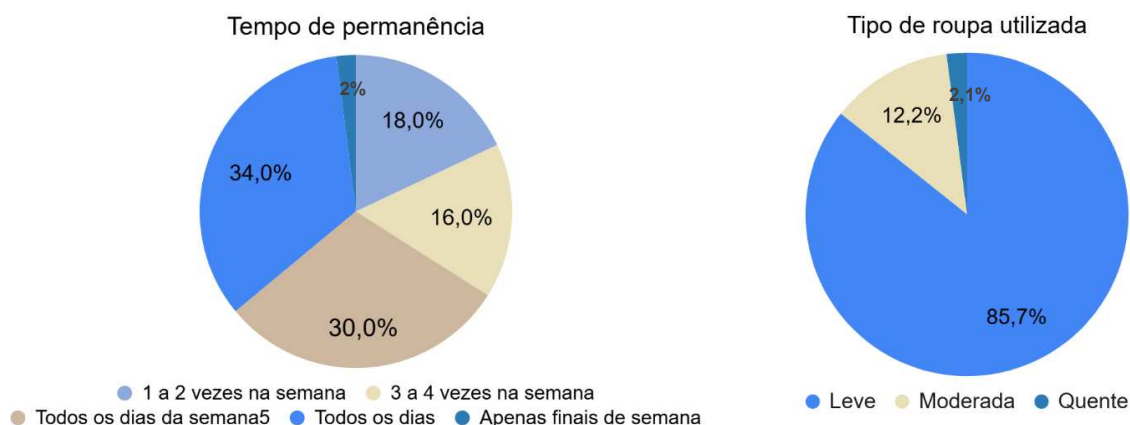
Gráfico 30 - Principal atividade exercida e a sua intensidade - Cohab



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação à frequência de permanência, 34% dos entrevistados frequentam o local todos os dias, enquanto 30% o fazem durante todos os dias da semana (de segunda a sexta). Outros 18% comparecem uma ou duas vezes por semana, 16% de três a quatro vezes e apenas 1% frequenta o ambiente apenas nos finais de semana. Quanto à vestimenta, 85,7% utilizam roupas leves, 12,2% roupas moderadas e apenas 1% veste roupas pesadas (Gráfico 31).

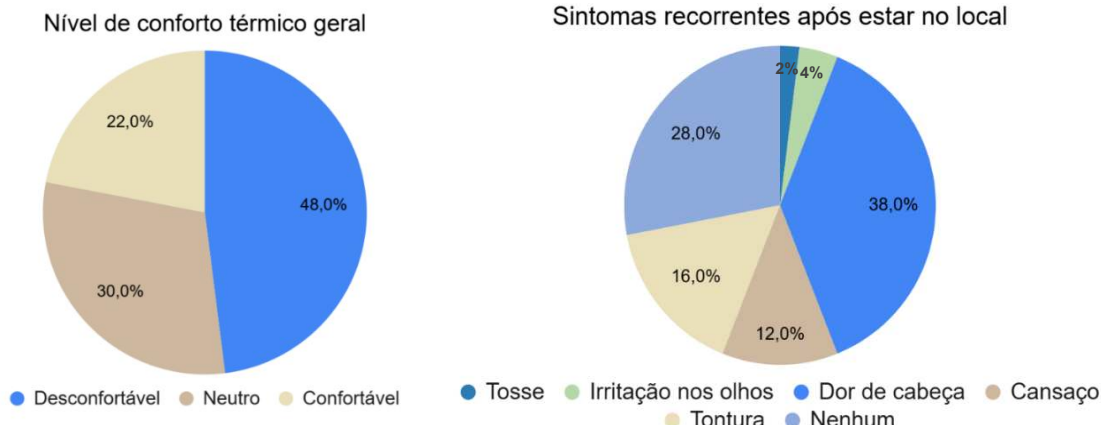
Gráfico 31 - Tempo de permanência e vestimenta – Cohab



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No que diz respeito à percepção térmica, 48% dos entrevistados indicaram desconforto térmico, enquanto 30% manifestaram percepção neutra e 22% sentem-se confortáveis. Entre os sintomas predominantes, destacam-se a dor de cabeça (38%) e a tontura (16%), conforme os dados apresentados no Gráfico 32.

Gráfico 32 - Nível de conforto térmico e sintomas recorrentes – Cohab



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No registro fotográfico do bairro da Cohab (Figuras 46 e 47), observa-se uma área mais estruturada, contudo, com pouco sombreamento natural. A via é ampla, mas carece de arborização e de elementos urbanos que contribuam para o conforto térmico, como abrigos ou mobiliário urbano. Esse cenário sugere que, mesmo em espaços formalizados, aspectos relacionados ao microclima urbano e ao bem-estar térmico ainda recebem atenção limitada.

Figura 46 - Área comercial da Cohab, São Luís - MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 47 - Área comercial da Cohab, São Luís- MA



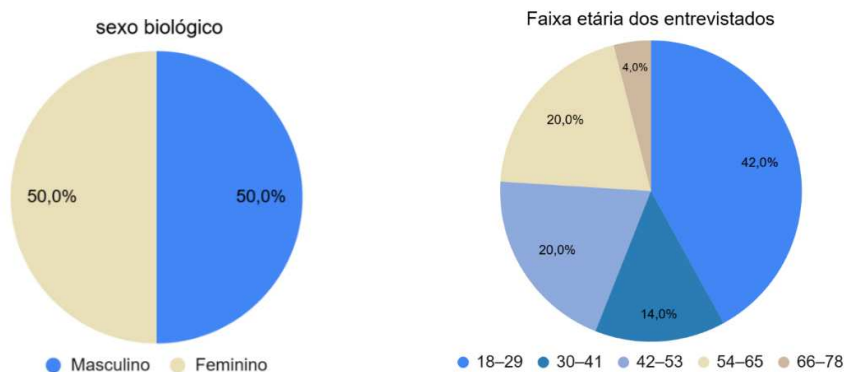
Foto: Brenda Graziela

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Percepção de conforto térmico - Est. Ribamar (Maiobão), ponto comercial de análise 3:

Em relação à análise das variáveis fisiológicas, os dados levantados mostram-se de forma equilibrada em termos de gênero, com 50% para o público masculino e 50% para o feminino. A população é predominantemente adulta, com destaque para a faixa etária entre 18 e 29 anos, que representa 42% do total da amostra (Gráfico 33).

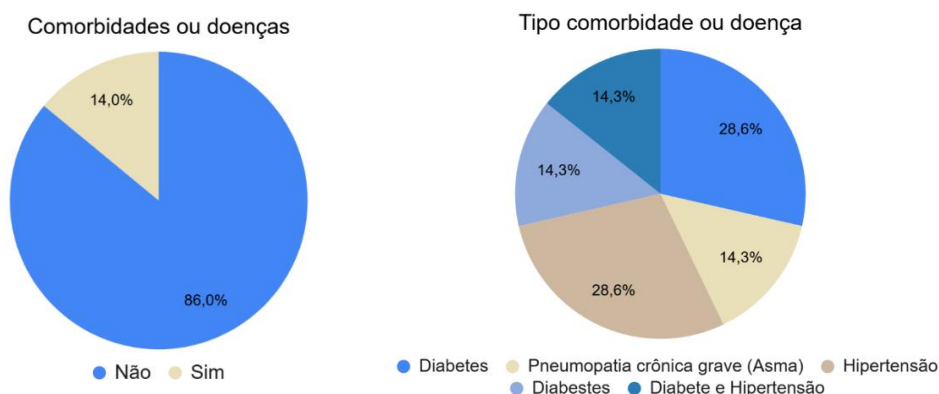
Gráfico 33 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – Estrada Ribamar



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quanto às condições de saúde, a maioria (85,1%) não apresenta comorbidades. Entre os que relataram doenças pré-existentes, as mais comuns são a diabetes e a hipertensão, conforme demonstrado no Gráfico 34.

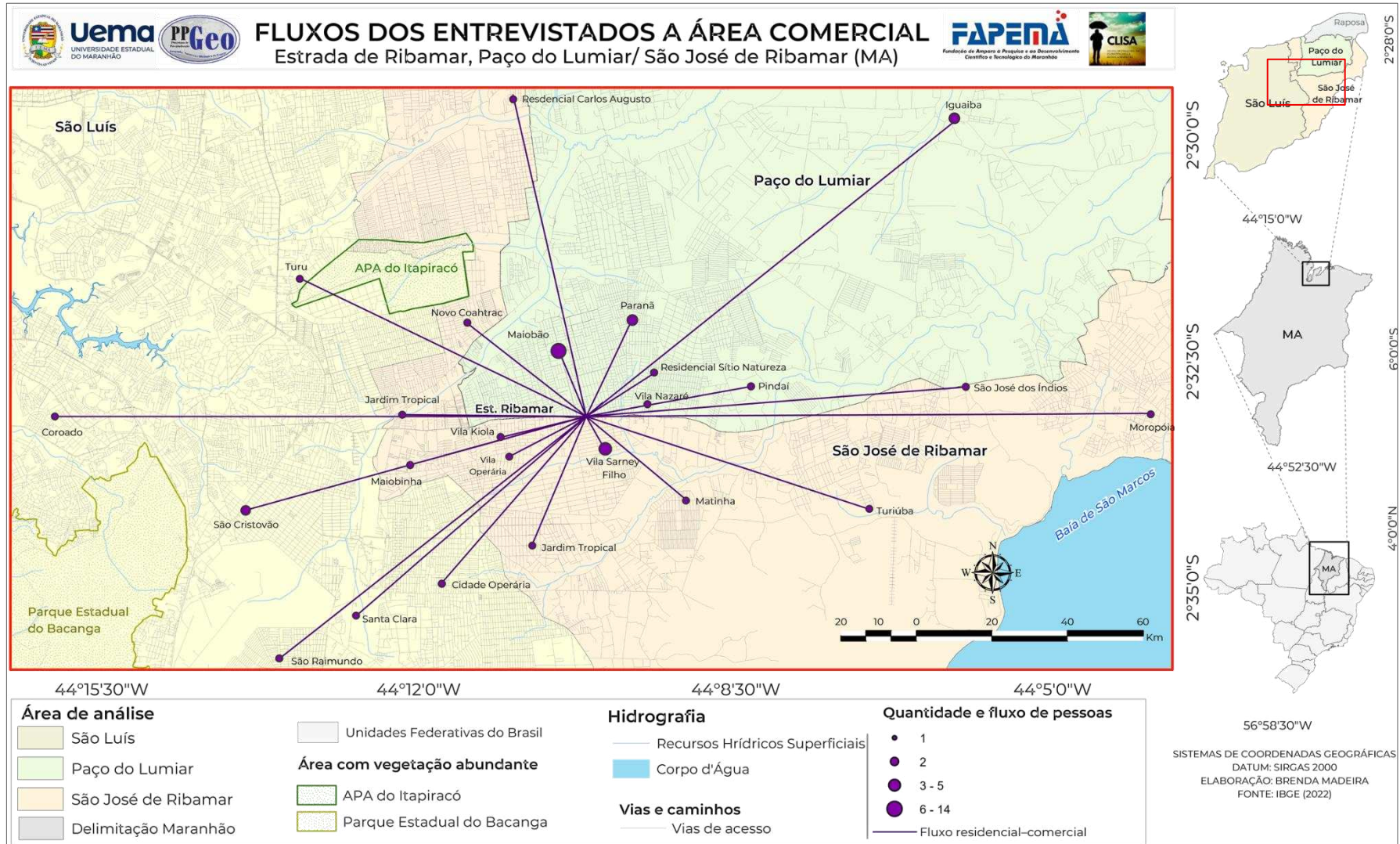
Gráfico 34 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – Estrada Ribamar



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 48 apresenta os fluxos de deslocamento dos entrevistados desde seus bairros de residência até a área comercial da Estrada de Ribamar, com centralidade no bairro Maiobão. Os trajetos evidenciam o papel estruturante dessa área para os municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar, consolidando-se como um polo de referência cotidiana. A concentração dos fluxos nos bairros adjacentes reforça sua importância regional e indica impactos urbanos significativos, como o aumento das ilhas de calor e a redução do conforto térmico no entorno.

Figura 48 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial - Estrada Ribamar

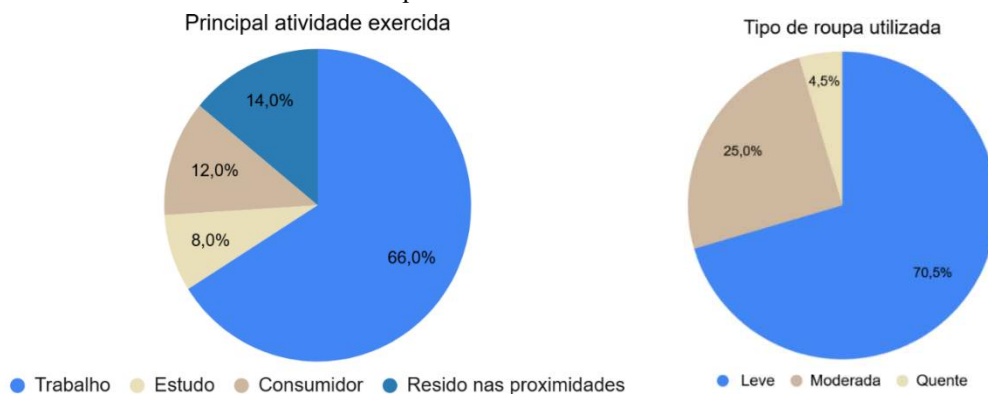


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A presença de fluxos oriundos de bairros distantes, como do Iguaiá, do Moropóia e do São Raimundo, evidencia a ampla influência territorial do centro comercial do Maiobão, que atua como uma centralidade urbana estratégica. Mais do que um espaço de consumo, o comércio local orienta deslocamentos e a permanência no território, configurando uma dinâmica regionalizada de uso do espaço urbano. Essa concentração de atividades intensifica processos de urbanização, favorecendo a formação de ilhas de calor e comprometendo o conforto térmico, o que exige atenção no planejamento urbano (Figura 48).

As atividades mais desempenhadas ou que motivam a presença no local são: o trabalho (66%), o fato de residir nas proximidades (14%) e o consumo (12%). Sobre a intensidade dessas atividades, a maioria classifica-se como leve (62%), o que implica em uma menor geração de calor metabólico pelo corpo, conforme o Gráfico 35.

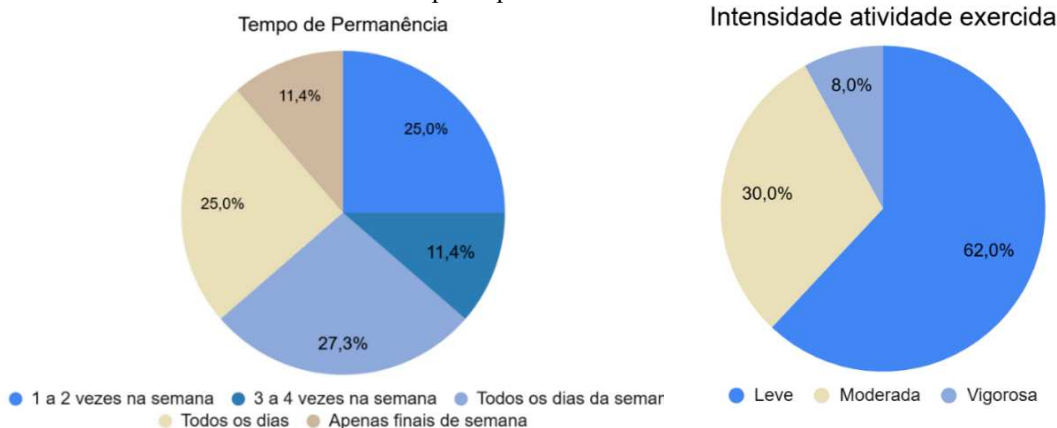
Gráfico 35 - Principal atividade exercida e a sua intensidade – Estrada Ribamar



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação ao tempo de permanência no local, cerca de 31,1% e 22,2% dos entrevistados frequentam a área de três a sete vezes por semana, evidenciando um uso intenso e contínuo do espaço comercial. Quanto à vestimenta adotada, o fato de 74% utilizarem roupas leves confirma a tentativa de adaptação às altas temperaturas (Gráfico 36).

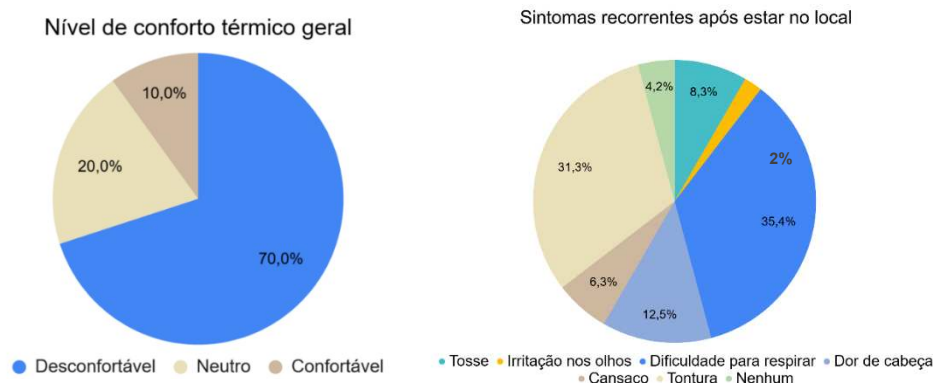
Gráfico 36 - Tempo de permanência e vestimenta - Estrada Ribamar



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A percepção de conforto térmico e saúde reflete um quadro preocupante: 70% dos entrevistados consideram o local termicamente desconfortável. Sintomas como cansaço (33%), dor de cabeça (33%) e irritação nos olhos (11%) foram relatados como recorrentes após a exposição ao ambiente, o que reforça a relação direta entre a configuração do espaço urbano e a saúde dos usuários (Gráfico 37).

Gráfico 37 - Nível de conforto térmico e sintomas recorrentes - Estrada Ribamar



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

As imagens referentes à área comercial dessa região mostram locais de grande fluxo de pessoas e veículos, com uma ocupação intensa do espaço por barracas, o que contribui para uma sensação térmica desconfortável (Figuras 49 e 50). Na Figura 49, fica evidente que há áreas destinadas à arborização, mas estas não são utilizadas. Como consequência, as coberturas, em vez de naturais, passam a ser artificiais, com a presença de barracas instaladas ao longo dos canteiros centrais da avenida.

Figura 49 - a) Área comercial Estrada Ribamar; b) meio fio sem arborização e c) barraca para abrigo térmico (Bairro Maiobão) - MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 50 - Área comercial Estrada Ribamar (Bairro Maiobão) - MA

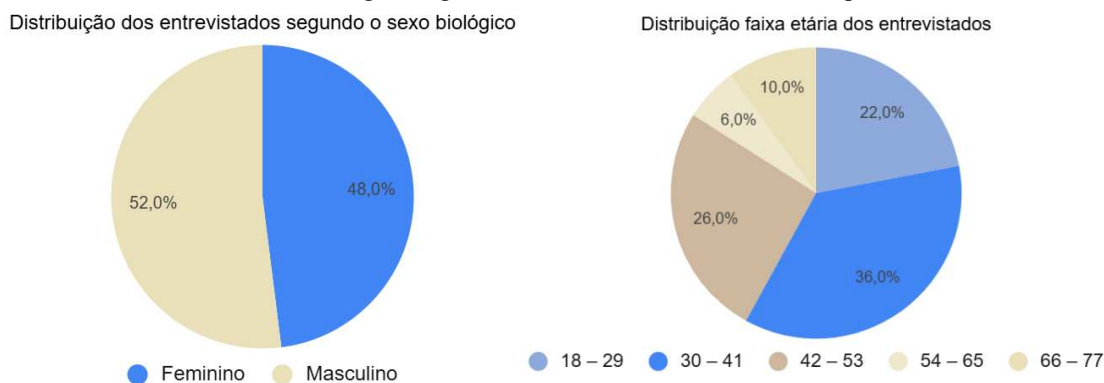


Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Percepção de conforto térmico - Cidade Operária, ponto comercial de análise 4:

Em relação às variáveis fisiológicas dos entrevistados, 48% pertencem ao sexo feminino e 52% ao masculino. A faixa etária predominante situa-se de 30 a 41 anos (36%), seguida pelos grupos de 42 a 53 anos (26%) e de 18 a 29 anos (22%), conforme os dados do Gráfico 38.

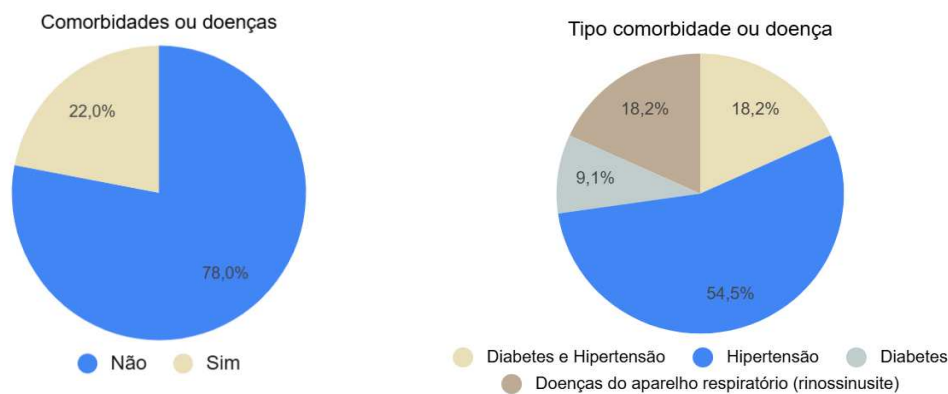
Gráfico 38 - Variáveis fisiológicas ligadas ao conforto térmico – Cidade Operária



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação às condições de saúde, 78% dos entrevistados relataram não possuir comorbidades. Entre os 22% restantes, os problemas mais mencionados foram a hipertensão (54%), a associação entre diabetes e hipertensão (18,8%) e as doenças respiratórias (18,8%), conforme os dados apresentados no Gráfico 39.

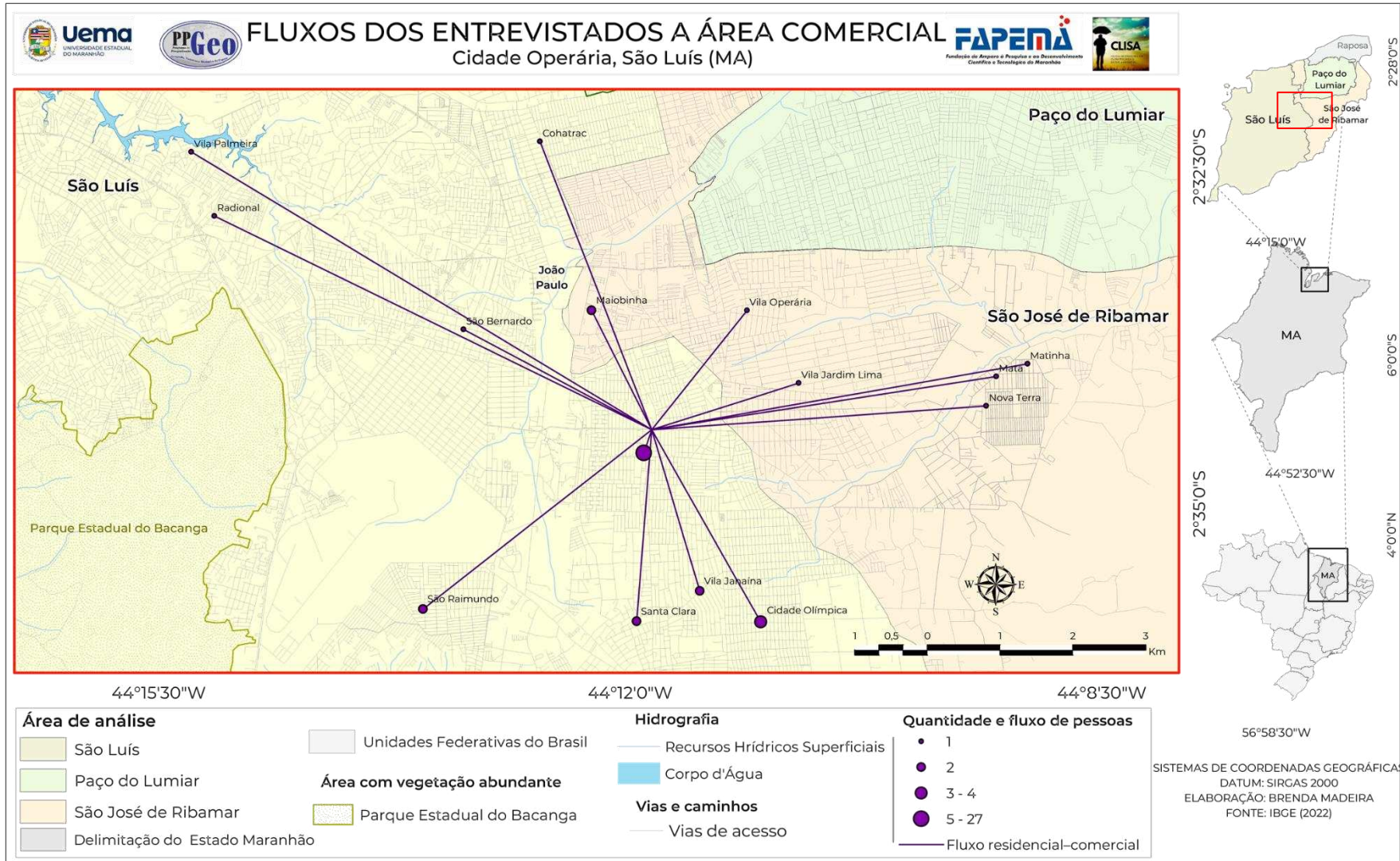
Gráfico 39 - Condições de saúde relacionadas ao conforto térmico – Cidade Operária



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Figura 51 evidencia os fluxos de deslocamento dos moradores até o ponto comercial da Cidade Operária, revelando uma intensa movimentação de bairros vizinhos e intermediários. O local consolida-se como uma centralidade relevante na zona periférica de São Luís. Em relação às demais áreas analisadas, a área comercial da Cidade Operária possui uma escala de fluxo menor, funcionando como um polo atrator de fluxos cotidianos, especialmente de bairros próximos como da Santa Clara, do São Raimundo e da Vila Janaína.

Figura 51 - Mapa Fluxo de Deslocamento dos Entrevistados do Bairro ao ambiente comercial – Cidade Operária



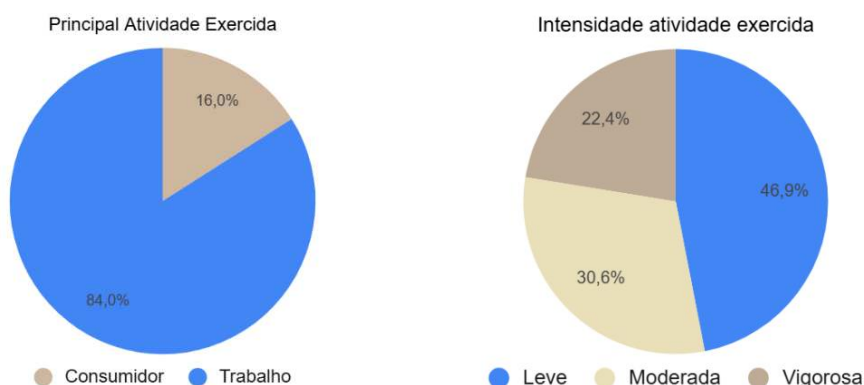
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Destaca-se a predominância de fluxos originários de áreas periféricas, o que reforça a condição do local como um centro funcional secundário, porém essencial à dinâmica urbana local. O maior número de deslocamentos, com valores entre 5 e 27 pessoas (representado pelo círculo maior), parte de bairros do entorno imediato, revelando um padrão de mobilidade de curta distância, típico de centralidades intermediárias voltadas ao consumo popular da região.

A leitura do mapa também mostra que, embora os fluxos se concentrem majoritariamente em bairros dentro de São Luís, há deslocamentos oriundos de áreas de São José de Ribamar, como da Matinha e da Nova Terra. Essa dinâmica confere à Cidade Operária uma influência territorial que ultrapassa os limites administrativos, o que amplia sua importância como núcleo comercial e funcional urbano.

Em relação às atividades exercidas, 84% dos entrevistados indicaram estar no local para o trabalho, enquanto 16% motivam-se pelo consumo. Quanto à intensidade, 46,9% exercem atividade leve, 30,6% moderada e 22,4% atividade intensa (Gráfico 40).

Gráfico 40 - Principal atividade exercida e a sua intensidade – Cidade Operária



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Quanto à frequência de uso do espaço, 66% dos entrevistados frequentam a área todos os dias, enquanto 12% o fazem durante todos os dias da semana (de segunda a sexta). Outros 18% comparecem de uma a duas vezes, enquanto os grupos que frequentam de três a quatro dias ou apenas nos finais de semana somam 2% cada. Sobre a vestimenta, 74% utilizam roupas leves, 18% roupas médias e 8% roupas pesadas (Gráfico 41).

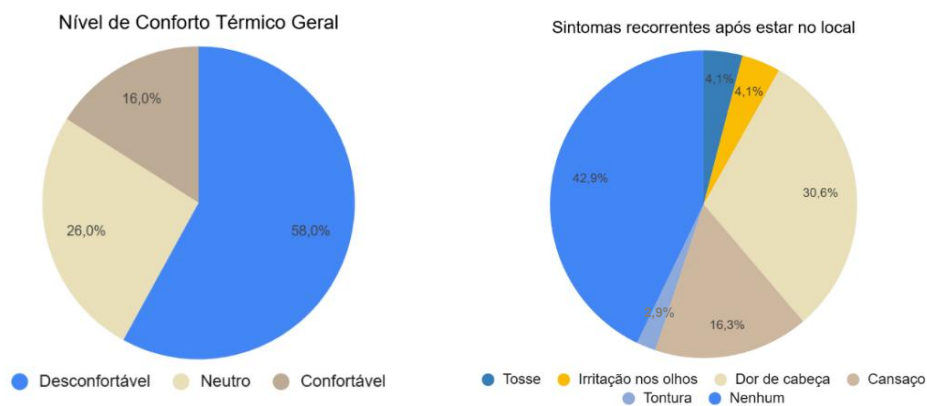
Gráfico 41 - Tempo de permanência e vestimenta, Cidade Operária



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No que tange à percepção de conforto térmico, o desconforto atinge 58% dos entrevistados. Os sintomas mais relatados como consequência dessa exposição incluem a dor de cabeça (30,6%) e o cansaço (16,3%), conforme demonstrado no Gráfico 42.

Gráfico 42 - Tempo de permanência e vestimenta, Cidade Operária



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Nas Figuras 52 e 53, observa-se que, diferentemente de outras áreas comerciais investigadas, na região da Cidade Operária há a presença de vegetação. Assim, mesmo com a ocupação comercial intensa dos espaços públicos, como calçadas e canteiros centrais, a existência de árvores em pontos estratégicos contribui para mitigar, ainda que parcialmente, o desconforto térmico e melhora as condições ambientais da área.

Figura 52 - Área comercial da Cidade Operária, São Luís - MA



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 53 - Área comercial da Cidade Operária, São Luís - MA



Foto: Brenda Graziela

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Dessa forma, os dados evidenciam que as áreas comerciais da Ilha do Maranhão analisadas têm se desenvolvido de maneira a intensificar o desconforto térmico entre os frequentadores. A ausência de infraestrutura urbana adequada a esse tipo de atividade revela a predominância de ocupações ao longo de vias de acesso, tornando esses espaços desfavoráveis ao bem-estar e à qualidade microclimática.

Essa tendência é refletida nos percentuais de entrevistados que relataram desconforto térmico nas regiões estudadas: 64% no João Paulo, 48% na Cohab, 70% no Maiobão (Estrada de Ribamar) e 58% na Cidade Operária. Tais índices correspondem diretamente aos valores do *Heat Index* medidos durante o mesmo período, com base em dados físicos de temperatura e umidade do ar. Conforme apresentado anteriormente nos Gráficos 7 e 12 (*Boxplot* do *Heat*

Index), os valores do índice foram significativamente elevados, especialmente entre o final da manhã e o meio da tarde.

Essa coerência entre a percepção térmica relatada pelos usuários e os dados ambientais reforça a influência das condições microclimáticas locais no bem-estar térmico. As observações de campo complementam essa análise, evidenciando a baixa presença de vegetação, a escassez de áreas sombreadas e o uso de materiais com alta absorção térmica nas superfícies pavimentadas dos trechos comerciais.

4.6 A poluição do ar e suas implicações para saúde da população

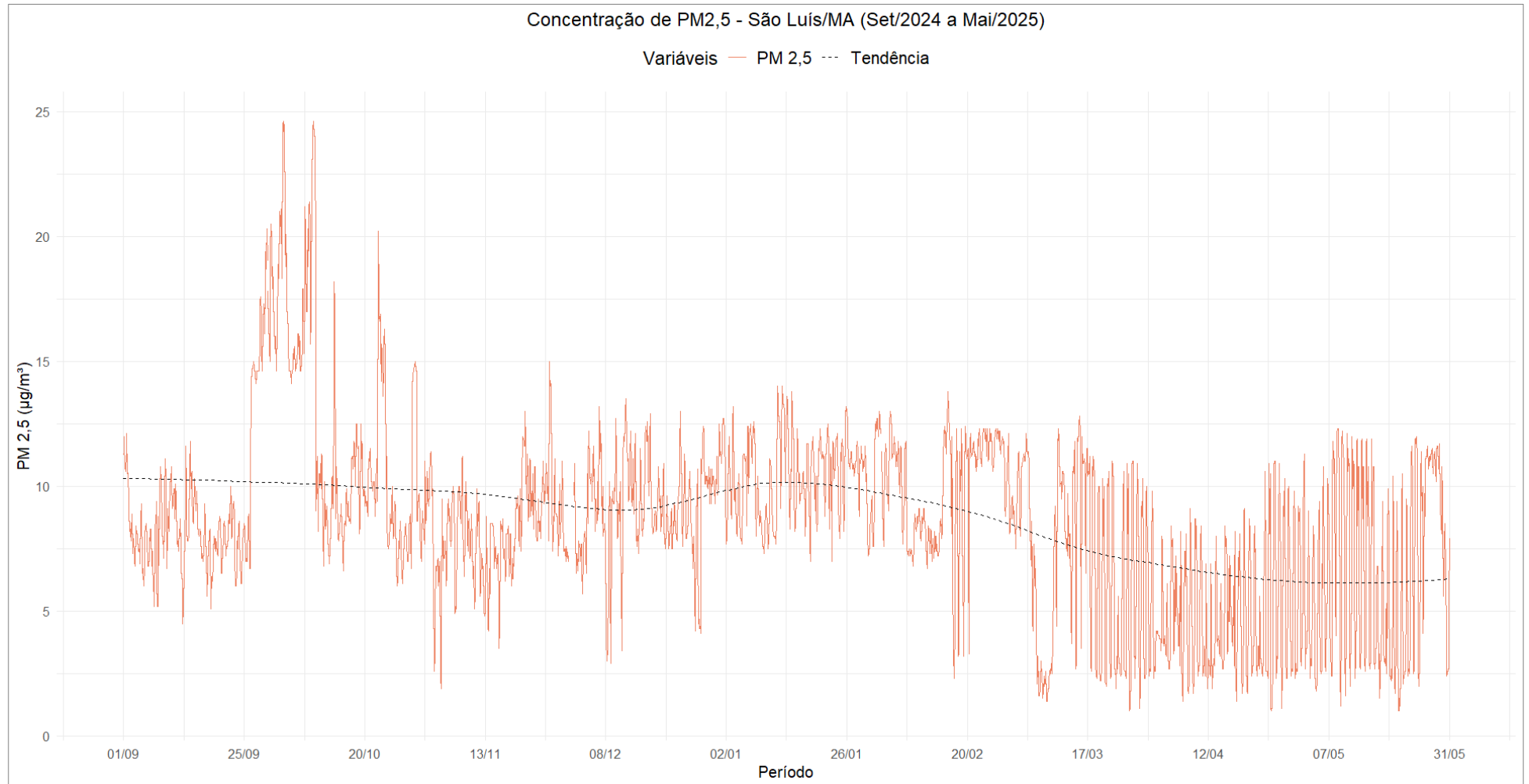
A investigação da qualidade do ar nas áreas comerciais da Ilha do Maranhão integrou dados estimados de plataformas públicas (PM_{2.5}) e variáveis climáticas durante o período seco (setembro a dezembro de 2024) e o período chuvoso (janeiro a maio de 2025). Essa abordagem permitiu quantificar os contaminantes e relacioná-los às condições meteorológicas locais, investigando seus efeitos na saúde pública.

As análises indicam que as concentrações horárias de PM_{2.5} apresentaram níveis elevados no início do período estudado, com picos acima de 20 µg/m³ entre setembro e novembro (média de 9,79 µg/m³), seguidos de uma queda gradual durante o período chuvoso (média de 7,75 µg/m³), conforme ilustrado no Gráfico 43.

A relação entre as concentrações de PM_{2.5} e a precipitação acumulada mostra que eventos de chuva intensa provocam quedas temporárias nos níveis de partículas. Essa redução, associada ao aumento da pluviosidade, deve-se à deposição úmida e à dispersão atmosférica das partículas (Gráfico 44).

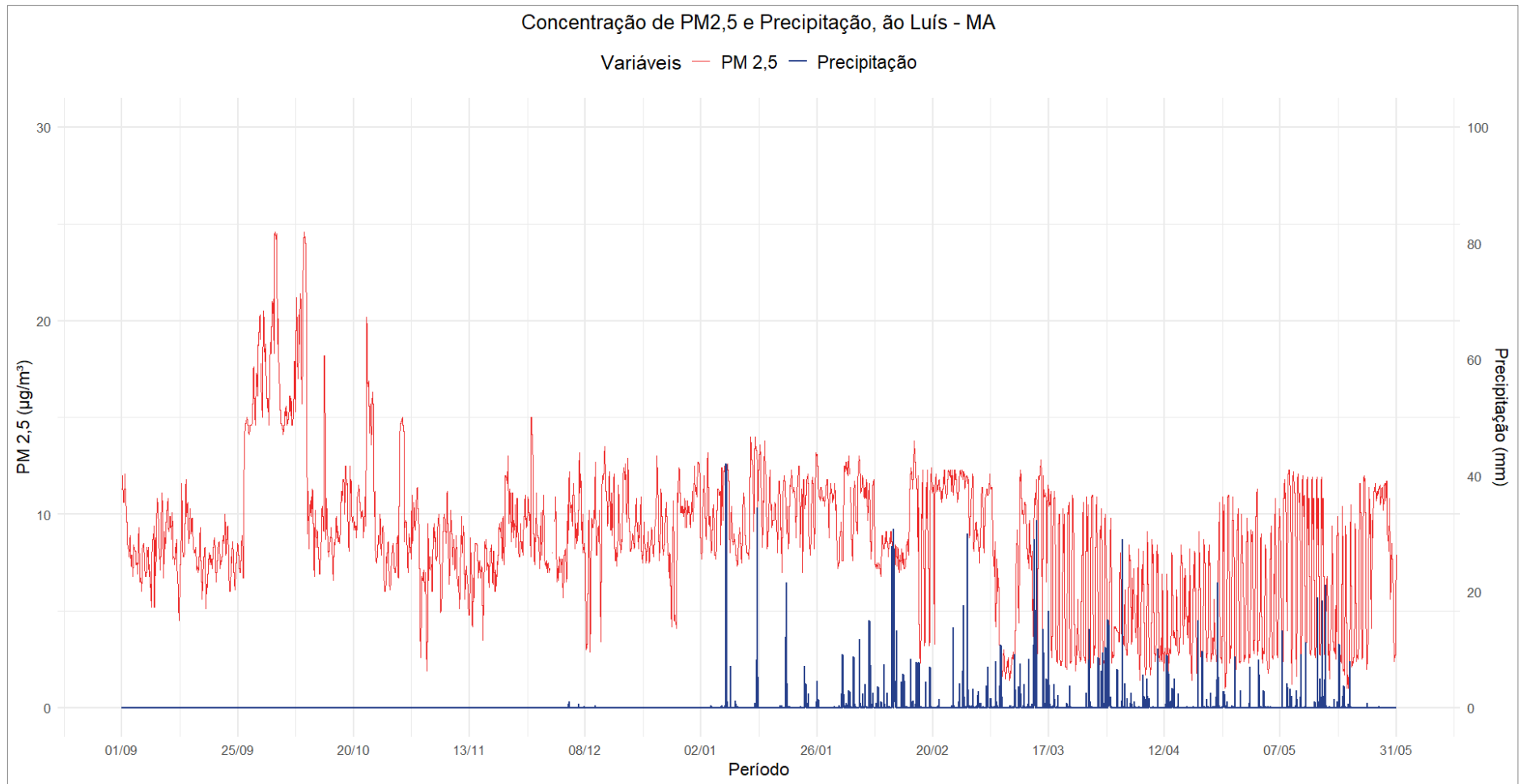
O Gráfico 45 apresenta a dispersão entre a concentração estimada de PM_{2.5} e as variáveis climáticas (precipitação, radiação global, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento) registradas pela estação INMET A203. Os coeficientes de correlação indicam relações muito fracas, com a temperatura e o vento apresentando correlação positiva ($r = 0,1$), enquanto as demais variáveis exibem correlações negativas próximas de zero. Tais resultados indicam que essas variáveis atuam de forma independente em relação à concentração do material particulado, conforme reforçado de modo simplificado no Gráfico 46.

Gráfico 43 - Concentrações de PM_{2,5} na Ilha do Maranhão (set. de 2024 a mai. de 2025)



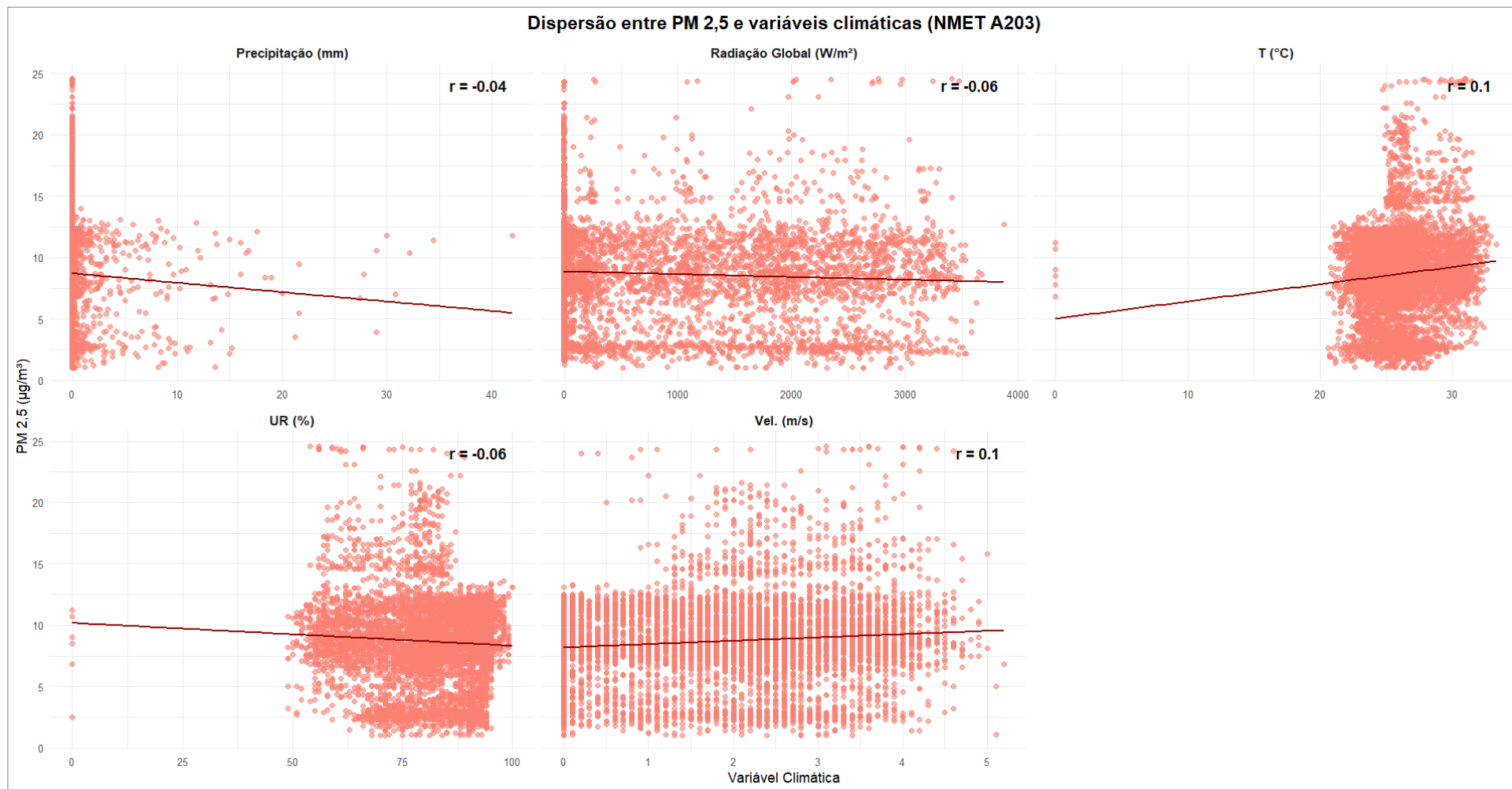
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 44 - Concentrações de PM_{2,5} em relação à precipitação na Ilha do Maranhão (set. de 2024 a mai. de 2025)



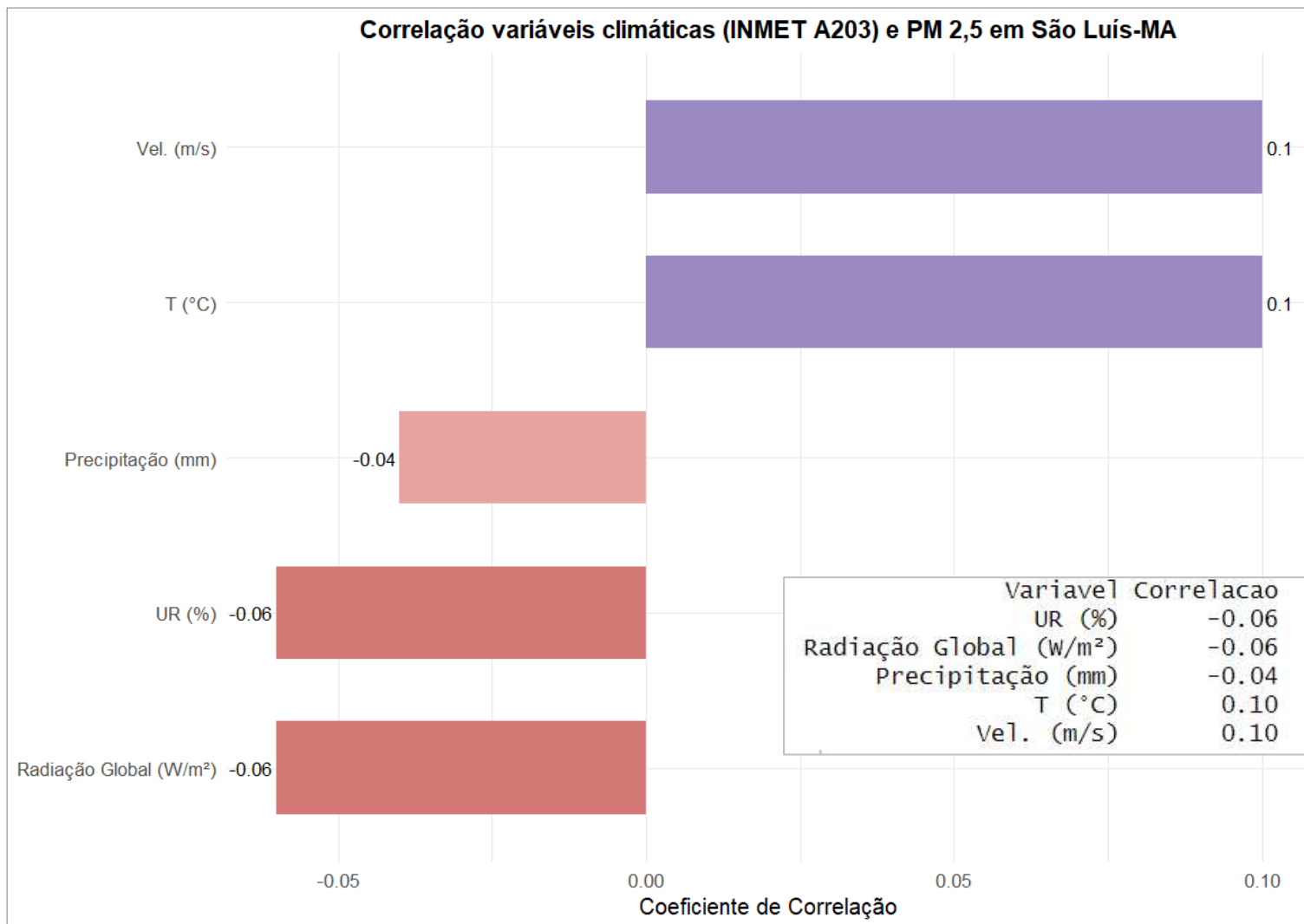
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 45 - Dispersão entre PM_{2,5} e variáveis climáticas na Ilha do Maranhão (2024-2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Gráfico 46 - Esquema de correlação entre PM_{2,5} e variáveis climáticas na Ilha do Maranhão (2024-2025)



Além dos registros horários em diferentes períodos, foram realizadas medições diretas em campo. Para o monitoramento da qualidade do ar nas áreas comerciais estudadas, foram conduzidas coletas no mês de abril de 2025, por volta das 12h (Figura 54).

Figura 54 - Medições nas áreas comerciais do João Paulo, da Cohab, do Maiobão e da Cidade Operária, 30 abr.



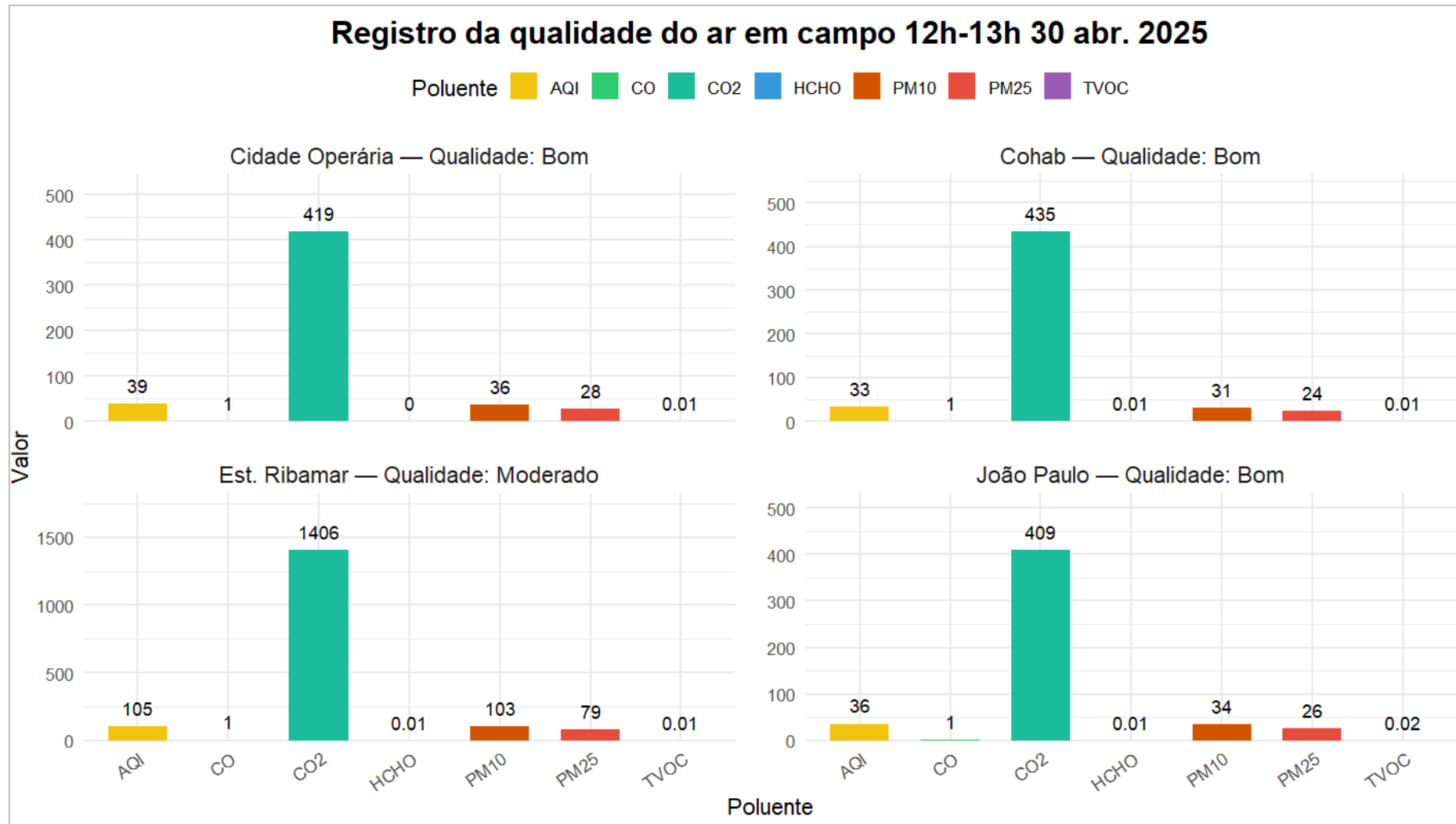
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Conforme a Figura 54, nota-se que, na área comercial do João Paulo, mesmo com a classificação do ar como "Boa", a presença de TVOC (0,016 mg/m³) e o nível de PM_{2.5} (26 µg/m³) indicam uma carga de poluentes considerável, sobretudo quando somados aos valores de CO₂ (409 ppm). Na Cohab, o material particulado registrou 24 µg/m³. Já a Estrada do Ribamar apresentou os piores índices de poluição, com destaque para os níveis de PM_{2.5} e PM₁₀, que ultrapassam significativamente os limites de segurança da OMS. Por fim, na Cidade Operária, a concentração de PM_{2.5} fixou-se em 28 µg/m³, situando-se no intervalo "Boa" de qualificação e indicando uma situação aparentemente controlada.

As informações dessas medições podem ser observadas no Gráfico 47, o qual organiza os dados levantados no intervalo entre 12h e 13h. Esses resultados constituem um panorama inicial importante para compreender o comportamento dos principais poluentes atmosféricos em ambientes de intensa circulação de pessoas e veículos, como os trechos comerciais aqui analisados.

As fotografias registradas durante os trabalhos de campo mostram momentos de intensa circulação de veículos, incluindo a emissão visível de fumaça por automóveis, além do próprio processo de medição realizado em meio ao fluxo urbano. Essa documentação revela o contexto ambiental em que os dados foram coletados, o que reforça a presença de fontes emissoras e a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do ar nesses locais, (Figura 55).

Gráfico 47 - Registro da qualidade do ar, 30 abr. 2025



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 55 - Imagens de campo a) Monitoramento da qualidade do ar; b) Registro aéreo de queima de biomassa; c) Emissões veiculares



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

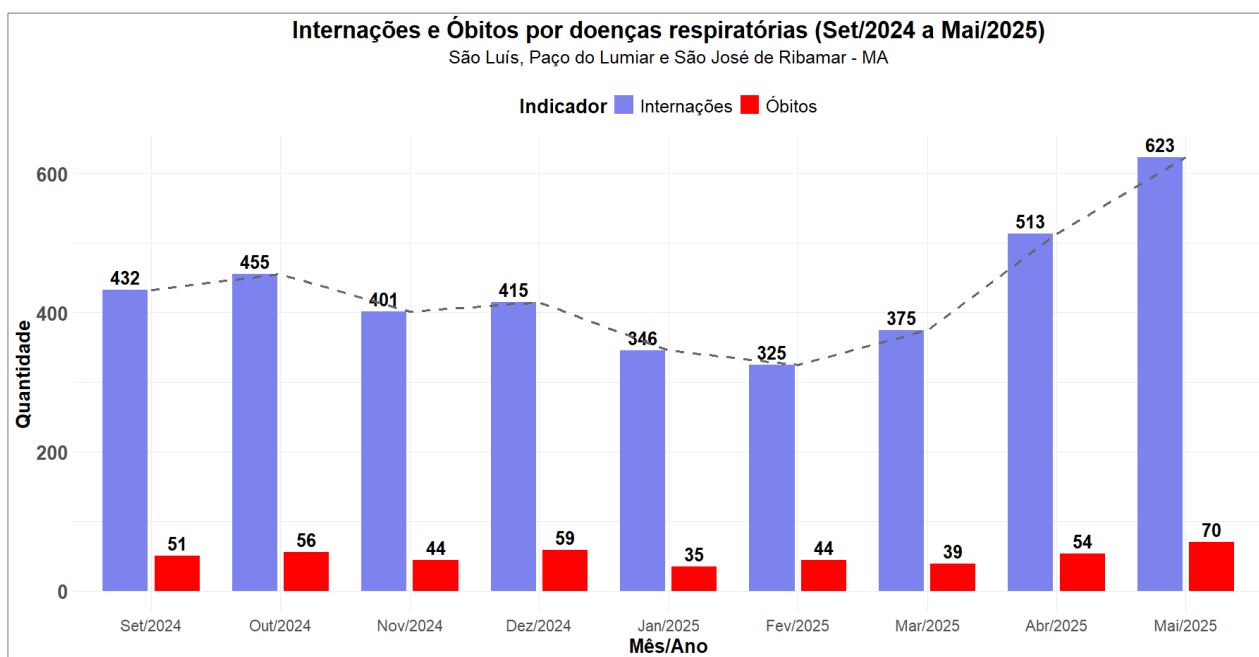
4.6.1 Análise integrada das doenças respiratórias e das concentrações de PM_{2.5}

A análise das internações hospitalares por doenças respiratórias nos municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar, entre setembro de 2024 e maio de 2025, foi fundamental para compreender a relação entre a concentração e a dispersão do material particulado fino (PM_{2.5}) diante das oscilações dos elementos climáticos, bem como suas repercussões nos casos de internações e óbitos por doenças respiratórias.

Ao longo da série, observa-se que as internações se mantêm relativamente estáveis entre setembro e dezembro de 2024, variando entre 401 e 455 registros, com um leve pico em outubro (Gráfico 48).

No início de 2025, ocorre uma queda significativa, com o menor valor registrado no mês de fevereiro (325 internações). A partir de março, inicia-se um ciclo de aumento contínuo que culmina no maior volume observado em maio de 2025, quando as internações alcançam 623 casos. Os óbitos acompanham essa tendência, apresentando elevação gradual e atingindo o valor máximo de 70 registros no mesmo mês, o que indica uma maior gravidade do quadro respiratório no final do período analisado (Gráfico 48).

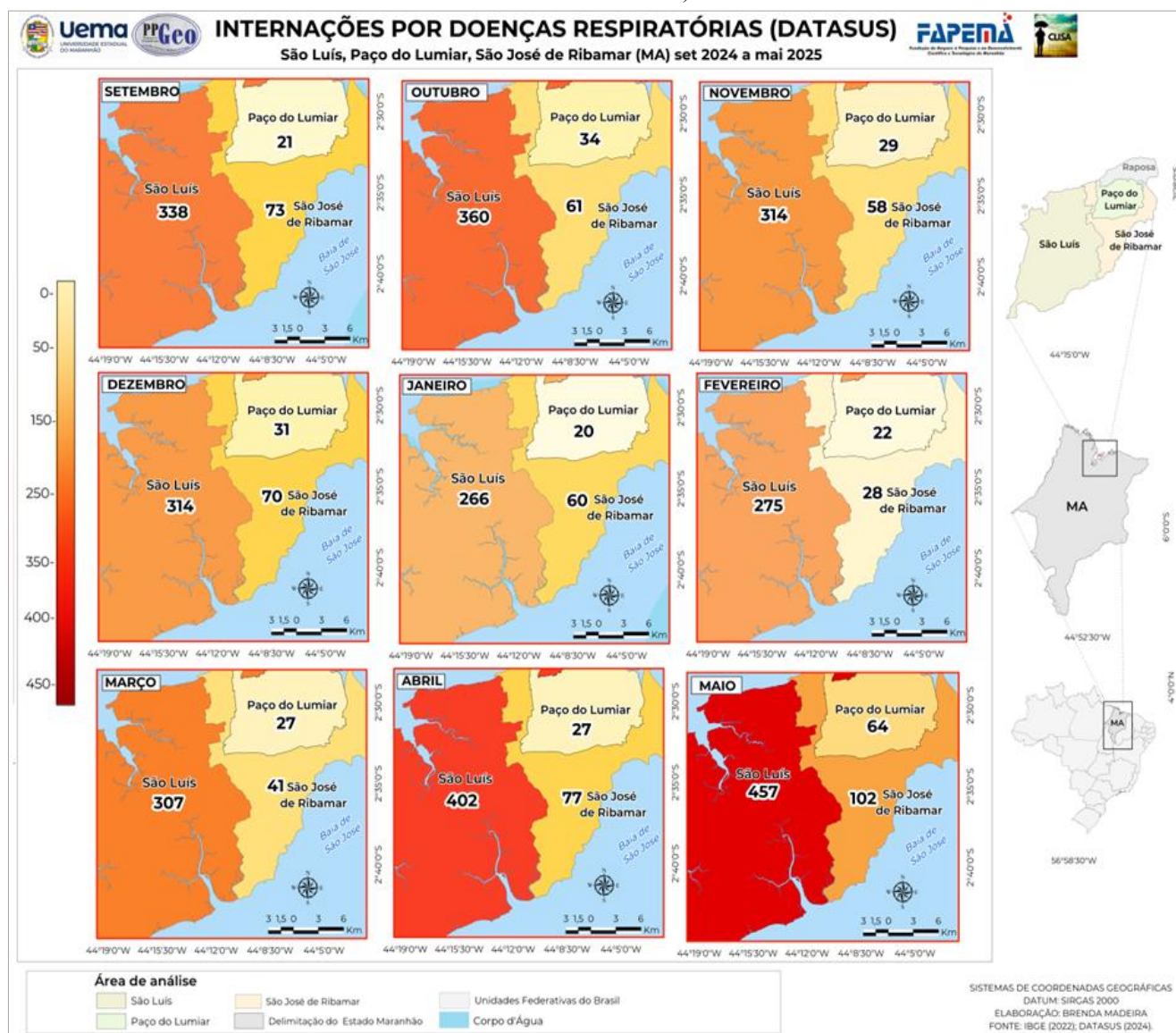
Gráfico 48 - Internações e óbitos por doenças respiratórias - DATASUS (set. de 2024 a mai. de 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa evolução pode ser observada de forma mais clara na Figura 56, que consolida visualmente o comportamento temporal das internações e dos óbitos, facilitando a identificação do período de maior agravamento das doenças respiratórias nos municípios.

Figura 56 - Internações por doenças respiratórias em São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar (set. de 2024 a mai. de 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

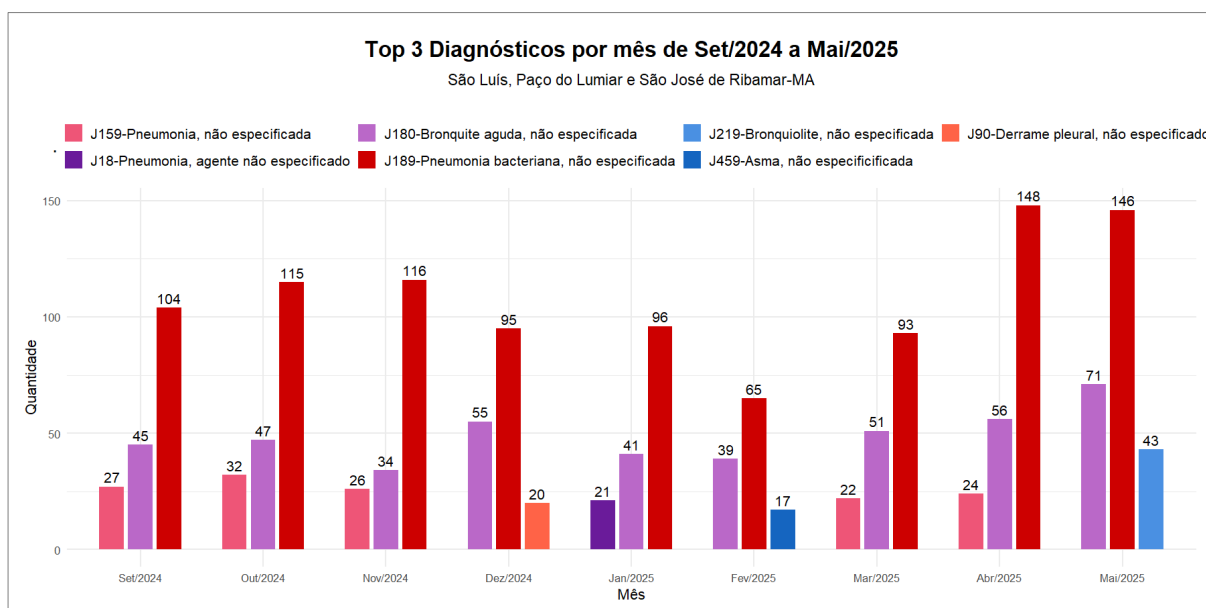
Embora o Gráfico 43 demonstre que as concentrações de $PM_{2.5}$ atingem seus maiores valores no período seco, é no período chuvoso que se registra o aumento mais expressivo dos casos de doenças respiratórias. Esse aparente descompasso não invalida a relação entre poluição atmosférica e adoecimento; ao contrário, revela que, no contexto climático da Ilha do Maranhão, os fatores meteorológicos, como a alta umidade e as oscilações térmicas, exercem um peso maior na deflagração e no agravamento desses quadros.

No início da estação chuvosa, a combinação entre a elevação da umidade relativa, a redução das temperaturas médias e a maior circulação de vírus respiratórios cria um ambiente altamente propício para o surgimento e a intensificação das infecções. Além disso, a exposição prévia a concentrações mais altas de poluentes no período seco pode atuar como um fator

acumulativo, aumentando a vulnerabilidade da população justamente quando as condições climáticas passam a favorecer a disseminação de agentes patogênicos.

Diante desse comportamento, torna-se particularmente relevante apresentar o gráfico com os principais tipos de doenças respiratórias registrados ao longo do período. A identificação dos diagnósticos mais frequentes, sobretudo aqueles fortemente associados a agentes virais, como pneumonias inespecíficas, bronquites e bronquiolites, permite compreender com maior precisão quais quadros clínicos respondem mais intensamente às mudanças sazonais típicas do clima da Ilha do Maranhão (Gráfico 49).

Gráfico 49 - Top 3 Diagnósticos Respiratórios Predominantes - DATASUS (set. de 2024 a mai. de 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O Gráfico 49 revela que as pneumonias, especialmente a bacteriana (J18.9), predominam de forma marcante ao longo de todo o período analisado nos municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar. Observa-se que os valores permanecem elevados entre setembro e março, mas apresentam um aumento expressivo em abril e maio, meses em que as notificações ultrapassam 140 casos, coincidindo com o auge da estação chuvosa. Esse padrão indica uma forte influência da sazonalidade climática sobre o adoecimento respiratório, caracterizada pela maior circulação viral e por condições ambientais mais favoráveis ao agravamento de infecções nesse período, conforme já ilustrado no Gráfico 49.

Diagnósticos complementares, como bronquite aguda e bronquiolite aguda (J18.0 / J21.9), acompanham essa tendência, com aumentos moderados na transição para o período chuvoso. Condições menos frequentes, como o derrame pleural (J90) e a asma (J45.9),

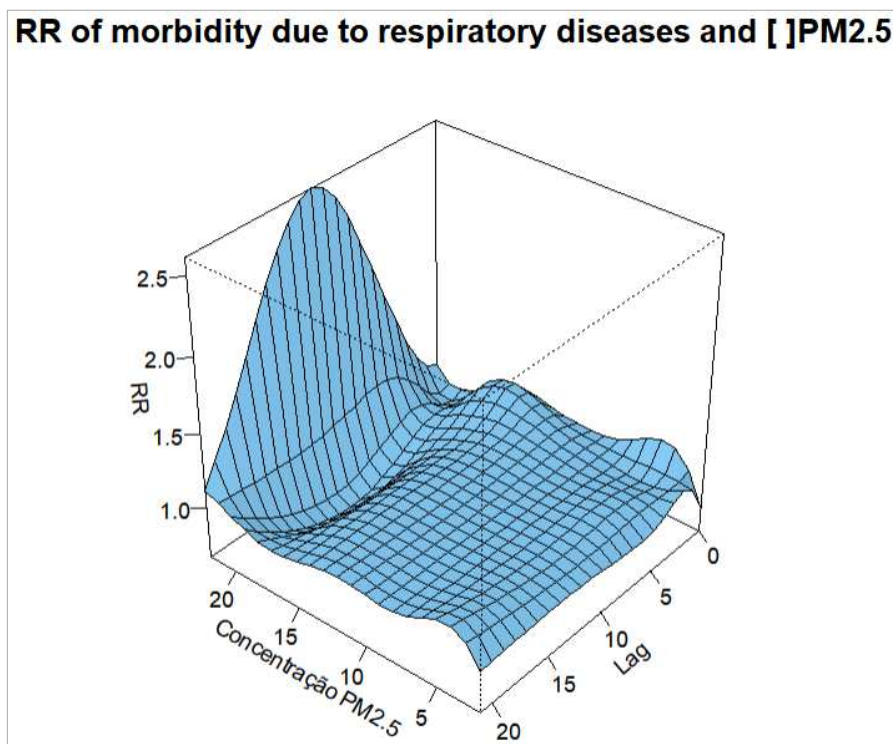
aparecem de forma esporádica, mas também refletem o mesmo comportamento temporal (Gráfico 49).

4.6.2 Avaliação do DLNM e da Regressão Múltipla *Stepwise* para validação do PM_{2.5}

Considerando que as correlações entre as variáveis climáticas e o poluente resultaram em valores muito baixos, e observando a forte influência da sazonalidade climática sobre as internações por doenças respiratórias, optou-se por analisar de forma isolada os efeitos diretos do PM_{2.5} sobre esses agravos. Para isso, aplicou-se o modelo *Distributed Lag Nonlinear Model* (DLNM), que possibilitou captar relações não lineares e defasadas entre a exposição à concentração do poluente e o risco de internação ao longo dos dias (Gráfico 50).

Quando analisado com a inclusão dos potenciais fatores de confusão (umidade relativa do ar, velocidade do vento e temperatura), o PM_{2.5} apresentou efeito significativo sobre as internações por doenças respiratórias apenas em concentrações superiores a 20 µg/m³, com uma defasagem temporal aproximada de 10 dias. Nessas condições, observou-se que a concentração de 20 µg/m³ está associada a um aumento de aproximadamente 150% no risco relativo (RR) de internação, evidenciando um efeito expressivo do poluente em situações de maior concentração e em períodos subsequentes à exposição (Gráfico 50).

Gráfico 50 - DLNM PM_{2.5} (set. de 2024 a mai. de 2025)



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Após a aplicação do modelo DLNM, e visando verificar se as variáveis climáticas possuem maior associação com o número de internações do que a poluição, considerou-se pertinente realizar um modelo de regressão múltipla com seleção *Stepwise*. O objetivo dessa abordagem adicional foi examinar se as variáveis climáticas apresentam, de fato, o maior poder explicativo sobre a variável dependente "casos" quando comparadas às demais variáveis, conforme detalhado nos resultados a seguir (Figuras 57 e 58).

Na Figura 57, é possível observar a comparação do AIC de três modelos, considerando o número de internações como variável resposta. No primeiro modelo, observa-se o AIC inicial (referente ao intercepto, $CASOS \sim 1$) e, logo abaixo, os valores de AIC resultantes da adição de novas variáveis. Como resultado do processo de seleção, somente as variáveis UR e $PM_{2.5}$ obtiveram um menor valor de AIC em relação ao intercepto.

No segundo modelo, utilizando a variável UR como preditora e acrescentando as demais, observa-se que somente a Vv (velocidade do vento) e o $PM_{2.5}$ apresentaram melhores resultados do que somente $CASOS \sim UR$.

Por último, no modelo final, nota-se que o acréscimo de novas variáveis ao modelo $CASOS \sim UR + Vv$ não o tornaria mais ajustado, pois resultaria no aumento do valor de AIC. Portanto, este foi considerado o melhor modelo explicativo para os dados de internação por doenças respiratórias.

O modelo final selecionado pelo *Stepwise* foi composto pelas variáveis UR e Vv (Figura 57):

Figura 57 - Seleção de variáveis por *Stepwise* (set. de 2024 a mai. de 2025)

```

Start:  AIC=903.76
CASOS ~ 1

      Df Sum of Sq    RSS    AIC
+ UR   1    86.282 7338.8 902.57
+ PM2.5 1    67.341 7357.7 903.27
<none>          7425.1 903.76
+ T     1    42.107 7383.0 904.21
+ dow   1    38.861 7386.2 904.33
+ Vv    1     1.882 7423.2 905.69

Step:  AIC=902.57
CASOS ~ UR

      Df Sum of Sq    RSS    AIC
+ Vv    1   261.305 7077.5 894.67
+ PM2.5 1   121.027 7217.8 900.03
<none>          7338.8 902.57
+ dow    1    41.874 7296.9 903.01
- UR     1    86.282 7425.1 903.76
+ T      1    11.431 7327.3 904.14

Step:  AIC=894.67
CASOS ~ UR + Vv

      Df Sum of Sq    RSS    AIC
<none>          7077.5 894.67
+ PM2.5 1     44.32 7033.2 894.95
+ dow    1     42.10 7035.4 895.04
+ T      1      9.90 7067.6 896.29
- Vv     1   261.31 7338.8 902.57
- UR     1   345.70 7423.2 905.69

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Esse modelo apresentou significância, como mostrado pelo teste $F = 6.63$ com $p = 0.0015$, indicando que o conjunto das variáveis explica uma parte significativa da variação dos casos. Além disso, tanto a UR ($p = 0.000337$) quanto a Vv ($p = 0.00177$) foram estatisticamente significativas individualmente, mostrando que ambas estão associadas ao número de internações. Outras variáveis, como o PM_{2.5}, a temperatura e o dia da semana, foram testadas no *stepwise*, mas não melhoraram o AIC e, por isso, não foram incluídas no modelo final.

Por fim, a análise da relação entre o material particulado e as internações mostrou que, embora o PM_{2.5} seja amplamente reconhecido na literatura como um poluente associado ao aumento do risco de doenças respiratórias, ele não apresentou, neste conjunto de dados, maior capacidade explicativa do que as variáveis meteorológicas. (Figura 58).

Figura 58 - Modelo Final de Regressão Múltipla

```
Call:
lm(formula = CASOS ~ UR + Vv, data = bd)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-10.6189  -3.2416  -0.4971   2.5526  29.0475

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  48.5537     9.8064   4.951 1.3e-06 ***
UR           -0.3731     0.1027  -3.632 0.000337 ***
Vv           -2.8034     0.8879  -3.157 0.001773 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.12 on 270 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.04681, Adjusted R-squared:  0.03975
F-statistic:  6.63 on 2 and 270 DF, p-value: 0.001545
```

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

O modelo de regressão linear múltipla indicou que, de acordo com os critérios estatísticos e com os valores de AIC, a umidade relativa e a velocidade do vento apresentaram maior contribuição para a variação no número de internações do que o $PM_{2.5}$. No entanto, o baixo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,03$) indica que o modelo explica apenas uma pequena parcela da variabilidade observada nas internações por doenças respiratórias. Esse resultado sugere que a dinâmica dessas doenças é fortemente multifatorial, sendo influenciada por fatores não contemplados no modelo, como condições socioeconômicas, saneamento básico, características demográficas, circulação de agentes infecciosos e acesso aos serviços de saúde. Assim, embora as variáveis climáticas e ambientais tenham apresentado uma associação estatisticamente significativa, elas não são suficientes para explicar, de forma isolada, o padrão observado de internações no período analisado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa evidenciam que as características climáticas regionais, associadas às formas de ocupação e uso do solo urbano, influenciam diretamente o conforto térmico nas áreas comerciais, a qualidade do ar e os agravos respiratórios nos municípios de São Luís, Paço do Lumiar e São José de Ribamar (MA).

A aplicação do transecto móvel revelou variações espaciais consistentes da temperatura do ar e da umidade relativa, indicando a presença de ilhas de calor urbanas tanto no período seco quanto no chuvoso. Embora o período chuvoso apresente temperaturas médias ligeiramente menores e aumento da umidade relativa, as diferenças observadas entre dias úteis e finais de semana, mesmo que pouco expressivas (período seco $-0,08$ °C às 15h e $+0,53$ °C às 20h) (período chuvoso $-1,81$ °C às 15h e $-0,71$ °C às 20h), confirmaram a influência da intensidade do uso do espaço urbano no comportamento térmico local.

Os índices de conforto térmico HI evidenciaram situações recorrentes de risco à saúde, com predominância das classes de “Perigo” e “Perigo extremo” no período seco; embora o período chuvoso tenha apresentado um aumento de condições mais confortáveis, ocorreram picos pontuais acima de 55 °C. A TE confirmou que o desconforto térmico é contínuo e estrutural; assim, embora utilizem escalas distintas, ambos os índices convergem ao apontar que o ambiente térmico das áreas comerciais é inadequado. As médias mensais indicaram maior intensidade de desconforto térmico no João Paulo, seguido pela Cohab, enquanto a Cidade Operária apresentou valores intermediários e o Maiobão, os menores índices.

A percepção térmica dos usuários mostrou-se coerente com os índices, indicando que essas áreas comerciais funcionam como importantes centralidades urbanas, o que amplia o tempo de exposição às condições ambientais adversas. Os usuários, predominantemente jovens adultos e com uma pequena parcela com comorbidades, que frequentam esses espaços para trabalho e consumo, relataram desconforto térmico, apresentando sintomas como dor de cabeça, cansaço e tontura.

No que se refere à qualidade do ar, as concentrações de $PM_{2.5}$ apresentaram variação sazonal, com valores mais elevados no período seco, atingindo picos superiores a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e redução durante o período chuvoso. As análises indicaram fraca associação com a temperatura do ar, correlação negativa com a umidade relativa e correlações fracas com a precipitação ($r = -0,04$) e com a velocidade do vento ($r = 0,10$).

A modelagem por meio do *Distributed Lag Nonlinear Model* (DLNM) revelou que o material particulado fino exerce efeito significativo apenas em níveis elevados de exposição,

superiores a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e com uma defasagem temporal aproximada de 10 dias, momento em que se observou um aumento de cerca de 150% no risco relativo de internação.

A regressão múltipla, indicou a umidade relativa do ar ($p = 0,000337$) e a velocidade do vento ($p = 0,00177$) como variáveis mais explicativas; contudo, o baixo coeficiente de determinação ($R^2 = 0,03$) evidencia o caráter multifatorial das internações por doenças respiratórias. Isso evidencia a necessidade de incorporar outras variáveis explicativas, como renda, saneamento básico e acesso aos serviços de saúde.

De modo geral, os resultados reforçam a influência do clima urbano e da qualidade do ar sobre a saúde da população e apontam a necessidade de estratégias integradas de planejamento urbano voltadas à mitigação do desconforto térmico, à melhoria da ventilação e à ampliação de áreas verdes, principalmente em áreas comerciais de intensa circulação.

Considerando que essas áreas se estendem ao longo de vias urbanas com grande fluxo de pedestres e veículos, e que a população que nelas trabalha ou permanece por longos períodos necessita de espaços protegidos e adequados ao bem-estar, torna-se essencial adotar intervenções combinadas, por meio de abrigos climáticos, reorganização do mobiliário e medidas de controle da poluição veicular, com o intuito de evitar a exposição às condições adversas.

Ao mesmo tempo, é fundamental ampliar estudos aplicados sobre microclima urbano e exposição ocupacional, integrando indicadores climáticos, de qualidade do ar e aspectos socioeconômicos. Tal integração é essencial para subsidiar políticas públicas e normas urbanísticas que garantam espaços comerciais resilientes, saudáveis e socialmente justos.

O aprofundamento dessas análises depende da superação de limitações técnicas e institucionais identificadas nesta pesquisa. A rede meteorológica oficial, por não contemplar adequadamente a diversidade de usos do solo, exigiu o emprego de técnicas alternativas que, embora relevantes, não dispõem de séries históricas longas, que ampliariam o poder explicativo dos levantamentos realizados.

De forma semelhante, o monitoramento da poluição atmosférica na Ilha do Maranhão apresentou obstáculos significativos. Além de estar presente em um ponto da ilha, registrou instabilidades operacionais durante o período analisado. Soma-se a isso a limitação no acesso aos dados, que, disponibilizados apenas em tempo real, inviabiliza análises retrospectivas diretas, exigindo o recurso a fontes alternativas para possibilitar a compreensão da qualidade do ar no município.

REFERÊNCIAS

- ALBAHAR, S.; LI, J.; AL-ZOUGHLOO, M.; AL-HEMOUD, A.; GASANA, J.; ALDASHTI, H.; ALAHMAD, B. Air pollution and respiratory hospital admissions in Kuwait: the epidemiological applicability of predicted PM_{2.5} in arid regions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 19, p. 5998, 2022.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, ed. esp., 2019.
- AMORIM, M. C. C. T. **O clima urbano de Presidente Prudente/SP**. 2000. 368 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/8/8135/tde-26122022-144828/>. Acesso em: 19 jan. 2026.
- ARAÚJO, R. R. **Clima e vulnerabilidade socioespacial**: uma avaliação dos fatores de risco na população urbana do município de São Luís (MA). 2014. 289 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2014.
- ARBEX, M. A.; SANTOS, U. P.; MARTINS, L. C.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; BRAGA, A. L. F. A poluição do ar e o sistema respiratório. **Jornal Brasileiro de Pneumologia, Brasília**, v. 38, n. 5, p. 643–655, 2012.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.
- BETZEK, N. M. **Módulos computacionais de análise geoestatística e retificação de zonas de manejo**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.
- BLAZEJCZYK, K.; EPSTEIN, Y.; JENDRITZKY, G.; STAIGER, H.; TINZ, B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. **International Journal of Biometeorology**, v. 56, p. 515–535, 2012. DOI: 10.1007/s00484-011-0453-2. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-011-0453-2>. Acesso em: 10 jul 2025.
- BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2 set. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 19 maio 2025.
- BRASIL. Ministério da Saúde. DATASUS – Departamento de Informática do SUS. **Informações de Saúde (TABNET)**. Disponível em: <https://datasus.saude.gov.br/informacoes-de-saude-tabnet/>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 130, p. 133, 9 jul. 2024.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Relatório anual de acompanhamento da qualidade do ar 2023**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023.

CARVALHO, M. M. **Clima urbano e conforto térmico humano**. 2006. 209 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COELHO, A.; CORRÊA, W. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31, 2013.

CORRÊA, R. L. **O espaço urbano**. São Paulo: Ática, 1989.

DAPPER, S. N.; SPOHR, C.; ZANINI, R. R. Poluição do ar como fator de risco para a saúde: uma revisão sistemática no estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, [S. l.], v. 30, n. 86, p. 83–97, 2016.

DOSIO, A.; FISCHER, E. M.; SCHILDGEN, T. F.; SCHOETTER, R. Urban growth and heat in Tropical Climates. **Frontiers in Ecology and Evolution**, [S. l.], v. 9, p. 1-21, 13 ago. 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/ecology-and-evolution/articles/10.3389/fevo.2021.616626/full>. Acesso em: 8 ago. 2025.

EVELYN, J. **Fumifugium**: or the inconvenience of the aer and smoak of London dissipated. London: [s.n.] 1661. Disponível em: https://archive.org/details/bim_early-english-books-1641-1700_fumifugium-or-the-incon_evelyn-john_1661. Acesso em: 19 jan. 2026.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 15-28, dez. 2005.

FERREIRA JÚNIOR, J. J.; DANTAS, M. J. F. Análise do albedo da superfície e índices de vegetação por sensoriamento remoto na bacia hidrográfica do rio Pacotí/CE. **Revista Tecnologia**, Fortaleza, v. 39, n. 2, p. 1-18, 2018. DOI: 10.5020/23180730.2018.8132. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/8132>. Acesso em: 21 fev. 2026.

FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. **Acta Geográfica**, Boa Vista, ed. esp. Climatologia Geográfica, p. 61-76, 2012.

FOWLER, D.; BRIMBLECOMBE, P.; BURROWS, J.; HEAL, M. R.; GRENNFELT, P.; STEVENSON, D. S.; JOWETT, A.; NEMITZ, E.; COYLE, M.; LIU, X.; CHANG, Y.; FULLER, Gary W.; SUTTON, M. A.; KLIMONT, Z.; UNSWORTH, M. H.; VIENO, M. A chronology of global air quality. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 378, n. 2183, p. 1–21, 2020.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FRANÇA, L. M. A.; SANTOS, M. S.; LINS, T. M. P.; PEREIRA, J. A. S.; GALVÍNCIO, J. D. Análise do desconforto térmico causado pela ilha de calor urbana em Recife-PE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2015, p. 5842-5849.

FREITAS, C. U.; PONCE DE LEON, A.; JUNGER, W.; GOUVEIA, N. Poluição do ar e impactos na saúde em Vitória, Espírito Santo. **Revista de Saúde Pública**, v. 50, n. 4, 2016.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GASPARINNI, A. **Distributed lag linear and non-linear models for time series data**. London: London School of Hygiene and Tropical Medicine, 2014.

GOBO, J.; GALVANI, E. Referencial técnico e teórico-metodológico aplicado a estudos de conforto humano em ambientes externos. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 33, p. 132–157, 2016.

GOUVEIA, N.; KEIDE, G. M.; ANDREAZZI, M. A. R. Impactos da poluição do ar sobre a saúde no Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 10, p. 3773–3781, 2019. Disponível em: <https://www.scielosp.org/article/csc/2019.v24n10/3773-3781/>. Acesso em: 6 jan. 2026.

GUARIEIRO, L. L. N.; VASCONCELLOS, P. C.; SOLCI, M. C. Poluentes atmosféricos provenientes da queima de combustíveis fósseis e biocombustíveis: uma breve revisão. **Revista Virtual de Química**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 434–445, 2011. Disponível em: <https://www.uff.br/rvq>. Acesso em: 6 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ma.html>. Acesso em: 20 ago. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa Brasil Climats**. Escala 1:5.000.000. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias>. Acesso em: 10 out. 2023.

IKEFUTI, P. V. **Associação entre variáveis meteorológicas, índice climático, fatores socioeconômicos e mortalidade por doenças do aparelho circulatório (acidente vascular cerebral e embolia pulmonar) no município de São Paulo - SP**. 2016. 148 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS. **Espacialização das empresas em São Luís**. São Luís: 2019. Disponível em: <https://imesc.ma.gov.br/portal/Post/view/territoriais/364>. Acesso em: 20 ago. 2024.

IQAIR. **Qualidade do ar em São Luís**. [S. l.]: IQAir, 2025. Disponível em: <https://www.iqair.com/brazil/maranhao/sao-luis>. Acesso em: 29 maio 2025.

KRELING, B. E.; TONET, C.; TIEMANN, F. D. R.; SCHNEIDER, G. A.; DIERINGS, T. A.; UHRY, D.; PIMENTA, B. D. Georreferenciamento e geoprocessamento de dados: uma revisão sobre combinação de bandas e índices de vegetação. In: GUIMARÃES, G. B. (org.). **Ciências agrárias: estudos sistemáticos e pesquisas avançadas 4**. Ponta Grossa: Atena, 2023. p. 132-149. Disponível em: <https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/ciencias-agrarias-estudos-sistematicos-e-pesquisas-avancadas-4>. Acesso em: 10 out. 2025.

LACERDA, P. F. A. C. O papel do método misto na análise de processos de mudança em uma abordagem construcional: reflexões e propostas. **Revista Linguística**, Rio de Janeiro, v. esp., p. 83-101, dez. 2016.

LANDSBERG, H. E. The climate of towns. In: THOMAS, W. E., ec., *Man's role in changing the face of earth*. p. 584-606.

LEAL, L. R.; PALAORO, L. B.; XAVIER, T. C.; OLIVEIRA, W. D.; FIALHO, E. S.; ALVAREZ, C. E. Análise de Índices de Conforto Térmico Urbano associados às Condições Sinóticas de Vitória (ES), Brasil. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE REABILITAÇÃO URBANA E CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2., 2017, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: :

Universidade Federal do Espírito Santo, 2017, p. 363-372. Disponível em: <https://lpp.ufes.br/sites/lpp.ufes.br/files/field/anexo/analise.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2025.

LI, D.; BOU-ZEID, E. Synergistic interactions between urban heat islands and heat waves: the impact in cities is larger than the sum of its parts. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, Boston, v. 52, n. 9, p. 2051–2064, 2013.

LIGUORI, I. N.; MONTEIRO, L. M. Surface urban heat island and geospatial indicators: comparative decadal assessment. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, e138042, 2024.

LOMBARDO, M. A. **A ilha de calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo, SP: Hucitec, 1985.

MARINHA DO BRASIL. Centro de Hidrografia da Marinha. **Carta Sinótica de Superfície**. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MELO, D. H.C.T.; SILVA, H. M.; BRITO, P. L.; MENEZES, L. A. Sistema de informação geográfica: uma análise sobre o desenvolvimento técnico, tecnológico, acadêmico e conceitual. **Revista MundoGEO**, v. 17, n. 83, 2015.

MIRAGLIA, S. G. K.; GOUVEIA, N. Custos da poluição atmosférica nas regiões metropolitanas brasileiras. **Ciência & Saúde Coletiva**, [S. l.], v. 19, n. 10, p. 4141–4147, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.org/pdf/csc/2014.v19n10/4141-4147/pt>. Acesso em: 19 mai. 2025.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. 1976. 181 f. Tese (Livre Docência em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/564201428/Monteiro-teoria-e-Clima-Urbano>. Acesso em: 20 jun. 2025.

MONTEIRO, C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **Geosul**, Florianópolis, v. 5, n. 9, p. 61-79, jan./jul. 1990.

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, p. 1-21, 1971.

MONTEIRO, C. A. de F. De tempos e ritmos: entre o cronológico e o meteorológico para a compreensão geográfica dos climas. **Geografia**, Rio Claro, v. 26, n. 3, p. 131-154, dez. 2001.

NÓBREGA, R. S.; LEMOS, T. V. S. O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia (Recife)**, Recife, v. 28, n. 1, p. 93–109, 2011.

NORTON, B. A.; COUTTS, A. M.; LIVESLEY, S. J.; HARRIS, R. J.; HUNTER, A. M.; WILLIAMS, N. S. G. Planning for cooler cities: a framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, [S. l.], v. 134, p. 127-138, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>. Acesso em: 8 ago. 2025.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuen, 1974.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2. ed. London: Routledge, 1987.

OKE, T. R. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 7, p. 769-779, 1973.

OLIVA, F. G. Climatologia e variabilidade dos principais sistemas meteorológicos atuantes no Brasil, relação com chuvas intensas e impactos associados. **GeoPUC**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 23, p. 74-99, jul./dez. 2019.

OLIVEIRA, C. H. **Planejamento ambiental na cidade de São Carlos (SP)**. 1996. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1996.

OLIVEIRA, L. D. Cinquenta anos das Conferências Ambientais da Organização das Nações Unidas: qual é o legado para as condições de saúde humana? **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 38, n. 12, e00130522, 2022.

PAULA, R. Z. R. **A influência da vegetação no conforto térmico do ambiente construído**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

PEREIRA, A. R. **Análise do conforto térmico para usuários de uma moradia universitária e do desempenho térmico de sua envoltória**. 2019. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

PINHEIRO, J. M. **Clima urbano da cidade de São Luís do Maranhão**. 2018. 242 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PINHEIRO, J. M. **Clima urbano da cidade de São Luís do Maranhão**. São Luís: Editora UICLAP, 2022.

PORANGABA, F. O.; AMORIM, M. C. C. T. Geotecnologias aplicadas à análise de ilhas de calor em cidades paulistas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2041–2050, 2019.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terræ Didática**, Campinas, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012.

RIBEIRO, A. G. A construção da Climatologia Geográfica no Brasil: a contribuição de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 14, p. 45-61, 2000.

RIBEIRO, H.; PESQUERO, C. R.; COELHO, M. S. Z. S. Clima urbano e saúde: uma revisão sistematizada da literatura recente. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 86, p. 67–82, 2016.

RUTTEN, S.; SUMALINAB, B.; GRESSANI, O.; NEYENS, T.; DUARTE, E.; HENS, N.; FAES, C. Distributed lag non-linear models with Laplacian-P-splines for analysis of spatially structured time series. **arXiv**, [S. l.], p. 1-26, 2025. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2506.04814v1>. Acesso em: 5 fev. 2026.

SANTOS, L.; ALEIXO, N. Subsistema físico-químico: uma relação entre o material particulado fino e as internações por pneumonia em Manaus, Amazonas, Brasil. **Estrabão**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 183–198, 2024. DOI: 10.53455/re.v5i1.230. Disponível em: <https://revista.estrabao.press/index.php/estrabao/article/view/230>. Acesso em: 6 jan. 2026.

SANTOS, M. **A urbanização brasileira**. São Paulo: Hucitec, 1993.

SANTOS, R. L.; ANDRADE, H. O. Avaliação quantitativa do conforto térmico de uma cidade em área de transição climática: Feira de Santana-Bahia, Brasil. **Revista de Geografia Norte Grande**, Santiago, n. 40, p. 77-84, 2008.

SÃO LUÍS. Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes. **Plano de Mobilidade Urbana de São Luís – MA**. São Luís: SMTT, 2024. Disponível em: https://saoluis.ma.gov.br/midias/anexos/2217_etapa_9_plano_de_mobilidade.pdf. Acesso em: 20 ago. 2024.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geodiversidade da Ilha do Maranhão: levantamento da geodiversidade – nota explicativa**. Teresina: CPRM, 2020.

STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part I: a temperature-humidity index. **Journal of Applied Meteorology**, [S. l.] v. 18, p. 874–885, 1979. Disponível em: https://meteoengins.fr/documents/davis/The_assessment_of_Sultriness_PART_I_RGSteadman_1979.pdf. Acesso em: 9 out. 2023.

THOM, E. C.; BOSEN, J. F. The discomfort index. **Weatherwise**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 57-60, 1959.

TOMMASELLI, J. T. G. **Planilha de cálculo para estimativa da temperatura do bulbo-úmido (Tu) a partir das medidas da temperatura do bulbo seco (T) e da umidade relativa (UR)**. Presidente Prudente, 2007.

TORRES, L. M.; PINHEIRO, C. D. P. S.; AZEVEDO, S. D.; RODRIGUES, P. R. S.; SANDIM, D. P. R. Poluição atmosférica em cidades brasileiras: uma breve revisão dos impactos na saúde pública e meio ambiente. **Naturae**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 23-33, 2020. DOI: 10.6008/CBPC2674-6441.2020.001.0003. Disponível em: <https://www.sapientiae.com.br/index.php/naturae/article/view/CBPC2674-6441.2020.001.0003>. Acesso em: 10 jan. 2026.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Infográfico sobre material particulado (PM)**. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>. Acesso em: 16 jan. 2026.

UGEDA JÚNIOR, J. C.; AMORIM, M. C. C. T. Reflexões sobre o Sistema Clima Urbano e sua aplicabilidade. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. esp., p. 160-173, 2016. Disponível em: https://revistas.usp.br/rdg/pt_BR/issue/archive. Acesso em: 1 out. 2023.

VIEGAS, C.; DIAS, M.; ALMEIDA, B.; VICENTE, E.; CAETANO, L. A.; CAROLINO, E.; ALVES, C. Settleable dust and bioburden in Portuguese dwellings. **Microorganisms**, Basel, v. 8, n. 11, p. 1-18, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/8/11/1799>. Acesso em: 15 jan. 2025.

WENG, Q.; FU, P.; GAO, F.. Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, [S. l.], v. 145, p. 55-67, 2014.

WICHMANN, J.; VOYI, K. Ambient air pollution exposure and respiratory, cardiovascular and cerebrovascular mortality in Cape Town, South Africa: 2001–2006. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, Basel, v. 9, n. 11, p. 3979–3996, 2012.

ZITER, C. D.; PEDERSEN, E. J.; KUCHARIK, C. J.; TURNER, M. G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat

during summer. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, DC, v. 116, n. 15, p. 7575-7580, 2019. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1817561116>. Acesso em: 8 ago. 2025.

WANDERLEY, L. S. de A.; NÓBREGA, R. S. Desenvolvimento de um novo sistema de classificação climática com base na metodologia dos tipos de tempo sinóticos para a região Nordeste do Brasil. **Geosp**, São Paulo, v. 26, n. 1, e-175243, abr. 2022.

ANEXO I - QUESTIONÁRIO CONFORTO TÉRMICO



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE EDUCAÇÃO CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS – CECEN
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA, NATUREZA E
DINÂMICA DO ESPAÇO – PPGeo



QUESTIONÁRIO

1. Idade:

2. Sexo: (H) Homem (M) Mulher

3. Município (abreviar) e bairro que reside.

4. Possui alguma comorbidade diagnosticada (especificar)? () Sim () Não

Avaliando conforto térmico:

5) Você utiliza este ambiente para:

- a) Resido nas proximidades
- b) Consumidor
- c) Trabalho
- d) Estudo
- e) Outro: _____

6) Tempo de permanência neste ambiente comercial:

- a) 1 a 2 vezes na semana
- b) 3 a 4 vezes na semana
- c) Todos os dias da semana
- d) Todos os dias
- e) Apenas finais de semana

7. Principal atividade exercida:

- a) Leve
- b) Moderada
- c) Vigorosa

8. Que tipo de roupa você está usando?

- a) Leve
- b) Moderada
- c) Quente

9. Descreva seu nível de conforto térmico geral para este ambiente:

- a) Desconfortável
- b) Neutro
- c) Confortável

10. Apresenta algum sintoma recorrente após está neste local?

- a) Tosse
- b) Irritação nos olhos
- c) Dificuldade para respirar
- d) Dor de cabeça
- e) Cansaço
- f) Tontura
- g) Nenhum
- h) Outros (especificar)



Emitido em 03/03/2026

DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS Nº 217/2026 - DPARQ (11.14.68.07.05)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 03/03/2026 10:40)

CRISTIANE DE JESUS PEREIRA GASPAR

SECRETARIO III

866500

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sis.sig.uema.br/documentos/> informando seu número:
217, ano: **2026**, tipo: **DOCUMENTOS COMPROBATÓRIOS**, data de emissão: **03/03/2026** e o código de
verificação: **e80ab5ca73**

