

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS, AMBIENTAIS E DE**  
**TECNOLOGIAS**  
**MESTRADO EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA**

**MARCELO REZENDE CALÇA SOEIRA**

**A RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE VISÃO DO CÉU E**  
**A TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES ZONAS**  
**CLIMÁTICAS LOCAIS**

**Campinas**

**2018**

**MARCELO REZENDE CALÇA SOEIRA**

# **A RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE VISÃO DO CÉU E A TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, para o exame de defesa, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.

Orientadora: Profa. Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto

**PUC-CAMPINAS**

**2018**

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

551.66 Soeira, Marcelo Rezende Calça.  
S681r A relação entre o fator de visão do céu e a temperatura do ar em diferentes zonas climáticas locais/ Marcelo Rezende Calça Soeira.-  
Campinas: PUC-Campinas, 2018.  
116f.: il.

Orientadora: Cláudia Cotrim Pezzuto.  
Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018  
Inclui anexo e bibliografia.

1. Ilha de calor urbana. 2. Zonas climáticas. 3. Temperatura atmosférica. I. Pezzuto, Cláudia Cotrim. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. III. Título.

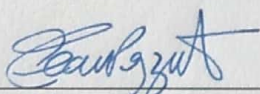
CDD – 23. ed. 551.66

**MARCELO REZENDE CALÇA SOEIRA**

**A RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE VISÃO DO CÉU E A  
TEMPERATURA DO AR EM DIFERENTES ZONAS  
CLIMÁTICAS LOCAIS**

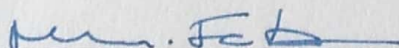
Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias da Pontifícia Universidade Católica de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.  
Orientador (a): Prof. (a). Dr. (a). Claudia Cotrim Pezzuto.

Dissertação defendida e aprovada em 28 de janeiro de 2019 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:



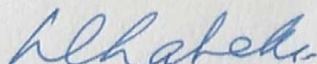
---

Prof. Dra. Claudia Cotrim Pezzuto  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dr. Marcius Fabius Henriques de Carvalho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas



---

Prof. Dra. Lucila Chebel Labaki  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo sacrifício e dedicação em prover as condições para a minha formação. Ao meu irmão, por ser sempre uma inspiração.

À Maria Raquel Venturini, pela paciência e companheirismo nessa jornada.

À Profa. Dra. Cláudia Cotrim Pezzuto, pela dedicação e sabedoria em todos os anos de orientação, desde a graduação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana que em maior ou menor grau contribuíram com o conhecimento necessário para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos funcionários da Secretaria de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, em especial ao Kaine A. Antônio, pelas inúmeras orientações quanto aos regulamentos e prazos do programa.

Aos funcionários do Laboratório de Conforto Ambiental da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, em especial ao Fabiano Cruz, pelo apoio durante a pesquisa.

À Prefeitura de Campinas, nas pessoas da Arq. Carolina Baracat do Nascimento Lazinho, Msc. Sylvia Regina Domingues Teixeira, Dra. Maria Conceição Silvério Pires e Dr. Rogério Rodrigues Amarante pelo fornecimento dos dados espaciais fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa.

À Profa. Dra. Priscila Pereira Coltri e aos demais funcionários do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura pelo acesso à estação meteorológica e apoio na etapa de calibração dos equipamentos, assim como pelo fornecimento de dados atmosféricos.

Às pessoas, estabelecimentos e instituições que cederam o espaço físico para a instalação dos sensores.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – Brasil (CAPES) – pela bolsa de estudos concedida (Código de Financiamento 001).

Aos tantos amigos que estiveram presentes nos momentos felizes e também nos outros, tornando tudo melhor.

Às pamonhas de ontem, de hoje e de amanhã.

## RESUMO

SOEIRA, Marcelo Rezende Calça. *A relação entre o fator de visão do céu e a temperatura do ar em diferentes zonas climáticas locais*. 2018. 115f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

A presente pesquisa teve como objetivo estimar e comparar as correlações entre o FVC e a variação da temperatura do ar encontradas em diferentes zonas climáticas situadas em um recorte da cidade de Campinas- SP. O fator de visão do céu (FVC) é um parâmetro adimensional utilizado para descrever a proporção de céu visível, em um determinado local, a partir do nível do solo. No ambiente urbano, seu valor está fortemente relacionado ao grau de compactação e verticalização da malha construtiva. Outro fenômeno relacionado ao grau de compactação e verticalização da malha urbana é o fenômeno da Ilha de Calor Urbana (ICU), caracterizado pela retenção do calor absorvido no ambiente construído. Por este motivo, é grande o número de pesquisas que estudam a correlação entre o FVC e o fenômeno da Ilha de Calor Urbana em diversas cidades do mundo. Através de métodos sistemáticos para o reconhecimento e documentação de heterogeneidades da malha urbana, como o método das Zonas Climáticas Locais (LCZs), que classifica áreas urbanas em zonas climáticas locais de acordo com sua tipologia construtiva e cobertura de superfícies, tornou-se possível avaliar a variação desta correlação em um contexto intramunicipal. Através de campanhas de medições móveis e de pontos fixos de monitoramento, a intensidade da ilha de calor urbana na área de estudo foi avaliada. A área de estudo foi classificada em onze LCZs de acordo com sete parâmetros urbanísticos obtidos por geoprocessamento (relação altura-largura, FVC, área edificada, área impermeável, área permeável, altura média dos elementos de rugosidade e classe de rugosidade). Regressões lineares foram estabelecidas entre a intensidade da ICU às 21:00 e valores de FVC (pontuais e médios para um raio de 100m) em áreas de análise correspondentes a oito LCZs. Para valores de FVC entre 0,20 e 0,45, a elevação aproximada da temperatura do ar em LCZs de arranjo compacto e verticalização baixa a média-alta é 1,5 a 2,2 °C; para valores de FVC entre 0,45 e 0,7 em LCZs de arranjo compacto e verticalização baixa e média-baixa, a elevação aproximada da temperatura do ar foi de 0,7 a 1,5 °C; e para valores de FVC entre 0,60 e 0,90 em LCZs de arranjo esparsos e verticalização baixa, a variação aproximada da temperatura do ar foi de 0,0 a -0,2 °C. Assim, conclui-se que a influência do FVC na elevação da temperatura do ar em áreas urbanizadas varia conforme a composição morfológica e superficial do tecido urbano. Para que o FVC seja utilizado efetivamente em estratégias de mitigação da ICU, essa relação deve ser considerada.

**Palavras chave:** fator de visão do céu, zonas climáticas locais, temperatura do ar, clima urbano, ilha de calor urbana.

## ABSTRACT

SOEIRA, Marcelo Rezende Calça. *The relationship between the sky view factor and air temperature across different local climate zones*. 2018. 115p. Dissertation (Master's in Urban Infrastructure Systems) – Postgraduate Program in Urban Infrastructure Systems, Pontifical Catholic University of Campinas, Campinas, 2018.

The objective of this research was to estimate and compare the Sky View Factor (SVF) and Urban Heat Island Intensity (UHII) correlation across different Local Climate Zones (LCZs) situated in the city of Campinas, São Paulo, Brazil. The SVF consists of a non-dimensional parameter which describes the ratio of visible sky from a given point in space. In the urban environment, SVF values are strongly related to buildings density and height. Also strongly related to the densification and verticalization of the urban tissue is the Urban Heat Island phenomenon, which is characterized by the elevation of air temperature in urban environments as a result of its impact on the surface energy balance. For this reason, research has been conducted in many countries to investigate the correlation between SVF and the UHII. To evaluate the effects of urban tissue composition on these correlations, however, systematic methods for detecting and reporting such composition are required. Employing the Local Climate Zones method, which classifies urban areas as climate zones according to their structural typology and surface cover, this research evaluated SVF-UHII correlation variations across different built up areas of the same city. Combining mobile measurements and stationary monitoring devices a map of the nocturnal UHII at the research site was obtained. According to seven parameters (H/W ratio; SVF; Built area; Permeable area; Impermeable area; Height of roughness elements; And roughness class), obtained by geoprocessing, eleven LCZs were identified at the site. Nocturnal UHII linear regressions were calculated for SVF values (point and 100m radius average values were used) at eight LCZs classes. At compact low, low-high, mid-low and high-mid rise LCZs (3, 3<sub>1</sub>, 2<sub>3</sub> and 1<sub>2</sub>), with SVF values between 0,20 and 0,45, the approximate air temperature increase ranged from 1,5 up to 2,2°C. At compact low and mid-low rise LCZs (3 and 2<sub>3</sub>), with SVF values between 0,45 and 0,7, the approximate air temperature increase ranged from 0,7 up to 1,2°C. For sparsely built low rise LCZs (6), with SVF between 0,60 and 0,90, the approximate air temperature variation ranged from -0,2 up to 0,0°C. From these results it was concluded that the correlation between SVF and UHII is influenced by the morphological and superficial composition of the urban tissue. Hence, to effectively utilize SVF in UHI mitigation strategies, these influences should be considered.

**Keywords:** sky view factor, local climate zones, air temperature, urban climate, urban heat island.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Temperaturas médias mensais para Londres e o campo, obtidas entre 1807 e 1816. ....	20
<b>Figura 2</b> – Temperaturas médias mensais obtidas entre 1807 e 1816. ....	20
<b>Figura 3</b> – Rede de estações climatológicas e sinópticas utilizadas nos estudos publicados em <i>The Climate of London</i> (CHANDLER, 1965).....	22
<b>Figura 4</b> – Isotermas da temperatura mínima em Londres em 30 de abril de 1959 .....	23
<b>Figura 5</b> – Isotermas da temperatura mínima em Londres em 14 de maio de 1959 .....	24
<b>Figura 6</b> – Isotermas da temperatura mínima em Londres em 2 de agosto de 1959 .....	25
<b>Figura 7</b> – Regressão linear entre a intensidade da UHI de 10 cidades norte americanas e sua população.....	26
<b>Figura 8</b> – Regressão lineaar entre a intensidade da UHI de cidades européias e sua população. ....	27
<b>Figura 9</b> – Corte longitudinal da ilha de calor de Londres. ....	29
<b>Figura 10</b> – Exemplos de classificação alfanumérica para Zonas Climáticas Locais.....	30
<b>Figura 11</b> – Exemplo de formulário de descrição de uma LCZ-formada por edifícios altos e compactos. ....	31
<b>Figura 12</b> – Comparação de valores de FVC obtidos por métodos computacionais e análises gráficas de uma sfotografias hemisféricas .....	34
<b>Figura 13</b> – Esquema de classificação de amostra da literatura sobre ilha de calor urbana. ....	37
<b>Figura 14</b> – Distribuição de frequência da amostra da literatura sobre ilha de calor urbana de acordo com a década e padrão de qualidade. ....	37
<b>Figura 15</b> – Diferença de temperatura anual e diária verificada em diferentes zonas climáticas locais da cidade de Sverzed, Hungria.....	41
<b>Figura 16</b> – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa .....	44
<b>Figura 17</b> – Área de estudo: recorte espacial da cidade de Campinas-SP	46
<b>Figura 18</b> – Área de estudo, pontos fixos de monitoramento e transectos móveis.....	50

<b>Figura 19</b> – Esquema de funcionamento do aparato desenvolvido.....	51
<b>Figura 20</b> – Instrumentos utilizados para coleta de dados ambientais .....	52
<b>Figura 21</b> – Instrumentos utilizados para coleta de dados ambientais .....	53
<b>Figura 22</b> – Calibração por referência dos <i>dataloggers</i> utilizados.....	55
<b>Figura 23</b> – Gráfico de análise de desvios: Datalogger F_01 x CEPAGRI .	56
<b>Figura 24</b> – Gráfico de análise de desvios: Datalogger F_07 x CEPAGRI .	56
<b>Figura 25</b> – Calibração por referência: Gráficos para análise de distribuição dos desvios entre <i>dataloggers</i> e a estação meteorológica.....	57
<b>Figura 26</b> – Gráfico de análise de desvios: <i>Datalogger</i> F_01 ajustado x CEPAGRI .....	59
<b>Figura 27</b> – Gráfico de análise de desvios: <i>Datalogger</i> F_07 ajustado x CEPAGRI .....	60
<b>Figura 28</b> – Gráfico de análise de desvios: Aparato AP_03 x <i>Datalogger</i> M_03 .....	61
<b>Figura 29</b> – Calibração por referência: Gráficos para análise de distribuição dos desvios entre aparatos e <i>dataloggers</i> .....	62
<b>Figura 30</b> – Gráfico de análise de desvios: Aparato AP_03 ajustado x <i>Datalogger</i> M_03.....	62
<b>Figura 31</b> – Exemplo de correção de temperatura .....	66
<b>Figura 32</b> – Mapa de caracterização preliminar das quadras.....	74
<b>Figura 33</b> – Zonas Climáticas Locais – Hipótese Inicial .....	75
<b>Figura 34</b> – Obtenção de FVC pontual através de método computacional	76
<b>Figura 35</b> – Mapa obstáculos (edificações e vegetação) e mapa resultante de valores contínuos de FVC .....	77
<b>Figura 36</b> – Obtenção da relação H/W para os cânions urbanos da área de análise amostral N <sup>o</sup> 6 .....	78
<b>Figura 37</b> – Tabela de classe de rugosidade de Davenport.....	80
<b>Figura 38</b> – Zonas Climáticas Locais da área de estudo.....	83
<b>Figura 39</b> – Comparação de temperaturas nos pontos F_03 e F_07 .....	85
<b>Figura 40</b> – Comparação de temperaturas nos pontos F_03 e F_07 .....	86
<b>Figura 41</b> – Temperatura horária média no período de monitoramento.....	89
<b>Figura 42</b> – Espacialização da Intensidade da Ilha de Calor Urbana na área de estudo às 09:00.....	90

<b>Figura 43</b> – Espacialização da Intensidade da Ilha de Calor Urbana na área de estudo às 15:00.....	91
<b>Figura 44</b> – Espacialização da Intensidade da Ilha de Calor Urbana na área de estudo às 21:00.....	92
<b>Figura 45</b> – Regiões de maior e menor intensidade de Ilha de Calor Urbana às 09:00.....	93
<b>Figura 46</b> – Regiões de maior e menor intensidade de Ilha de Calor Urbana às 15:00.....	94
<b>Figura 47</b> – Região de maior intensidade de Ilha de Calor Urbana às 21:00. .....	95
<b>Figura 48</b> – Gráfico de regressão linear: UHII em função de FVC .....	97
<b>Figura 49</b> – Áreas de análise das LCZs 3(2) e 3(8) .....	99

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> – Efeito de características urbanas nos componentes do balanço térmico superficial. ....	28
<b>Quadro 2</b> – Sumário de resultados de estudos empíricos a respeito da ilha de calor em zonas climáticas da cidade de Sverzed. ....	42
<b>Quadro 3</b> – Clima de Campinas. CEPAGRI/UNICAMP, Jun/1988 a Out/2008 .....	45
<b>Quadro 4</b> – Descrição dos pontos fixos de monitoramento.....	48
<b>Quadro 5</b> – Descrição do entorno imediato dos pontos fixos de monitoramento .....	49
<b>Quadro 6</b> – Quadro de especificação do datalogger Testo 174H e do aparato desenvolvido. ....	52
<b>Quadro 7</b> – Estimativa do desvio entre os equipamentos utilizados e o equipamento de referência.....	55
<b>Quadro 8</b> – Pontuação de adequação do modelo de regressão linear: <i>Datalogger</i> x Estação .....	57
<b>Quadro 9</b> – Estimativa do desvio entre os equipamentos utilizados e o equipamento de referência após aplicação das equações de ajuste .....	60
<b>Quadro 10</b> – Estimativa indireta do desvio entre os aparados desenvolvidos e o equipamento de referência.....	61
<b>Quadro 11</b> – Pontuação de adequação do modelo de regressão linear: Aparatos x Dataloggers.....	61
<b>Quadro 12</b> – Estimativa indireta do desvio entre os aparados desenvolvidos (após ajuste) e o equipamento de referência .....	63
<b>Quadro 13</b> – Taxa linear de correção da temperatura do ar .....	65
<b>Quadro 14</b> – Camadas de dado obtidas junto à PMC para a caracterização morfológica da área de estudo .....	68
<b>Quadro 15</b> – Tipologias utilizadas na caracterização preliminar das quadras .....	69
<b>Quadro 16</b> – Descrição das LCZs contidas na hipótese inicial .....	72
<b>Quadro 17</b> – Parâmetros urbanísticos obtidos para as áreas de análise amostrais.....	81
<b>Quadro 18</b> – Descrição das LCZs identificadas na área de estudo. ....	82



<b>Quadro 19</b> – Média horária da temperatura do ar medida nos pontos fixos de monitoramento .....	84
<b>Quadro 20</b> – Intensidade mínima, média e máxima da Ilha de Calor Urbana registrada nos pontos de monitoramento fixo em relação ao ponto de referência (CEPAGRI).....	87
<b>Quadro 21</b> – Correlação do Fator de Visão do Céu e a Intensidade da Ilha de Calor Urbana Noturna .....	96

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVOS .....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1. URBANIZAÇÃO E A BUSCA POR QUALIDADE AMBIENTAL NAS CIDADES	17
3.2. ALTERAÇÕES NA SUPERFÍCIE TERRESTRE E SEUS REFLEXOS NO CLIMA – O FENÔMENO DAS ILHAS DE CALOR .....	19
3.3. HETEROGENEIDADES DO TECIDO URBANO E OS DIVERSOS MICROCLIMAS DE UMA MESMA CIDADE – AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS	29
3.4. RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE VISÃO DO CÉU E O MICROCLIMA LOCAL .....	32
3.5. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA O FATOR DE VISÃO DO CÉU	33
3.6. MONITORAMENTO DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS EM MEIOS URBANOS .....	35
4. MATERIAIS E METODOS .....	44
4.1. CARACTERIZAÇÃO DA CIDADE DE CAMPINAS.....	44
4.2. SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	45
4.3. OBTENÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS .....	47
4.4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA.....	67
5. RESULTADOS.....	81
5.1. CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DA ÁREA DE ESTUDO .....	81
5.2. MONITORAMENTO FIXO DE TEMPERATURA DO AR.....	84
5.3. CAMPANHAS DE MEDIDAS MÓVEIS DA TEMPERATURA DO AR	90
6. CONCLUSÃO .....	101
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	104
APÊNDICE I.....	110

## 1. INTRODUÇÃO

Na medida em que introduzem transformações nos meios que ocupam, a construção de edificações (assim como a de obras de infraestrutura que as acompanham) provoca alterações nos processos físicos que influenciam as condições climáticas em escala local e regional (KONARSKA et al., 2016; KRÜGER; MINELLA; RASIA, 2011; WONG et al., 2016; YANG; LI, 2015). A constante expansão e adensamento da malha urbana agravam essas alterações, (CHEN et al., 2012; STEWART; OKE; KRAYENHOFF, 2014), configurando as cidades como agentes de grande importância nas mudanças ambientais globais e especialmente vulneráveis às consequências dessas alterações (BECTEL et al., 2015). A elevação atípica da temperatura urbana, uma das alterações associadas às ações antrópicas, agrava o consumo de energia para fins de resfriamento, aumenta o pico de demanda de eletricidade, intensifica problemas de poluição, amplia a pegada ecológica urbana, causa desconforto e problemas de saúde (KOLOKOTRONI; GIRIDHARAN, 2008; MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2010; SANTAMOURIS; SYNNEFA; KARLESSI, 2011). Não restrita a grandes metrópoles, alterações similares têm sido verificadas em cidades de pequeno e médio porte (CARDOSO et al., 2017). Assim, compreender a influência que o ambiente construído exerce em seu entorno é parte fundamental na busca por um processo de urbanização mais sustentável (KETTERER; MATZARAKIS, 2015; LCONTE et al., 2015; NG; REN, 2018).

Neste contexto, estudos indicam que a formação dos ambientes térmicos urbanos está diretamente associada aos aspectos da morfologia do seu entorno, bem como pelo conjunto complexo de sua estrutura (PEZZUTO, 2007; PEZZUTO et al. 2016). Um dos aspectos mais significativos nesta dimensão é o sombreamento fornecido pelos edifícios, árvores e paisagem aos espaços urbanos abertos (LIN et al., 2012). A relação entre altura e largura das edificações (relação H/W), definida como a razão entre a altura média (H) das paredes do cânion e sua largura (W), é um parâmetro que avalia o nível de sombreamento dos cânions urbanos (OKE, 1988). Diversos estudos relatam a correlação da temperatura do ar com a relação H/W (ALI-TOUDERT, 2005; MUNIZ e PEZZUTO, 2016; NAKATA-OSAKI e SOUZA, 2016). Outro parâmetro referente ao desenho urbano é o fator de visão do céu (FVC), que representa a

quantidade de céu visível em um dado local (OKE, 1981). Seu valor varia de 0 (vista totalmente obstruída) a 1 (vista totalmente livre) e pode ser obtido por meio de equações analíticas (OKE, 1981; JOHNSON E WATSON, 1987), análise de imagens (STEYN, 1980) ou simulações (SOUZA; RODRIGUES; MENDES, 2003; MATZARAKIS e MATUSCHEK, 2011). Por estar intimamente ligado à quantidade de energia térmica que um dado local consegue dispersar para a atmosfera, o fator de visão do céu (FVC) exerce influência significativa sobre seu microclima. Assim, este parâmetro vem sendo constantemente utilizado em pesquisas que buscam compreender o fenômeno das ilhas de calor em áreas urbanas (SOUZA et al., 2010) e analisar as condições de conforto ambiental em espaços urbanos abertos (HE et al., 2015; KRÜGER; DRACH; BROEDE, 2017; LIN et al., 2012; WANG; AKBARI, 2014). Este conhecimento, quando utilizado no planejamento urbanístico, conduzi à produção de ambientes de melhor qualidade (LOPEZ et al., 2016; WHITE et al., 2016) ou energeticamente mais eficientes (CHEN et al., 2011; SOUZA, 2010; XU et al., 2017).

Com o intuito de relacionar o microclima urbano às características paisagísticas e morfológicas das cidades, Stewart e Oke (2012) propuseram o método das Zonas Climáticas Locais<sup>1</sup> (LCZs), através do qual o tecido urbano é sistematicamente analisado e agrupado em classes que são locais em escala, climáticas em natureza e zonais em representação. Os autores propõem a divisão do tecido urbano em dois grandes grupos estruturadores: forma ou estrutura (altura, espaçamento das edificações e presença de vegetação) e tipos de materiais ou composição de superfícies (permeáveis e não permeáveis). Diversas pesquisas têm proposto o mapeamento climático urbano através do método das LCZs utilizando o geoprocessamento como ferramenta de análise (BECHTEL et al., 2015; GÁL; BECHTEL; UNGER, 2015; KOTHARKAR; BAGADE, 2017; MONTEIRO; PEZZUTO, 2017).

Diversos meios podem ser empregados na obtenção de dados ambientais para fins de pesquisa: estações meteorológicas padrão; coleta de dados em campo por pontos fixos de monitoramento; coleta de dados em campo através de medidas móveis; sensoriamento remoto; ou, ainda, inferências a partir de

---

<sup>1</sup> Tradução livre do inglês: *Local Climate Zones*

modelos matemáticos e simulações computacionais. Dentre os diversos métodos utilizados, destaca-se a aplicação do método de medições móveis (HÄB; RUDDLELL; MIDDEL, 2015; KAISE; FARIA, 2001; LIU et al., 2017a), que consiste na coleta de dados ambientais, por um sensor montado em um veículo ou carregado por uma pessoa, ao longo de um transecto. Este método permite investigação das condições climáticas em uma extensão territorial superior ao que seria possível com o uso de sensores ou estações meteorológicas fixas. Seu uso é frequente em pesquisas que investigam as variações do perfil das ilhas de calor em áreas urbanas (LECONTE et al., 2015).

Esta pesquisa visa verificar como a relação entre a temperatura do ar e adensamento construtivo se manifesta em diferentes Zonas Climáticas Locais de uma mesma cidade, uma vez que os trabalhos encontrados na literatura estudaram essa relação dentro de zonas urbanas de relativa homogeneidade morfológica.

## 2. OBJETIVOS

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a relação entre o fator de visão do céu e a intensidade da ilha de calor urbana em diferentes áreas de uma mesma cidade com distintos padrões de uso e ocupação do solo.

Para tal, foram identificados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as distintas Zonas Climáticas Locais existentes em um recorte da cidade de Campinas;
- Avaliar a intensidade da ilha de calor urbana neste mesmo recorte através de campanhas mistas de observação (monitoramento fixo e medições móveis) de condições atmosféricas intraurbanas (temperatura e umidade); e
- Estabelecer correlações entre o fator de visão do céu e a temperatura do ar nas diferentes zonas climáticas locais, considerando valores pontuais e um raio de abrangência de 100 m.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. URBANIZAÇÃO E A BUSCA POR QUALIDADE AMBIENTAL NAS CIDADES

O processo de urbanização é definido como um processo onde a população de uma determinada região passa a se concentrar em uma área urbana, frente a uma mudança na sua organização social. Considera-se que esse processo teve início com o advento da agricultura, na Mesopotâmia, em torno de 3500 A.C. (BENEVOLO, 2014). Capazes de produzir os próprios alimentos através do cultivo de lavouras, tribos nômades passaram a estabelecer assentamentos permanentes. A partir de então, os assentamentos cresceram e se firmaram em torno do comércio desses produtos, acrescido da função de defesa, dando origem ao padrão feudal. Apesar de sua escala reduzida, essas áreas urbanizadas já apresentavam alguns dos desafios e dificuldades relacionados a questões de infraestrutura, principalmente no que diz respeito ao fornecimento de água, disposição de resíduos e descarte de efluentes, desafios estes que se mantém até os dias de hoje. Por este motivo, grandes civilizações floresceram às margens de grandes rios, onde a disponibilidade de água era alta e o descarte de efluentes era fácil.

A partir da primeira revolução industrial, os processos de urbanização intensificam-se drasticamente. A abundância de recursos, consequente do novo modelo de produção e do uso de máquinas para extração de recursos naturais, induz a um aumento desenfreado da população urbana. As cidades passam a receber grande quantidade de emigrantes de zonas rurais, em adição ao aumento populacional natural (BAIROCH; GOERTZ, 1986). Em um intervalo de 500 anos, entre 1300 e 1800, nos países que hoje são considerados desenvolvidos, estima-se que a população total aumentou de 100 milhões para 211 milhões de pessoas, enquanto o nível de urbanização permaneceu constante, próximo a 10%. Nos 100 anos seguintes, entre 1800 e 1900, aproximadamente, estima-se que essa população tenha atingido 600 milhões de pessoas, enquanto o nível de urbanização já chegava a 35,7%. Frente ao aumento da população urbana, cresce também a demanda por serviços de infraestrutura, que se tornam cada vez mais complexa. Com a grande concentração de pessoas e o modelo de produção industrial, ocorre um aumento na emissão de efluentes e poluentes,



além da geração de resíduos de consumo. Esta combinação de fatores resulta em uma acentuada degradação na qualidade ambiental das cidades.

Habitações de baixo padrão, situadas próximas às indústrias ou em zonas periféricas desprovidas de serviços de infraestrutura adequados, acentuam sua exposição a condições ambientais insalubres. A compactação das edificações e a alta concentração de pessoas facilita a transmissão de doenças. A propagação de mazelas sociais e doenças, oriundas das péssimas condições ambientais, passa a afetar o desenvolvimento das cidades, sendo a população de baixa renda a parcela da sociedade mais afetada (BENEVOLO, 2014). Identifica-se assim, a importância da qualidade ambiental para o desenvolvimento da cidade. O planejamento urbano, até então estruturado para a ocupação funcional do território, passa a considerar também aspectos ambientais. Esta importância pode ser verificada, até hoje, no estabelecimento de dispositivos legais com a finalidade de preservar a qualidade ambiental urbana. No caso brasileiro, com o Estatuto da Cidade que “estabelece normas de ordem pública e interesse social que regulam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem-estar dos cidadãos, bem como do equilíbrio ambiental” (BRASIL, 2001).

Apesar do surgimento deste novo paradigma ser um grande avanço, sua aplicação carece de maior abrangência e de renovação constante para fazer frente aos inúmeros desafios advindos da urbanização, que também evoluem e apresentam novos aspectos. A perspectiva de expansão do tecido urbano permanece, uma vez que as tendências de aumento das populações urbana e mundial continuam. Em 1980, a população total nos países desenvolvidos já atingia 990 milhões, enquanto o nível de urbanização ultrapassava 65% (BAIROCH; GOERTZ, 1986). Em outros países, no entanto, a revolução industrial teve início tardio e seus reflexos na população urbana ainda não eram verificados neste período (UNITED NATIONS, 2018). Em 1950, a população mundial era pouco maior que 2,5 bilhões, das quais apenas 29,5% residiam em áreas urbanas. Em 1980, esses números alcançam aproximadamente 4,5 bilhões e um nível de urbanização médio de 40%. Atualmente, esses números já se encontram próximos a 7,6 bilhões e 55,3%. Projeções apontam que, em

2050, a população mundial superará a marca de 9,5 bilhões, das quais aproximadamente 68,4% estarão estabelecidas em áreas urbanizadas.

Diante desta tendência de crescimento populacional, que levam à maior complexidade e custos de expansão das redes de infraestrutura urbana, e da necessidade de cidades resilientes às mudanças climáticas, surge o entendimento de que os mecanismos e estratégias empregados para viabilizar o desenvolvimento urbano sustentável devem ser atualizados. A cidade contemporânea deve se desenvolver em um território policêntrico, que reduza movimentos pendulares, com uma matriz de transportes majoritariamente coletiva, adensada por meio da verticalização, porém com qualidade, de modo a permitir acesso ao sol e permeabilidade ao vento.

### 3.2. ALTERAÇÕES NA SUPERFÍCIE TERRESTRE E SEUS REFLEXOS NO CLIMA – O FENÔMENO DAS ILHAS DE CALOR

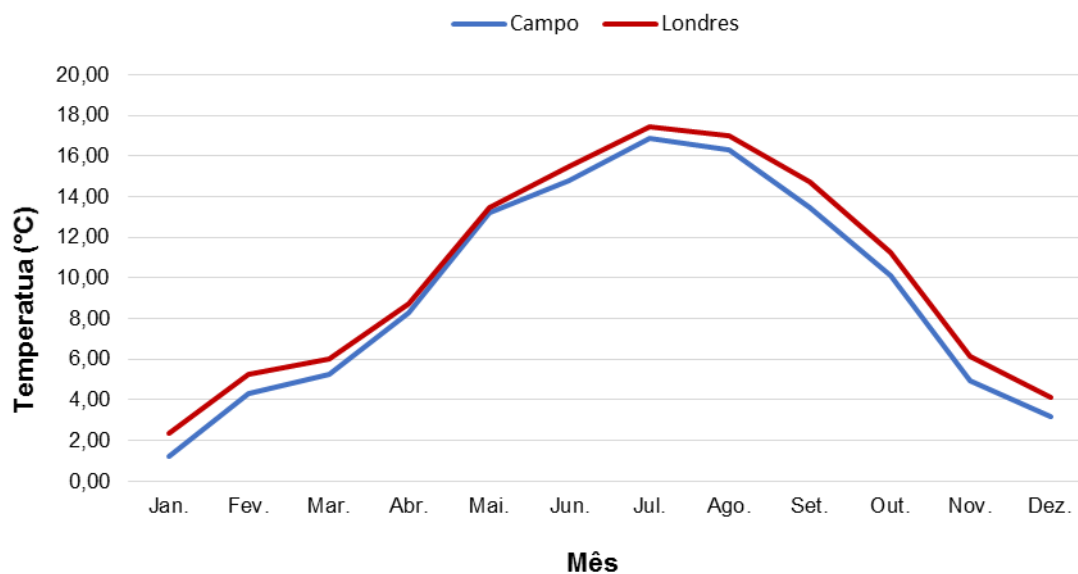
O final da revolução industrial inglesa, entre 1800 e 1820, pode ser reconhecido também como o período de surgimento dos estudos de climatologia urbana. Luke Howard, através de seus trabalhos publicados na primeira edição de *The Climate of London*, em 1818, é o primeiro a descrever alterações climáticas provocadas por áreas urbanas (MILLS, 2008). Howard estimou uma diferença de temperatura média anual de 1,57 °F, ou 0,88 °C, entre a cidade e o campo, baseado em temperaturas médias mensais, registradas na região central de Londres e em uma área rural fora dos limites da cidade, entre 1807 e 1816 (HOWARD, 2007).

A importância deste trabalho, porém, não está nos valores estimados para a variação de temperatura. Devido à tecnologia utilizada, a ausência de sincronismo na realização das medidas e a alteração do local onde eram conduzidas as observações rurais, é provável que as diferenças climáticas avaliadas possuam baixa exatidão. A importância do trabalho de Howard reside nas hipóteses formuladas as variações verificadas, apresentadas na Figura 1 e Figura 2.

**Figura 1** – Temperaturas médias mensais para Londres e o campo, obtidas entre 1807 e 1816.

Mês	Temperatura no Campo (°C)	Temperatura em Londres (°C)	Aquecimento em Londres (°C)
Janeiro	1,20	2,33	1,13
Fevereiro	4,32	5,26	0,94
Março	5,28	5,98	0,70
Abril	8,27	8,72	0,44
Mai	13,22	13,49	0,27
Junho	14,81	15,51	0,69
Julho	16,89	17,45	0,56
Agosto	16,31	17,01	0,70
Setembro	13,46	14,69	1,24
Outubro	10,13	11,24	1,11
Novembro	4,96	6,16	1,19
Dezembro	3,14	4,11	0,97

Fonte: Adaptado de Howard (2007)

**Figura 2** – Temperaturas médias mensais obtidas entre 1807 e 1816.

Fonte: Adaptado de Howard (2007)

Com base nestas variações, o aquecimento verificado na cidade foi atribuído a quatro causas potenciais: *i*) à geração de calor antrópico, especialmente para fins de aquecimento; *ii*) à presença de superfícies verticais que, a noite, trocam entre si o calor adquirido durante o dia, diferente do que ocorre no campo, onde esse calor é dispersado para o céu em sua totalidade; *iii*) à atuação das construções como obstáculo para a passagem do vento, reduzindo sua velocidade na área urbana; e *iv*) à umidade inesgotável do campo,

que absorve calor para sua evaporação, enquanto a umidade presente no meio urbano é rapidamente esgotada.

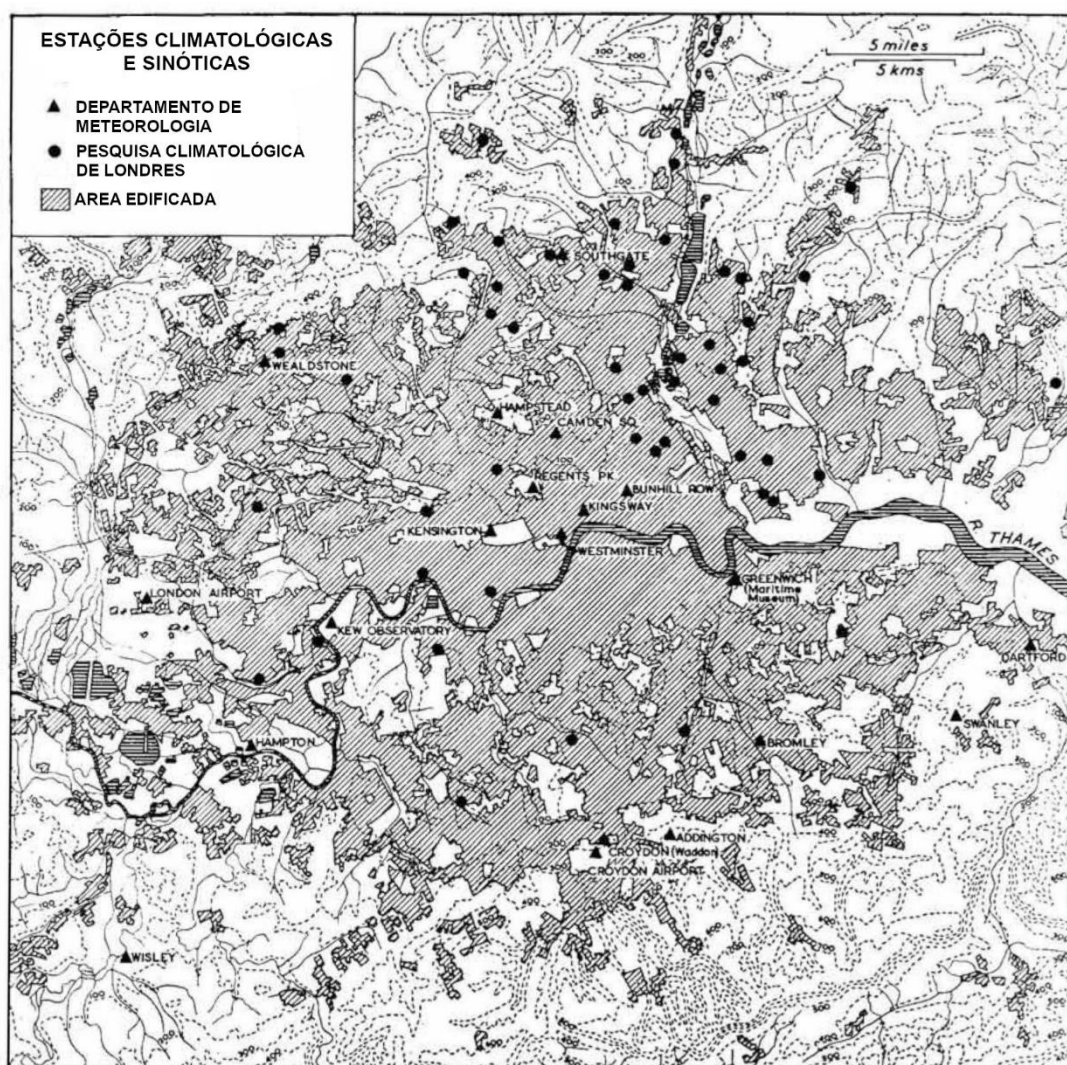
As hipóteses de Howard a respeito da dinâmica da formação dos microclimas urbanos, ainda que totalmente baseadas em observações empíricas e desprovidas de fundamentação teórica robusta, viriam a se provar muito próximas da realidade, mais de cem anos depois, na segunda metade do século XX, quando os estudos climáticos urbanos ganham ímpeto e apresentam grandes avanços, culminando em modelos conceituais aceitos até os dias de hoje (OKE, 1982).

É no início deste período, entre 1950 e 1999, que o termo Ilha de Calor Urbana (*Urban Heat Island – UHI*) começa a ser utilizado para denominar o fenômeno climático antrópico caracterizado pela diferença entre a temperatura do ar entre áreas urbanizadas e áreas rurais vizinhas. Este nome faz uma dupla analogia à cidade enquanto uma massa de terra em meio ao mar, constituído pela zona rural (CHANDLER, 1961 apud OKE, 1969). A primeira analogia remonta ao efeito das brisas marítimas, que ocorre em regiões litorâneas devido ao comportamento térmico contrastante das massas de terra e água. Já a segunda analogia faz referência à similaridade das linhas isotérmicas de uma Ilha de Calor às curvas de nível de uma carta topográfica.

O estudo do microclima de Londres foi aprofundado por Chandler (1965), com base em observações realizadas por uma rede de monitoramento que contava com 18 estações meteorológicas oficiais, situadas dentro da cidade e arredores, além de 60 estações meteorológicas suplementares, situadas em escolas ou colégios e operadas voluntariamente, sob orientação do Departamento de Geografia da *University College London*. As estações suplementares eram compostas por pluviômetros e termômetros de mínima e máxima, de bulbo seco e bulbo úmido, do mesmo padrão adotado pelo *Meteorological Office* e calibradas pelo *National Physical Laboratory*, protegidos em abrigos meteorológicos do tipo Stevenson. De acordo com comentários de Chandler em *The Climate of London* (livro homônimo ao de Luke Howard), mais de cem instituições se candidataram para participar do estudo e receber estações de monitoramento, porém, apenas 60 apresentavam condições adequadas em termos de locação e representatividade do entorno. O verdadeiro

mosaico de microclimas contidos em uma cidade de grande porte, tal como Londres, consequência de um tecido urbano altamente heterogêneo, implica em necessidade de rigor metodológico durante a seleção dos pontos de monitoramento e instrumentação a ser utilizada. Fundamental em estudos de climatologia urbana, este rigor visa impedir interferências exacerbadas em um objeto de estudo já demasiadamente complexo. A Figura 3 apresenta os locais de todas as estações climatológicas utilizadas neste estudo.

**Figura 3** – Rede de estações climatológicas e sinópticas utilizadas nos estudos publicados em *The Climate of London* (CHANDLER, 1965).

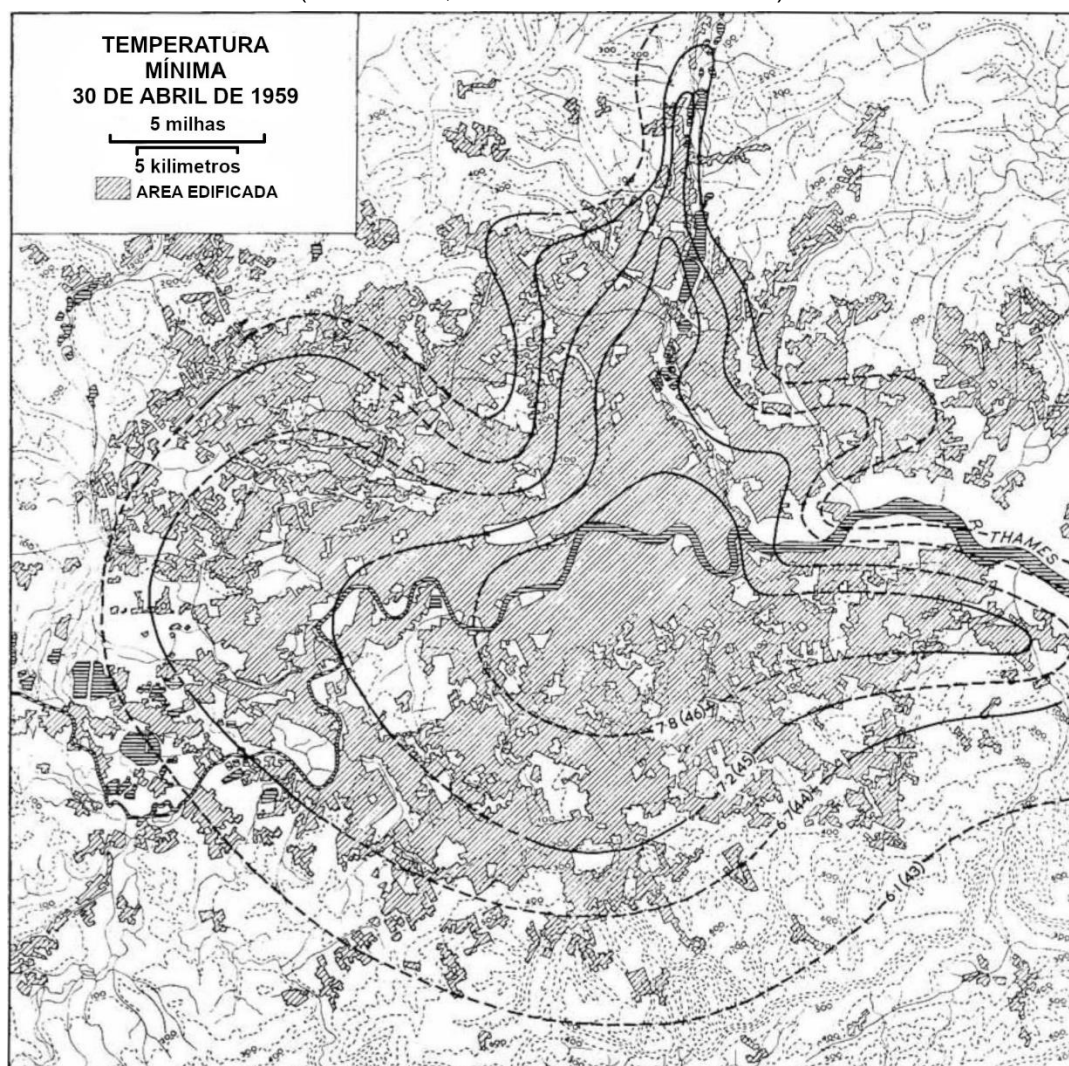


Fonte: Adaptado de Chandler (1965).

A cobertura fornecida pela rede de estações climáticas permitiu a Chandler elaborar mapas climáticos da cidade através do traçado de linhas isotermas. Vinculando estes mapas a outros dados climáticos, como a velocidade dos ventos e a presença ou ausência de nebulosidade sobre o

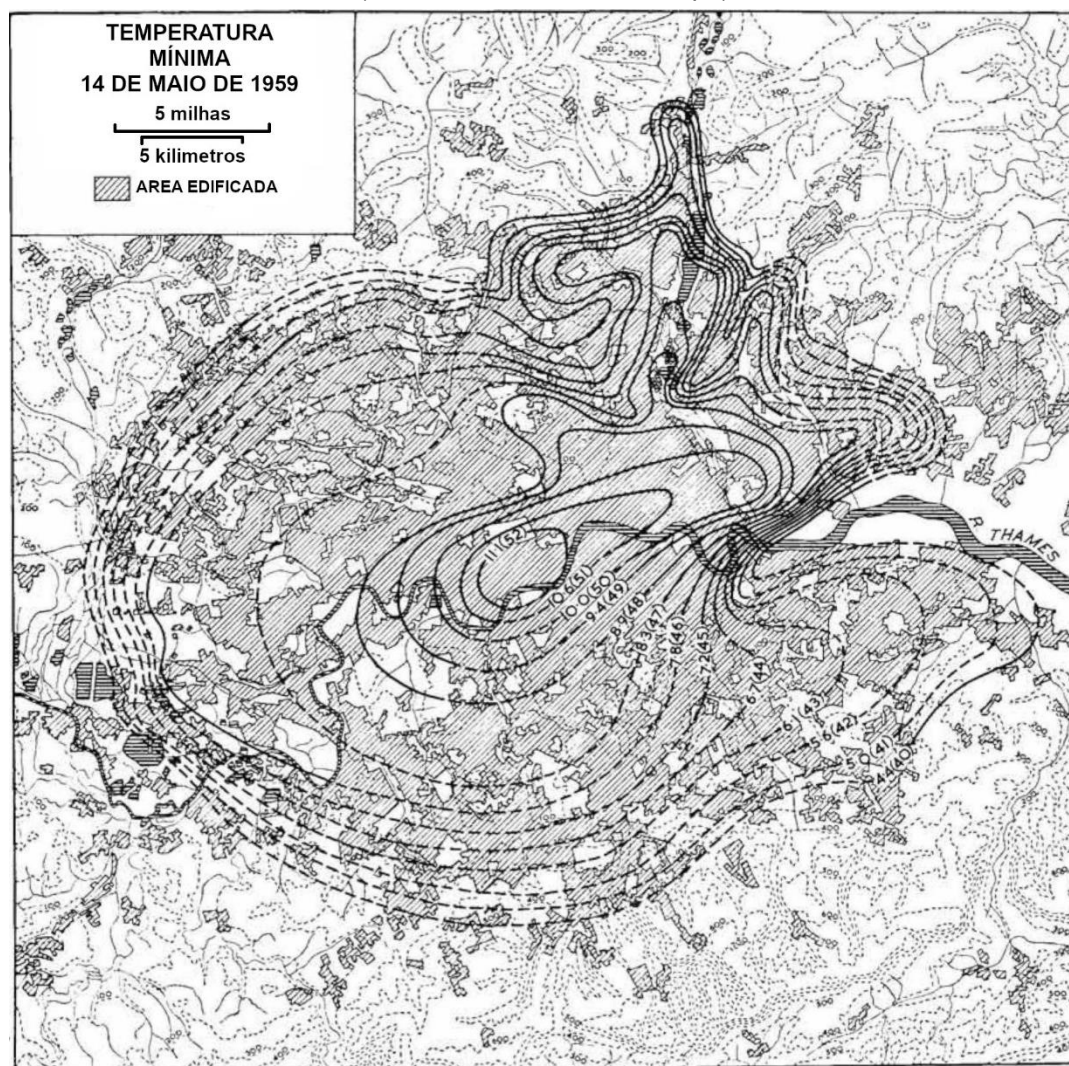
território urbano, foram feitos apontamentos sobre o grau de influência destes sobre a intensidade da Ilha de Calor. Na noite de 30 de abril de 1959, caracterizada por céu limpo e ventos de 9,4 m/s, a intensidade estimada da Ilha de Calor foi de apenas 2,2 °C. Sua forma, expressa no mapa de isotermas, é apenas remotamente similar àquela do território urbano de Londres, como pode ser visto na Figura 4. Na noite de 14 de maio de 1959, foram registrados ventos de apenas 2,0 m/s e ausência total de nuvens, condições ideais para a verificação do fenômeno da Ilha de Calor Urbana. Nesta noite, a diferença estimada entre as temperaturas mínimas urbanas e rurais foi de 6,7 °C e o mapa de isotermas apresenta uma forma muito próxima àquela da malha urbana de Londres, conforme apresentado na Figura 5.

**Figura 4** – Isotermas da temperatura mínima em Londres em 30 de abril de 1959 (ventos de 9,4 m/s e baixa nebulosidade).



Fonte: Adaptado Chandler (1965).

**Figura 5** – Isotermas da temperatura mínima em Londres em 14 de maio de 1959 (ventos de 2,0 m/s e céu limpo).

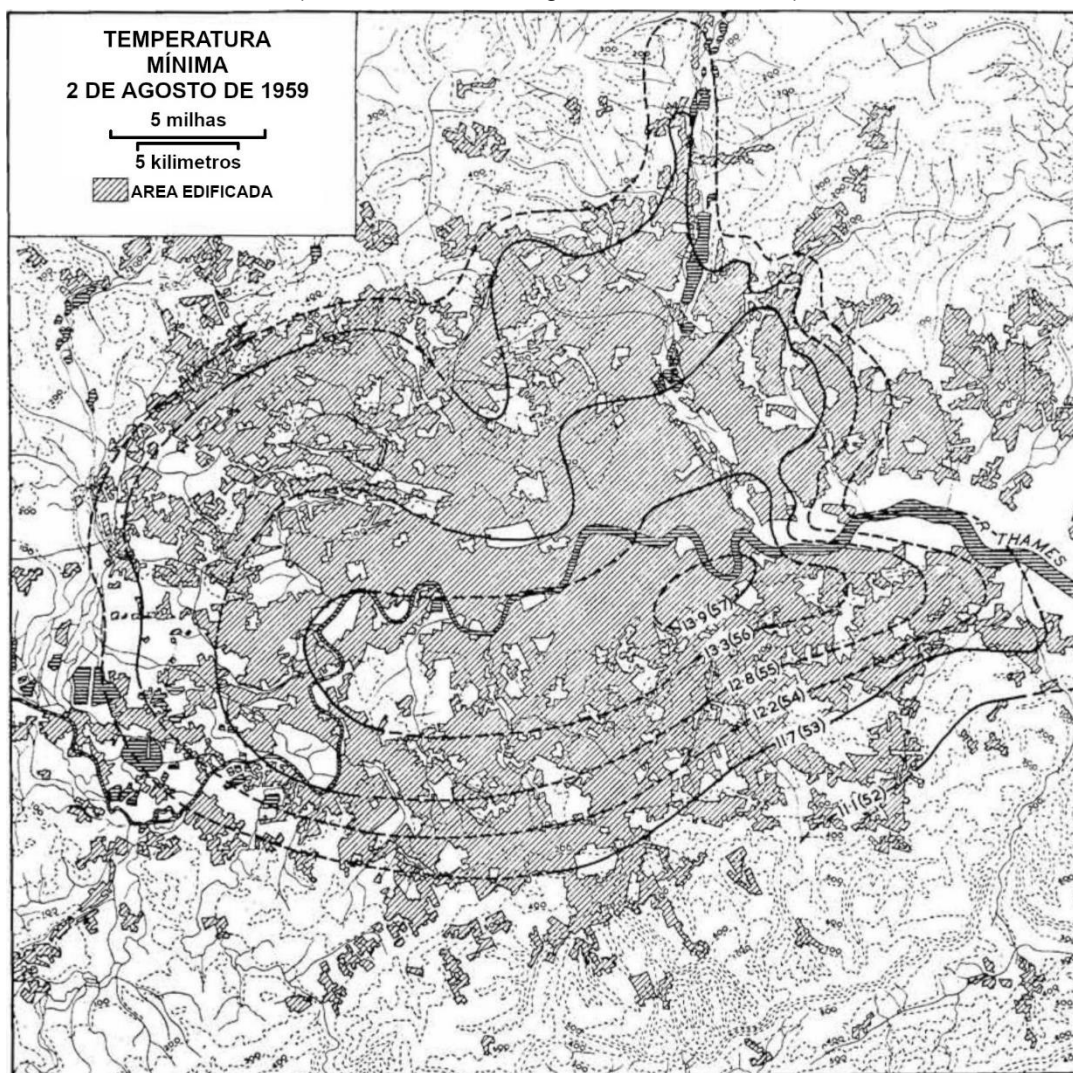


Fonte: Adaptado de Chandler (1965).

Na noite de 2 de agosto de 1959, a intensidade estimada da Ilha de Calor foi de apenas 2,8 °C e, sua forma, expressa no mapa de isotermas, volta a aderir àquela do território urbano de Londres, como pode ser visto na Figura 6. Isso se deve aos ventos de apenas 2,6 m/s e à presença de densa nebulosidade sobre a cidade.



**Figura 6** – Isotermas da temperatura mínima em Londres em 2 de agosto de 1959  
(ventos de 2,6 m/s e grande nebulosidade)



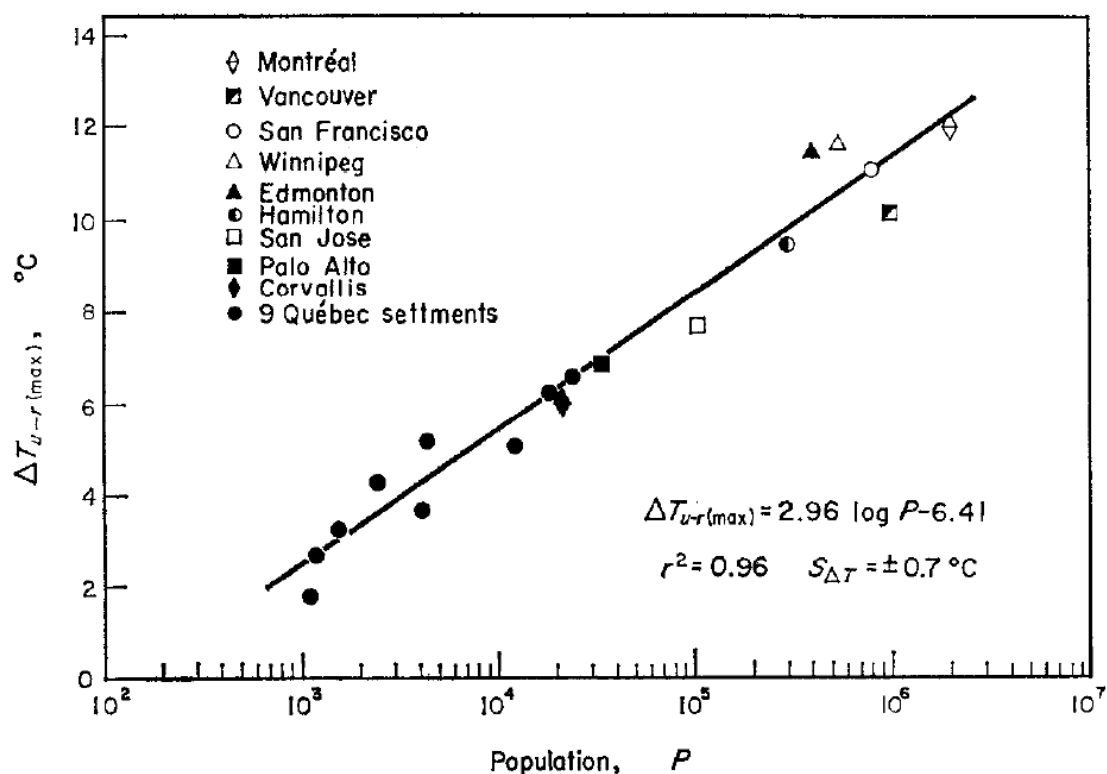
Fonte: Adaptado de Chandler (1965).

Até o final da década de 60, os processos que levam à ocorrência ou mitigação das UHI ainda eram pouco conhecidos (OKE, 1969). A medida em que os estudos de climatologia urbana começaram a se focar mais nestes processos, abandonando o caráter descritivo ou exploratório que predominava até então, começaram a surgir diversas teorias e modelos para descrever o comportamento do clima das cidades.

Partindo da hipótese de que a Ilha de Calor Urbana está relacionada ao tamanho das cidades, buscou-se modelar sua intensidade em função de sua população (OKE, 1973). O modelo foi baseado inicialmente em valores de temperatura do ar obtidas para dez cidades canadenses, situadas em uma mesma região de Québec, ao longo de uma rota de 140 km, em condições

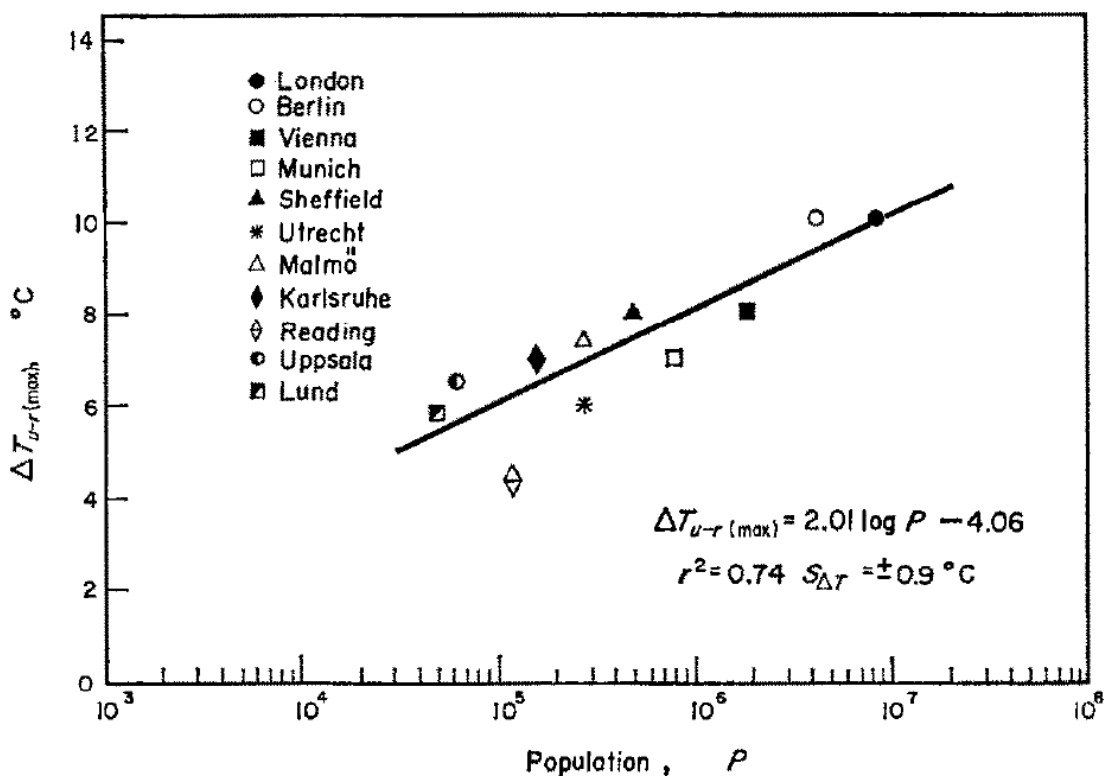
atmosféricas estáveis e de baixa nebulosidade. Devido a resultados iniciais positivos, o modelo foi expandido para incluir outras cidades norte americanas (Figura 7) e recriado para cidades europeias, com base em medições de temperatura contidas em outras pesquisas (Figura 8). Apesar de a regressão linear apresentar bons coeficientes em ambos os casos, este modelo foi abandonado por possuir sérias limitações. Sua aplicação assume que há uma semelhança estrutural ou funcional entre cidades do mesmo porte (população), o que nem sempre é verificado. Além disso, cidades situadas em altas latitudes, por exemplo, teriam sua UHI subestimada, uma vez que tem alto consumo de energia e resfriamento radiativo rural favorecido por massas de ar seco. Já cidades situadas em zonas tropicais, por outro lado, teriam suas UHI superestimadas devido ao baixo consumo de energia e ao resfriamento rural dificultado pelas massas de ar úmido.

**Figura 7** – Regressão linear entre a intensidade da UHI de 10 cidades norte americanas e sua população.



Fonte: Oke (1973).

**Figura 8** – Regressão linear entre a intensidade da UHI de cidades europeias e sua população.



Dentre os modelos e teorias formulados neste período, a respeito dos mecanismos que governam o fenômeno da Ilha de Calor Urbana, destaca-se a proposição de Oke (1982, 1988), baseada no balanço de energia urbana (Equação 1). De acordo com essa teoria, características geométricas e propriedades físicas do ambiente construído afetam o balanço de energia superficial do território ocupado, conforme apresentado no Quadro 1. Deste modo, a parcela de radiação solar incidente absorvida pela cidade durante o dia aumenta, enquanto a parcela de radiação dissipada durante o período noturno é reduzida. Estes efeitos, somados à geração de calor antrópica para fins diversos, resulta em um saldo de radiação armazenada excedente que, em última instância, causa a elevação da temperatura do ar.

$$K^* + L \downarrow - L \uparrow + Q_F = Q_E + Q_H + \Delta Q_S \quad \text{Equação 1}$$

Onde

$K^*$  = Radiação solar absorvida

$L \downarrow$  = Radiação difusa absorvida (onda longa)

$L \uparrow$  = Radiação difusa dispersada (onda longa)

$Q_F = \text{Fluxo de calor antropogênico}$

$Q_E = \text{Fluxo de calor latente}$

$Q_H = \text{Fluxo de calor sensível}$

$\Delta Q_S = \text{Calor armazenado}$

**Quadro 1** – Efeito de características urbanas nos componentes do balanço térmico superficial.

Característica	Alteração	Consequência	Termo
Geometria do cânion	Aumento da área superficial e de reflexões	Aumento na absorção de radiação solar	$K^*$
Geometria do cânion	Visão de céu reduzida	Diminuição na radiação difusa dispersada por superfícies verticais e horizontais	$L \downarrow$
Geometria do cânion	Redução da velocidade do vento	Redução das trocas de calor latente e sensível	$Q_H + Q_E$
Materiais de construção	Aumento da admitância térmica superficial	Aumento do calor armazenado no tecido urbano	$\Delta Q_S$
Materiais de construção	Aumento de superfícies impermeáveis	Redução das trocas de calor latente	$Q_E$
Poluição do ar	Maior absorção e reemissão de radiação solar na atmosfera	Aumento na radiação difusa recebida	$L \uparrow$
Construções e veículos	Adição direta de calor ao meio	Aumento do calor antropogênico	$Q_F$

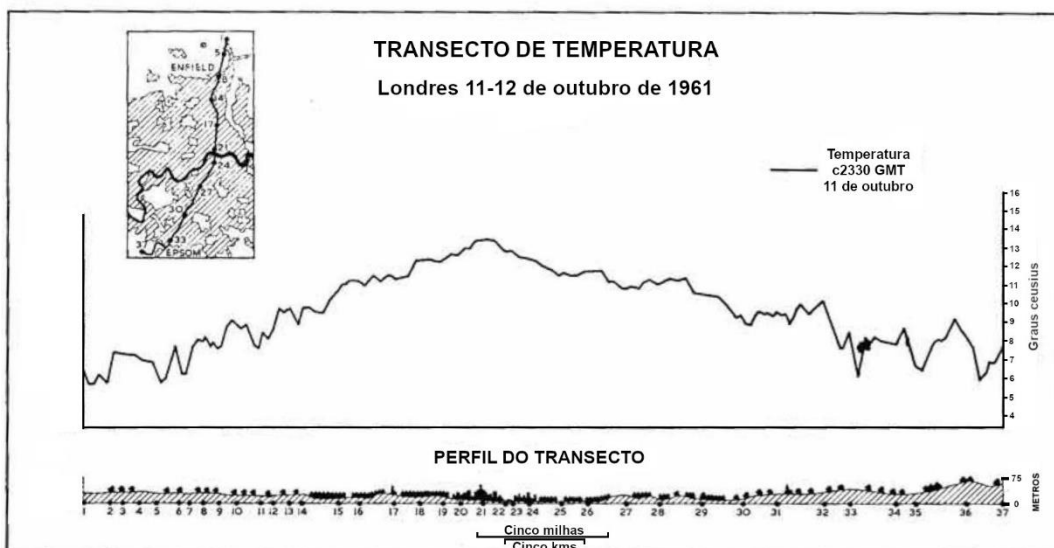
Fonte: Adaptado de Oke (1982).

O balanço energético superficial permanece, até hoje, como a teoria mais aceita para justificar a ocorrência das UHI, sendo adotada em um grande número de estudos que buscam modelar este fenômeno (ALEXANDER; FEALY; MILLS, 2016; MIRZAEI, 2015; PIRINGER; GRIMMOND; JOFFRE, 2002). Uma vez que duas cidades jamais apresentarão uma malha urbana com morfologia, propriedades físicas ou exposição climática idênticas, esta teoria permite estabelecer que comportamento da UHI de cidades distintas, ou até mesmo de regiões distintas de uma mesma cidade, dificilmente será o mesmo. Por curtos períodos, a intensidade deste fenômeno em dois locais pode até apresentar valores similares, mas é raro que essa condição de similaridade se mantenha por longos períodos. Assim, o estudo da ilha de calor urbana não pode ser feito a partir de um dado genérico, como a área urbanizada ou a densidade populacional. É necessário entender a composição do tecido urbano de cada local para determinar suas consequências microclimáticas.

### 3.3. HETEROGENEIDADES DO TECIDO URBANO E OS DIVERSOS MICROCLIMAS DE UMA MESMA CIDADE – AS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS

A paisagem urbana apresenta alto grau de complexidade, sendo composta por ruas, avenidas e vielas, prédios altos e baixos, casas, escritórios, lojas, fábricas, praças, parques, entre outros. Este mosaico de composições é refletido em um padrão igualmente complexo de microclimas locais que, em casos extremos, podem variar entre os dois lados de uma mesma rua. Chandler (1965) já observava essas variações, conforme seus apontamentos sobre o corte longitudinal da UHI de Londres, obtido por meio de um procedimento de coleta móvel de dados climáticos e apresentado na Figura 9.

**Figura 9** – Corte longitudinal da ilha de calor de Londres.







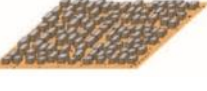

Fonte: Adaptado de Chandler (1965)

Segundo sua definição clássica, a intensidade da Ilha de Calor Urbana é determinada pela diferença máxima entre a temperatura do ar de uma área urbanizada e uma área rural próxima. Conforme os estudos em climatologia urbana progrediram e o tamanho das cidades aumentou, essa definição passou a ser considerada insuficiente. Devido à grande extensão e complexidade alcançada pelos territórios urbanos, pesquisadores passaram a adotar a temperatura do ar obtida em áreas verdes, situadas dentro dos centros urbanos, como o novo referencial de temperatura mínima, em substituição à temperatura do ar de áreas rurais. A composição e o entorno dessas áreas verdes é, no entanto, extremamente variável e raramente satisfazem as condições de uma estação meteorológica padrão (WMO, 2008). Contrastes também foram

identificados a respeito da definição de território urbano, devido ao alcance global da pesquisa. Diferentes países apresentam diferentes padrões de urbanização. Evidenciou-se, assim, a necessidade de inclusão de metadados nas comunicações de pesquisas de climatologia urbana (AGUILAR et al., 2003; STEWART, 2011; WMO, 2008).

Frente a esta demanda de compatibilização entre os estudos de clima urbano, Stewart e Oke (2012) apresentaram uma metodologia para a classificação de áreas urbanas e rurais em zonas climáticas locais. Neste método, áreas urbanas são inicialmente descritas de maneira padronizada, de acordo com dez parâmetros relacionados à sua estrutura construtiva, cobertura de superfícies e metabolismo. Estes parâmetros, selecionados devido à sua influência no balanço energético urbano, são: fator de visão do céu, relação altura e largura (relação H/W), porcentagem de superfície edificada, porcentagem de superfície impermeável, porcentagem de superfície permeável, altura dos elementos de rugosidade, classe de rugosidade do terreno e fluxo de calor antropogênico. A seguir, com base nesta descrição, as zonas são classificadas em um sistema alfanumérico, onde um número denota a predominância de determinada estrutura construtiva, enquanto uma letra denota a predominância de uma determinada cobertura, conforme exemplos na Figura 10 e Figura 11.

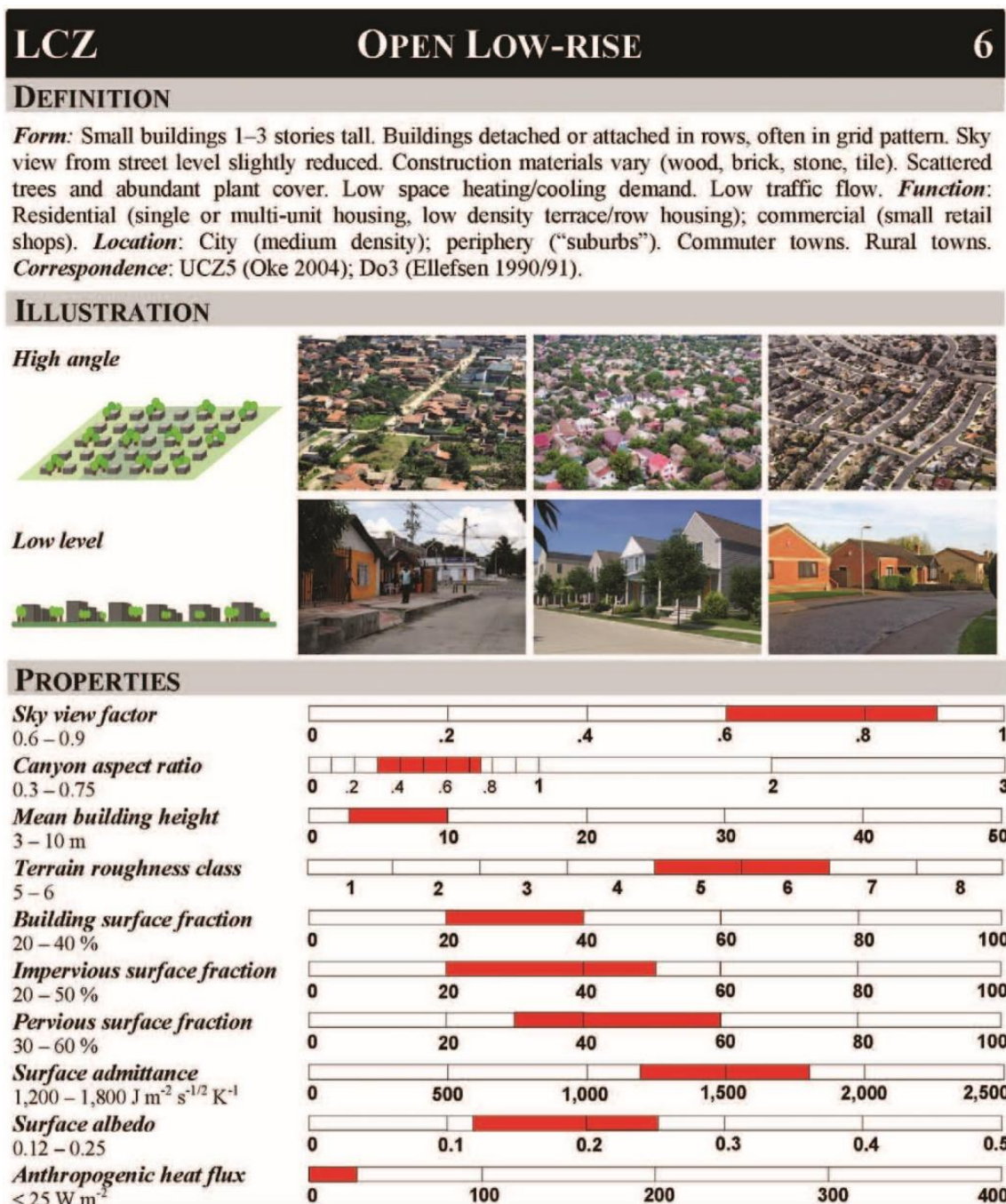
**Figura 10** – Exemplos de classificação alfanumérica para Zonas Climáticas Locais.

Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.

Fonte: adaptado de Stewart e Oke (2012)



**Figura 11** – Exemplo de formulário de descrição de uma LCZ-formada por edifícios altos e compactos.



Fonte: Stewart e Oke (2012)

Baseadas nos padrões de urbanização norte americanos e europeus, admite-se que as classes de LCZs propostas não possuem caráter exaustivo. Consequentemente, podem não ser adequadas aos padrões de urbanização existentes em outras regiões do mundo. Por este motivo, o sistema foi concebido de modo a permitir a criação de novas classes, através da combinação de múltiplas estruturas, coberturas ou um misto destes.

Além de padronizar e facilitar a transferência do conhecimento na escala global, entre pesquisadores que investigam cidades distintas, este método também encontra aplicação em escala local, ao servir como plataforma para comparação da intensidade das Ilhas de Calor e o consumo de energia entre diferentes áreas urbanizadas de uma mesma cidade (BROUSSE et al., 2016; EMMANUEL; KRÜGER, 2012; KALOUSTIAN; BECHTEL, 2016; LECONTE et al., 2015; MONTEIRO, 2018; STEWART; OKE; KRAYENHOFF, 2014; UNGER; LELOVICS; GÁL, 2014).

#### 3.4. RELAÇÃO ENTRE O FATOR DE VISÃO DO CÉU E O MICROCLIMA LOCAL

O fator de visão do céu é um parâmetro adimensional que representa a quantidade de céu visível em um dado local. Seu valor varia de zero (vista totalmente obstruída) a um (vista totalmente livre) e pode ser obtido por meio de equações analíticas (OKE, 1981; JOHNSON E WATSON, 1987), análise de imagens (MATZARAKIS E MATUSCHEK, 2011) ou simulações tridimensionais. Por ser derivado a partir da geometria urbana, o FVC está também intimamente ligado à quantidade de energia térmica que um dado local consegue receber e dispersar para a atmosfera, exercendo assim influência significativa sobre seu microclima. A exemplo disso, pode-se citar o trabalho de Collishon e Ferreira (2015) na cidade de Pelotas (RS): em ao menos 70% do tempo, no período avaliado, pontos com baixos valores de FVC (de 0,0 a 0,2, indicando alta obstrução) apresentam valores de temperatura do ar acima da média enquanto pontos com altos valores de FVC (entre 0,8 e 1,0, indicando baixa obstrução) apresentam temperatura do ar abaixo da média.

Essa influência microclimática tem sido explorada em estudos da UHI que demonstram ser possível parametrizar sua intensidade em relação ao valor de SFV com significativo grau de confiança. Com base na temperatura aferida durante a noite em diversos pontos de Vancouver (Canadá), com FVC entre 0,28 e 0,86, Oke (1981) estimou uma correlação entre a intensidade máxima da UHI e o FVC, para a região central de uma área urbana, com coeficiente de determinação igual a 0,88. Souza et al. (2010) aplicaram esta relação proposta por Oke (1981) na cidade de Bauru, a fim de estimar a intensidade da UHI em dez localidades. Em pontos que apresentavam FVC acima de 0,82, as estimativas apresentaram boa concordância com temperaturas medidas em



campo. No entanto, nos pontos com FVC entre 0,68 e 0,82, foi verificada uma grande discordância entre os valores estimados e medidos. A equação de Oke foi então corrigida, considerando as diferenças encontradas, e aplicada novamente a outros pontos da cidade com valores de FVC abaixo de 0,82, com coeficiente de determinação de 0,91.

Em linha com os resultados apontados por Souza et al. (2010), os trabalhos de Cheung, Coles e Levermore (2016) e Chen et al. (2012) também verificaram existir uma forma de limite do valor do FVC abaixo do qual ocorre uma mudança expressiva de sua influência no microclima local. Analisando dados de 59 localidades da região metropolitana de Manchester, Cheung, Coles e Levermore (2016) verificaram que a correlação entre a intensidade da UHI e o FVC apresenta coeficiente de determinação mais elevado quando são considerados apenas locais com FVC inferior a 0,65 do que quando são considerados todos os locais. Os coeficientes de determinação avaliados foram de 0,65 e 0,32, em noites de verão e de 0,53 e 0,32, em noites de inverno. Relação similar foi encontrada por Chen et al. (2012) em um estudo realizado em Hong Kong. Considerando a intensidade da UHI medida em 41 pontos com valores de FVC médios para um raio de 100 m entre 0,2 e 0,75, verificou-se uma correlação com coeficiente de determinação de 0,65.

Por apresentar correlações significativas com a intensidade das UHI, este parâmetro é continuamente estudado em pesquisas que buscam compreender e modelar este fenômeno (NAKATA-OSAKI; SOUZA, 2016), analisar as condições de conforto ambiental em espaços urbanos abertos (HE et al., 2015; KRÜGER; DRACH; BROEDE, 2017; LIN et al., 2012) ou propor ferramentas de planejamento urbanístico que resultem em ambientes de melhor qualidade térmica (WANG; AKBARI, 2014; YAN et al., 2014).

### 3.5. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA O FATOR DE VISÃO DO CÉU

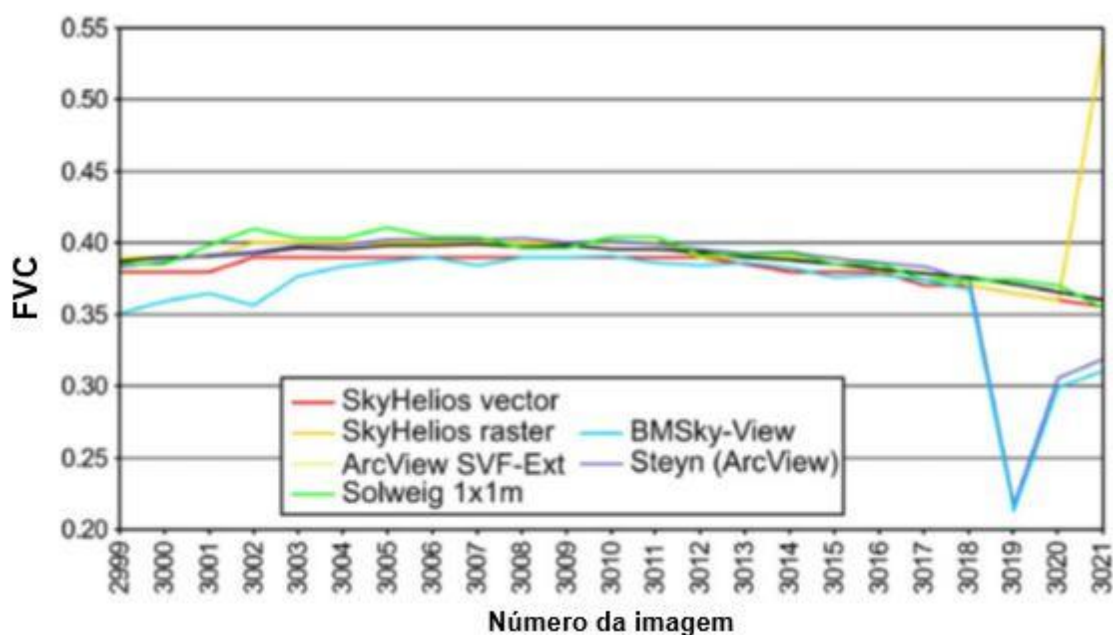
A análise gráfica de fotografia hemisférica do dossel urbano, registrada através de câmera equipada com lente olho de peixe, vem sendo utilizada em estudos climáticos desde a década de 80 e é reconhecida como o método mais objetivo para a obtenção do valor de FVC (STEYN, 1980). Inicialmente, o cálculo era feito de maneira manual, com o uso de papel gráfico com coordenadas

polares sobreposto a imagens registradas por câmeras analógicas. Desde então, o advento das câmeras digitais reduziu o custo da geração e tratamento das imagens, enquanto os avanços da tecnologia computacional facilitaram e deram maior velocidade ao processamento das informações gráficas em dados numéricos. Assim, tornou-se possível obter valores de FVC de maneira objetiva para um número muito maior de pontos em reduzido período de tempo, com baixo custo e pouco esforço, garantindo que este método continue em uso até os dias de hoje. Como limitações, permanecem o cuidado com o posicionamento da câmera no momento de registro da fotografia, podendo gerar alteração nos valores obtidos (GRIMMOND, 2001) e a impossibilidade de obter valores contínuos.

Conforme verificado em Hämmerle et al. (2011), os valores de FVC obtidos através de métodos computacionais (Solweig 1x1m, SkyHelios vector e SkyHelios raster) apresentam grande compatibilidade com os valores obtidos através do método de análise gráfica (ArcView SVF-Ext, BMSky-View e Steyn).

Assim, por agregar facilidade de aplicação em áreas extensas à resultados consistentes, tem sido frequente a aplicação dos métodos computacionais nos estudos que utilizam o FVC como parâmetro de estudo das condições microclimáticas, uma vez que estes são.

**Figura 12** – Comparação de valores de FVC obtidos por métodos computacionais e análises gráficas de uma fotografias hemisféricas



Fonte: Adaptado de HÄMMERLE et al. (2011)

### 3.6. MONITORAMENTO DE PARÂMETROS CLIMÁTICOS EM MEIOS URBANOS

O conhecimento a respeito do clima e suas tendências ao longo do tempo é de fundamental importância para decisões realizadas diariamente em todo o mundo; agentes dos mais diversos setores da sociedade baseiam-se neste conhecimento. Nos melhores casos, decisões inadequadas trazem resultados não ótimos. Nos piores casos, seus resultados podem ser catastróficos. Portanto, é natural que a ciência da meteorologia trate com extrema seriedade a obtenção de dados climáticos, da qual deriva esse conhecimento. A instalação e operação de estações meteorológicas seguem padrões rigorosos, estabelecidas pela Organização Mundial de Meteorologia (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008). Busca-se, assim, isentar os dados de qualquer distorção provocada por influência antrópica, direta ou indireta, como o aquecimento do ar verificado em áreas urbanas.

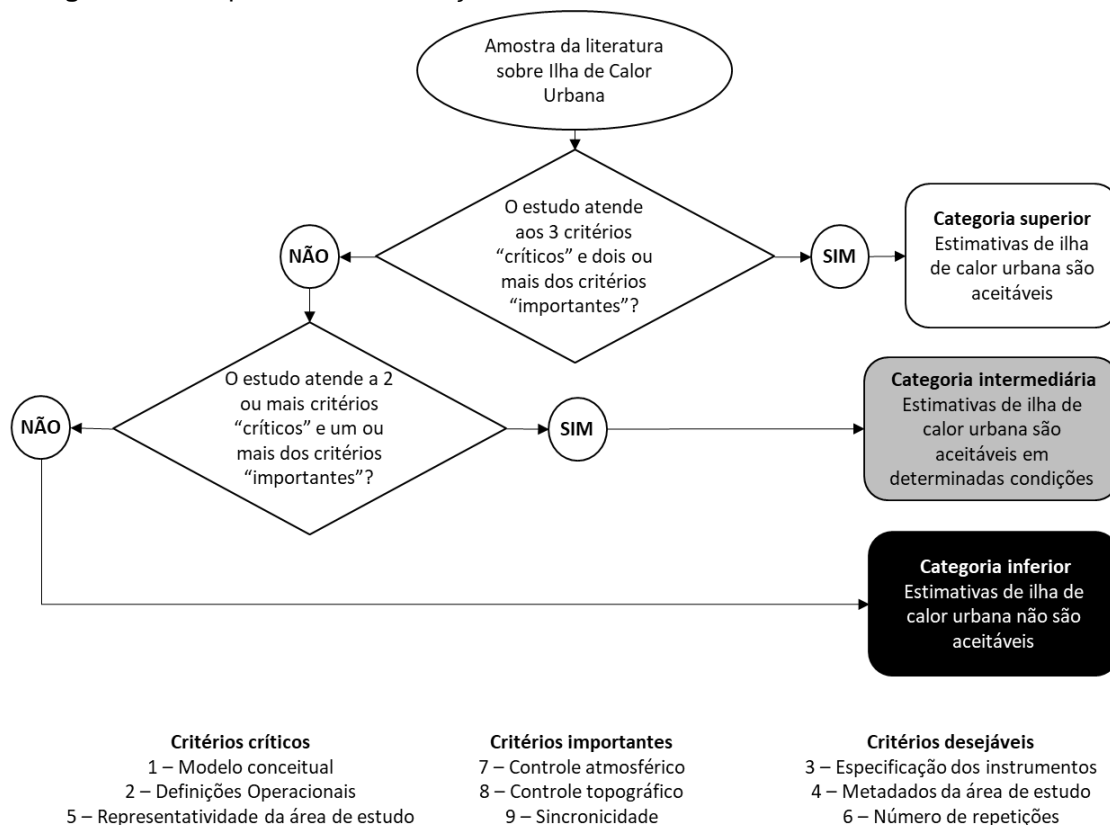
Se, por um lado, a meteorologia clássica almeja isentar seus estudos de alterações climáticas provocadas por uma proximidade com o tecido urbano, essas mesmas alterações consistem no objeto de estudo central da climatologia urbana. Por definição, este ramo científico demanda observações realizadas em ambientes intraurbanos e com uma conduta de observação com embasamento técnico e critério científico. As influências antrópicas aceitáveis em estudos de climatologia urbana se restringem àquelas que dão origem ao caráter microclimático do local em estudo. Ou seja, a coleta de dados deve ser estruturada de modo a refletir as características ambientais predominantes da região, proporcionando resultados representativos.

A atenção em relação aos métodos empregados na aquisição de dados pode ser verificada desde o princípio da climatologia urbana. O trabalho pioneiro de Howard (2007) já apresentava descrição detalhada dos locais de instalação dos instrumentos utilizados, apesar das inconsistências na escolha destes locais. A exposição dos equipamentos variava além do que seria considerado como padrão até mesmo para a época (CHANDLER, 1965). Enquanto o termômetro situado em Plaistow, uma vila 6,4 km ao leste de Londres (Inglaterra), foi pendurado em uma árvore, o termômetro situado em Tottenham, distrito ao norte da área central de Londres, foi posicionado na fachada norte de uma casa, a 3 m do solo.

Ainda que avanços tecnológicos ligados à microeletrônica, telecomunicações e computação permitam aos pesquisadores contemporâneos realizar a aquisição automatizada e visualização em tempo real de um volume muito maior de dados climáticos com maior precisão, incertezas permanecem quanto à representatividade destes dados. Isso se deve, em grande parte, à adoção de procedimentos amostrais falhos ou tratamento inadequado dos dados (STEWART, 2011). Em uma amostra de 190 observações do clima urbano, contidas em 177 estudos científicos publicados entre 1950 e 2007, apenas 19 (10%) apresentam elementos suficientes para que sejam consideradas como observações de alto padrão. A forma de avaliação das observações ocorreu com a adoção de nove critérios: adesão ao modelo conceitual de ilha de calor urbana, descrições operacionais, especificação de instrumentos, caracterização da área de estudo, representatividade da área de estudo, controle meteorológico, controle do relevo e sincronismo ou ajustes temporais (STEWART, 2011). A Figura 13 apresenta o esquema de classificação utilizado.

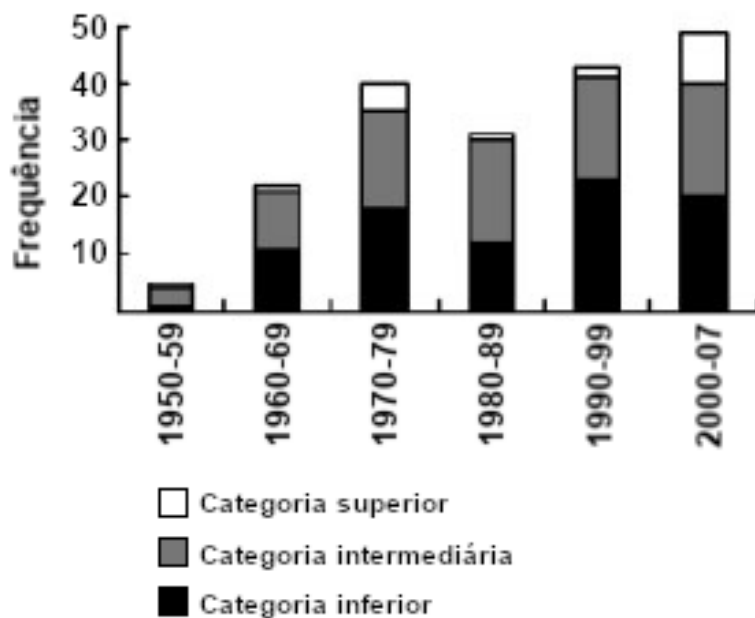
Metade das observações de alto padrão analisadas pertencem ao grupo de estudos mais recentes, realizados entre 2000 e 2007, o que representa 20% do total de estudos neste grupo. Os demais estudos realizados nesse período se encontram igualmente divididos entre baixo e médio padrão. A comparação desses resultados com aqueles obtidos por estudos realizados nas quatro décadas anteriores pode ser realizada através do gráfico apresentado na Figura 14. É possível notar que o panorama da qualidade dos estudos empíricos a respeito de ilhas de calor urbanas no período mais recente, embora ainda insatisfatório, apresenta tendências de melhora em relação aos períodos anteriores, com uma diminuição na proporção de estudos de baixo padrão e aumento significativo dos estudos de alto padrão.

**Figura 13** – Esquema de classificação de amostra da literatura sobre ilha de calor urbana.



Fonte: Adaptado de Stewart (2011)

**Figura 14** – Distribuição de frequência da amostra da literatura sobre ilha de calor urbana de acordo com a década e padrão de qualidade.



Fonte: Stewart (2011)

Dentre as medidas que conduzem a observações de maior qualidade destaca-se: a redução do escopo espacial e temporal do estudo, a descrição detalhada das características da área de investigação e suas vizinhanças e, por fim, a descrição explícita das limitações do trabalho (Stewart, 2007). Com a redução do escopo espacial e temporal do estudo, almeja-se coletas de dados reduzidas, porém controladas e representativas, agregando resultados de maior qualidade e expressão. A descrição detalhada das áreas de investigação e vizinhanças, preferencialmente através de métodos sistemáticos, como proposto por Stewart e Oke (2012), facilita a análise de suas similaridades, diferenças e representatividade por pares que não familiarizados com a região. A descrição explícita das limitações do estudo, sejam elas instrumentais ou metodológicas, esclarece o grau de certeza e confiabilidade dos resultados, podendo ser utilizados de maneira adequada para o desenvolvimento de outras pesquisas relacionadas. Em suma, com todos os avanços tecnológicos disponíveis e as inovações nos meios de obtenção de dados ambientais, os fundamentos da climatologia urbana ainda se mostram relevantes. Cabe ao pesquisador estabelecer claramente a escala de sua investigação e ajustar o escopo e o método de suas observações em conformidade com esta definição (Chandler, 1965).

Dentre os vários métodos utilizados para obtenção de dados climáticos urbanos, dois se apresentam como predominantes: a condução de medidas estacionárias e a de medidas móveis. A obtenção de medidas estacionárias consiste na instalação de equipamentos sensores em locais fixos, considerados representativos de seu entorno, para coleta de dados em intervalos fixos, durante um determinado período de tempo. A obtenção de dados em regime quase contínuo permite que seja feita uma avaliação de como as condições climáticas se desenvolvem na região de estudo. No passado, essa forma de monitoramento era realizada com termômetros ou termopares, que exigiam a presença de um operador para leitura e registro dos dados (HOWARD, 2007). Atualmente o uso de *dataloggers* portáteis é predominante, registrando as leituras de sensores digitais em sua memória e de maneira autônoma, conforme programados. Este tipo de equipamento necessita de manipulação apenas durante sua instalação e

remoção (ao final do estudo ou em um momento intermediário) para o descarregamento dos dados e reinstalação.

A obtenção de medidas móveis consiste na fixação de sensores a veículos, normalmente automóveis, balões ou aviões, para coleta de dados em uma área de grande extensão ou em locais onde a instalação de sensores não é possível. Na climatologia urbana, seu emprego é realizado, mais frequentemente, com a finalidade de obter uma vista em corte da UHI de uma determinada cidade (CARDOSO et al., 2017; CHANDLER, 1965; RODRIGUES DA COSTA, 2015), estimativa rápida do campo térmico de uma região, obtenção de dados complementares às estações fixas para identificação de variações térmicas no espaço entre estas (LECONTE et al., 2015; LIU et al., 2017b; MONTEIRO; PEZZUTO, 2017; YAN et al., 2014) ou avaliação de condições ambientais sob o ponto de vista do pedestre (TSIN et al., 2016). O emprego deste método deve ser feito com cautela devido às suas limitações, dado que a variação de temperatura entre o começo e o final do trajeto deve ser compensada. Um método possível é percorrer o trajeto novamente no sentido de retorno e calcular a média entre as duas medições (CHANDLER, 1965). Outra opção é instalar sensores de monitoramento fixos ao longo do percurso, de modo que a variação da temperatura local possa ser compensada (MONTEIRO, 2018). Outra limitação a ser considerada é o tempo de atraso do sensor. Em um cenário ideal, o veículo utilizado para o monitoramento deve ser estacionado em pontos de coleta pré-definidos, de modo que o sensor tenha tempo suficiente para estabilizar sua leitura, antes retomando seu deslocamento rumo ao próximo ponto de coleta. Esse raramente é o caso, no entanto. Devido à dificuldade de manobrar o veículo ou encontrar vagas em locais de tráfego intenso, é usual que as medidas sejam realizadas com o veículo em movimento. Assim, métodos que corrigem as leituras de acordo com o tempo de estabilização do sensor (tempo de atraso) devem ser aplicados (HÄB; RUDDELL; MIDDEL, 2015). Por fim, o tratamento dos dados coletados deve ser conduzido de modo a filtrar dados que possam ter sofrido alterações de fontes de calor pontuais como, por exemplo, o calor oriundo de outros veículos em cruzamentos ou semáforos.

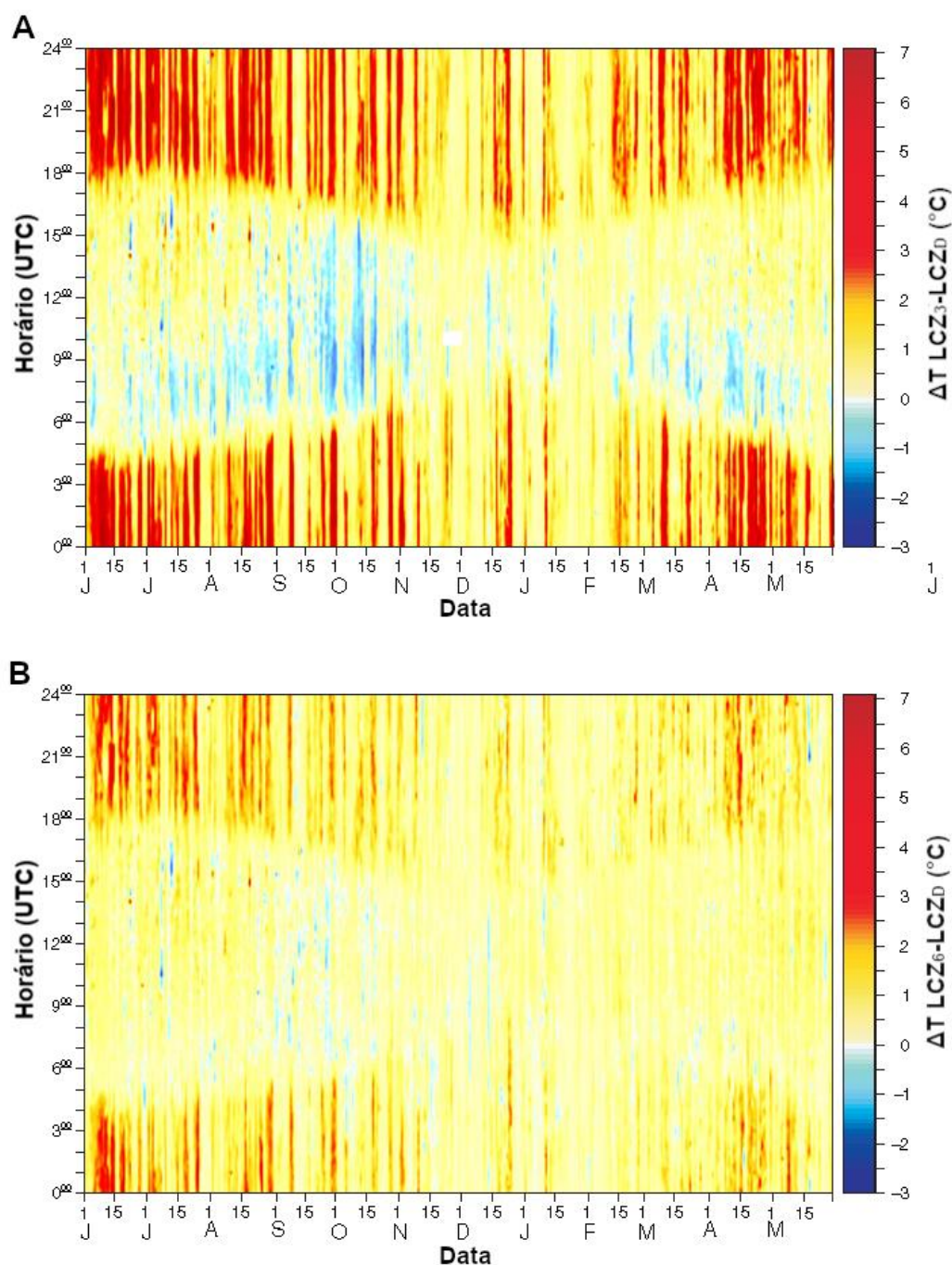
Com a emergência da computação ubíqua, novos paradigmas de monitoramento têm surgido. O primeiro e mais avançado deles consiste na

implementação de capacidade de comunicação sem fio nos instrumentos de monitoramento estacionário. Esses instrumentos passam a ser operados como uma rede de sensores e são capazes de transferir os dados coletados em tempo real (MULLER et al., 2013). Uma vez que a capacidade de armazenamento interno dos equipamentos deixa de ser um fator limitante, seu período máximo de operação autônoma passa a ser restrito apenas àquele de sua fonte de alimentação de energia. Caso o equipamento possua fonte de energia renovável, como uma bateria alimentada por painel fotovoltaico, ou alimentação direta da rede elétrica, sua operação se estenderá por período indefinido. A transmissão em tempo real dos dados obtidos permite, ainda, o constante monitoramento do status dos sensores e a detecção imediata de falhas. Isto confere robustez ao estudo, evitando que falhas sejam detectadas somente ao final de um período de coleta, com longas séries de dados já perdidas. Assim, a aquisição de dados por meio de uma rede integrada de sensores sem fio garante benefícios em termos de facilidade operacional e confiabilidade para os estudos climáticos urbanos, viabilizando a expansão do número de locais monitorados e do período de monitoramento.

Em estudo conduzido na cidade de Sverzed (Hungria), a temperatura do ar foi monitorada simultaneamente em 20 localidades distintas por um período de um ano (SKARBIT et al., 2017). Assim, foi possível examinar a intensidade da ilha de calor urbana anual e sazonal, em condições climáticas médias ou ótimas, de acordo com o padrão de urbanização verificado nestes locais. A intensidade da ilha de calor medida na LCZ<sub>3</sub>, composta por edificações baixas e compactas, é apresentada na Figura 15-A. A intensidade da ilha de calor medida na LCZ<sub>6</sub>, composta por edificações baixas e esparsas, é apresentada na Figura 15-B. Em ambos os casos, o referencial de temperatura adotado foi aquele medido na LCZ<sub>D</sub>, composta por vegetação rasteira. É possível observar que a LCZ<sub>3</sub> apresenta maior intensidade de ilha de calor durante o período noturno, enquanto a LCZ<sub>6</sub> apresenta maior aquecimento durante o período diurno. Apesar de ambas as LCZs apresentarem variações diárias, um padrão anual também pode ser observado.



**Figura 15** – Diferença de temperatura anual e diária verificada em diferentes zonas climáticas locais da cidade de Sverzed, Hungria.



Fonte: Skarbit et al. (2017)

Em comparação com um estudo prévio que avaliou a intensidade da ilha de calor da mesma cidade através de monitoramento móvel em um período reduzido de dias, foram encontradas diferenças de até 0,8 °C quando considerada a média anual. Quando considerados apenas os dias ideais, essa diferença chega a 2,4 °C. Os resultados dos dois estudos estão apresentados na Quadro 2.

**Quadro 2** – Sumário de resultados de estudos empíricos a respeito da ilha de calor em zonas climáticas da cidade de Sverzed.

Cidade, País	Período avaliado Número de dias (n) Medidas fixas ou móveis (f/m)	Diferença de temperatura entre Zonas Climáticas Locais (°C)					
		2-D	3-D	5-D	6-D	8-D	9-D
Szeged, Hungria (Unger <i>et al.</i> , 2014)	Anual (n=35, m)	2,6	2,5	2	1,3	2,1	0,9
	Março (n=1, m)	5,6	4,6	3,3	1,2	3,1	0,1
Szeged, Hungria (Skarbit <i>et al.</i> , 2017)	Anual (n=365, f)	2,9	3	2,8	1,9	2	1,7
	Verão (n=92, f)	3,6	3,8	3,4	2,4	3	1,9
	Outono (n=91, f)	2,6	2,7	2,6	1,7	1,9	1,6
	Inverno (n=90, f)	2,2	2,2	2,1	1,4	1,3	1,5
	Primavera (n=92, f)	3,4	3,6	3,3	2,2	2,4	1,9
	Dias ideais no ano (n=32, f)	4,5	4,5	4,4	2,3	2,9	1,5
	Dias ideais no verão (n=12, f)	4,8	4,7	4,6	2,7	3,3	1,7
	Dias ideais no outono (n=10, f)	4,6	4,7	4,7	2,4	3,1	1,6
	Dias ideais no inverno (n=5, f)	3,3	3,3	3,2	1,8	2	1,6
	Dias ideais na primavera (n=5, f)	4,3	4,1	3,8	1,9	3,4	0,8

Os valores representam diferenças da temperatura do ar entre classes de LCZs.

E.g.:  $\Delta T(LCZ_2-LCZ_D)$ .

Fonte: adaptado de Skarbit et al. (2017)

Ainda mais recente que as redes de sensores sem fio, pode-se citar o *crowdsourcing*<sup>2</sup> de dados ambientais (CHAPMAN; BELL; BELL, 2017; KAMEL BOULOS et al., 2011). Neste método, dados coletados por estações meteorológicas amadoras ou outros dispositivos são utilizados para adensar e expandir a rede de sensores, garantindo maior resolução e área de cobertura aos estudos. Neste caso é importante ressaltar a necessidade de um tratamento criterioso dos dados, uma vez que a instalação e utilização dos equipamentos é feita por pessoas que, em sua maioria, não possuem o conhecimento técnico na área de climatologia. Estima-se que quase metade das estações apresentam leituras distorcidas devido à instalação ou utilização incorreta (MEIER et al., 2017).

Em uma análise comparativa de registros climáticos em Londres realizados por uma rede esparsa de estações meteorológicas padrão (sete estações) e uma rede densa de estações meteorológicas amadoras (287

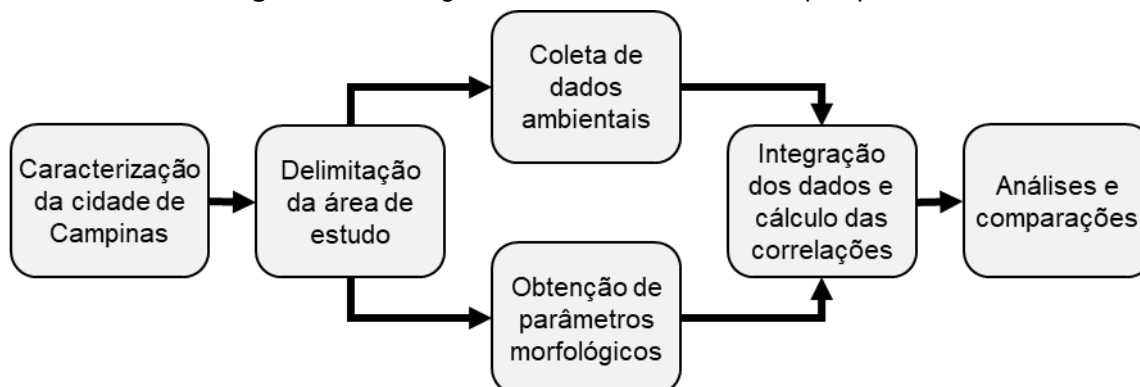
<sup>2</sup> Tradução livre: Aquisição de dados de multidão. Método que utiliza equipamentos de uma multidão de indivíduos como componentes de uma rede colaborativa para obtenção de dados em massa.

estações), Chapman, Bell e Bell (2017) verificaram que a rede amadora mapeou adequadamente os padrões microclimáticos da cidade e apontou a elevação da intensidade da UHI em condições de estabilidade atmosférica, embora tenha apresentado tendência de superestimação as temperaturas medidas. Esta mesma tendência foi verificada em Berlim (Alemanha), em estudo que comparou uma rede de dez estações meteorológicas oficiais com dados filtrados de uma rede de 1535 estações amadoras (FENNER et al.,2017). As diferenças encontradas foram atribuídas a possíveis falhas na locação dos equipamentos e baixa ventilação dos sensores devido a questões de *design*. Destaca-se o potencial que este método apresenta na aquisição de dados de alta resolução espacial, especialmente um esforço conjunto entre o meio acadêmico e os fabricantes no sentido de aprimorar o *design* do produto e orientar os usuários finais quanto à importância de sua instalação e documentação.

## 4. MATERIAIS E METODOS

A fim de avaliar a correlação entre o fator de visão do céu e a temperatura do ar em diferentes zonas climáticas locais da cidade de Campinas, esta pesquisa foi estruturada e desenvolvida de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 16.

**Figura 16** – Fluxograma de desenvolvimento da pesquisa



A partir da caracterização geral de seus aspectos climáticos e urbanísticos, um recorte espacial do município foi selecionado como área de estudo. Dados referentes às condições atmosféricas intraurbanas (temperatura e umidade) foram coletados ao longo de uma série de três dias. Após a coleta, estes dados foram tratados e espacializados, resultando em um modelo da intensidade da ilha de calor da área de estudo. Parâmetros morfológicos foram obtidos por meio do geoprocessamento de dados fornecidos pela Prefeitura de Campinas e coleta de dados *in loco*, de modo que fossem identificadas e classificadas as Zonas Climáticas Locais da área de estudo. Através da associação destes dados, ambientais e morfológicos, foram obtidas as correlações entre o Fator de Visão do Céu e a variação da temperatura do ar para um conjunto de Zonas Climáticas Locais. Os resultados foram comparados entre si e com outros estudos que também abordaram essa correlação.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DA CIDADE DE CAMPINAS

A cidade de Campinas situa-se no interior do estado de São Paulo, possui área total de 796,4 Km<sup>2</sup>, dividida entre 388,9 Km<sup>2</sup> de área urbanizada e 407,5 Km<sup>2</sup> de área rural (CAMPINAS, 2018) e população estimada de 1,82 milhão de habitantes, sendo a 14<sup>a</sup> cidade mais populosa do Brasil (IBGE, 2017). Campinas apresenta altíssimo grau de urbanização com 98,28% de sua população

residindo em áreas urbanizadas, valor superior à média nacional (86%) e mundial (54%, UNITED NATIONS, 2018). Apesar de a sede do município situar-se a latitude S 22°53'20", longitude O 47°04'40", próxima do trópico de Capricórnio, a cidade de Campinas encontra-se em um planalto da região sudeste do território brasileiro, a 680 metros acima do nível do mar. Assim, possui clima classificado como tropical de altitude (Cwa), segundo a classificação de s, caracterizado por temperaturas máximas mais amenas (com a média das máximas encontrando-se próxima aos 30,0°C durante o verão) e temperaturas mínimas mais pronunciadas (com a média das mínimas chegando próxima aos 12,0°C durante o inverno). A amplitude térmica média apresenta pouca variação, entre 10°C e 13°C durante todo o ano. Em relação às chuvas, a cidade apresenta um período chuvoso que vai de outubro a março e um período de seca entre abril e setembro. Os dados climáticos médios, obtidos pelo Centro de Pesquisa Meteorológica Aplicada a Agricultura (CEPAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), entre 1988 e 2008 podem ser verificados no Quadro 3.

**Quadro 3** – Clima de Campinas. CEPAGRI/UNICAMP, Jun/1988 a Out/2008

<b>Tabela: Clima de Campinas</b>									
Período	Temperatura do ar (°C)					Precipitação (mm)		Umidade (%)	
	Média	Máx. Média	Máx. Abs.	Mín. Média	Mín. Abs.	Média	Máx 24hs	(9hs)	(15hs)
<b>JAN</b>	24,7	29,7	36,2	19,8	14,0	280,30	132,2	78	57
<b>FEV</b>	24,9	30,0	35,6	19,9	14,2	215,9	104,8	78	54
<b>MAR</b>	24,7	29,9	35,0	19,6	15,0	162,3	107,6	73	50
<b>ABR</b>	23,1	28,5	34,1	17,6	7,0	58,6	68,0	72	47,00
<b>MAI</b>	20,0	25,5	32,0	14,5	4,0	63,3	143,4	75	46
<b>JUN</b>	18,8	24,8	31,0	12,9	0,0	35,4	35,5	75	43
<b>JUL</b>	18,5	24,8	32,0	12,3	2,0	43,3	50,8	73	41
<b>AGO</b>	20,5	27,2	34,4	13,8	5,0	22,9	34,2	67	36
<b>SET</b>	21,8	27,8	37,6	15,8	5,6	59,5	48,0	68	43
<b>OUT</b>	23,3	29,1	37,4	17,6	9,4	123,5	110,4	70	46
<b>NOV</b>	23,8	29,3	36,8	18,3	10,9	155,6	88,0	72	49
<b>DEZ</b>	24,3	29,6	36,0	19,1	11,6	203,9	126,5	75	54
<b>ANUAL</b>	22,4	28,0	37,6	16,8	0,0	1424,50	143,4	73	47,00

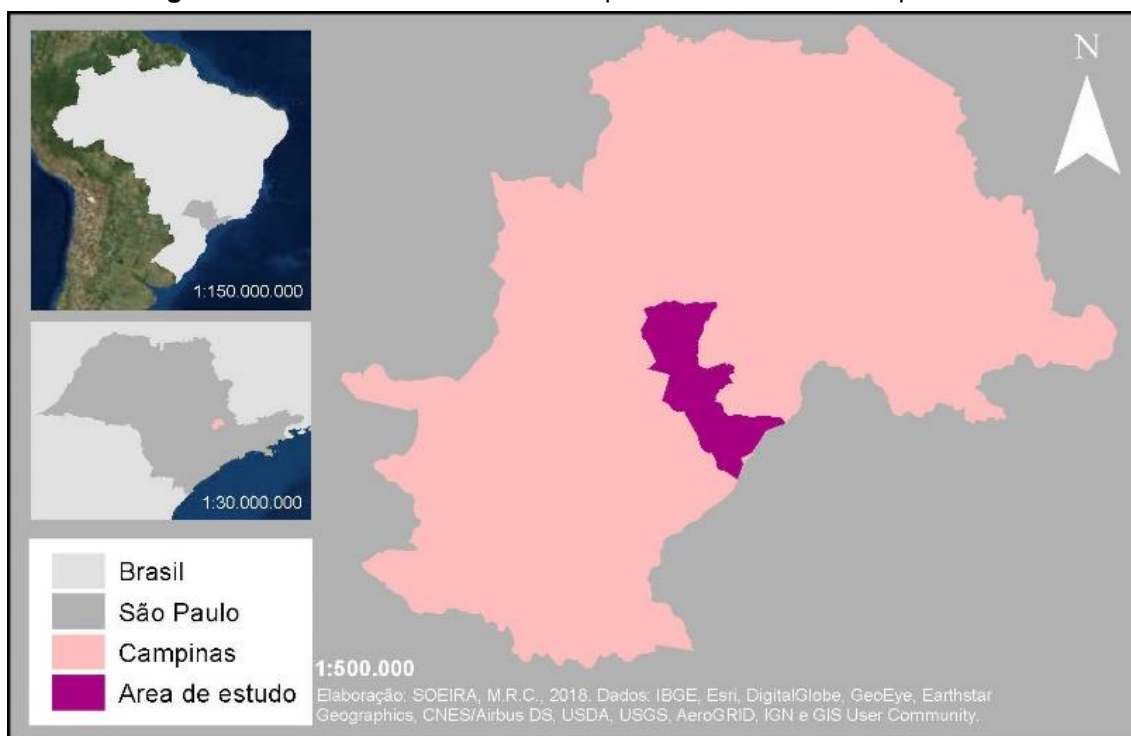
Fonte: CEPAGRI/UNICAMP (2018)

#### 4.2. SELEÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O recorte da zona urbana de Campinas foi selecionado como área de estudo com base em inspeção visual de imagens orbitais no software Google

Earth Pro (GOOGLE, 2018a) e visitas presenciais. Buscou-se um recorte da cidade composto por áreas urbanizadas e contíguas, onde fossem verificados padrões de uso e ocupação do solo distintos entre si. Em relação à extensão e limites destas áreas, optou-se pelo uso dos limites estabelecidos pelas Unidades Territoriais Básicas (UTBs) contidas no Plano Diretor Estratégico (PDE) vigente do município (CAMPINAS, 2018), uma vez que estas respeitam as divisas de barreiras urbanísticas (avenidas, rodovias, rios, etc.) e loteamentos, além de apresentar boa adequação aos padrões construtivos verificados em campo. Assim, o uso destes limites permitiu avaliar potenciais influências do Plano Diretor Estratégico do município nos microclimas verificados. Por respeitar também as divisas de setores censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o uso desses limites na definição da área de estudo também permite que, em outros estudos, sejam conduzidas análises entre o microclima urbano da região e indicadores socioeconômicos do município. O recorte selecionado foi composto por sete UTBs, identificadas no PDE como zonas de estruturação urbana (EU), corresponde a uma área total de 23,6 km<sup>2</sup> e está representado na Figura 17 .

**Figura 17** – Área de estudo: recorte espacial da cidade de Campinas-SP



Fonte: Adaptado de IBGE, 2017; ESRI, 2018.

### 4.3. OBTENÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS

Para a obtenção dos dados ambientais na área de estudo, foi adotado um método misto de coleta de dados que combinou a utilização de pontos fixos de monitoramento contínuo com a realização de campanhas intervaladas de medidas móveis. O emprego do monitoramento fixo teve como propósito observar a variação das condições atmosféricas intraurbanas ao longo do tempo durante todo o período de coleta dos dados. Já as campanhas de medidas móveis tiveram como finalidade ampliar a resolução espacial da pesquisa, permitindo que o campo térmico intraurbano da área de estudo pudesse ser mapeado com maior precisão.

Para o monitoramento fixo, foram definidos nove pontos de interesse, distribuídos em três grupos: o primeiro grupo foi distribuído em áreas onde predominam edifícios residenciais ou de escritório, medianamente compactos, com até dois pavimentos e alto grau de arborização viária; o segundo grupo foi distribuído em áreas onde predominam edifícios de quatro a vinte pavimentos, residenciais, comerciais ou de escritório com intensa atividade comercial nos andares térreos e médio grau de arborização viária; o terceiro grupo foi distribuído em áreas onde são encontrados edifícios residenciais ou de comércio, compactos, com até dois pavimentos e baixo grau de arborização viária. Em cada um destes grupos, buscou-se um ponto próximo a uma via de grande porte, um ponto em uma via local típica da região e um ponto em uma via local adjacente a uma área densamente arborizada (praça ou parque). Uma breve descrição das UTBs onde foram instalados os pontos fixos de monitoramento é apresentada no Quadro 4. A descrição do entorno imediato de cada um dos pontos fixos de monitoramento, por sua vez, é apresentada no Quadro 5. Fichas catalográficas contendo detalhes de cada um dos pontos, assim como fotos dos pontos de fixação e mapas do entorno são apresentadas no Apêndice I.

Os instrumentos utilizados para o monitoramento fixo foram *dataloggers* portáteis, modelo TEXTO 174H, protegidos do efeito de intempéries em mini abrigos meteorológicos, modelo Onset RS1 ou similar, fixados a postes de entrada de energia em alturas que variaram entre 2,9 e 4,0 m (APÊNDICE I). Esta altura foi definida por estar abaixo da camada limite urbana e oferecer

proteção contra potenciais atos de vandalismo. Segundo Oke (2006), entre três e cinco metros de altura o comportamento da camada apresenta poucas variações.

**Quadro 4** – Descrição dos pontos fixos de monitoramento

<b>UTB</b>	<b>Descrição geral</b>	<b>Bairros inclusos</b>	<b>Pontos de Monit.</b>
<b>22</b>	Região com predominância de edificações baixas com 1 ou 2 pavimentos, de uso residencial, comercial ou de serviços. Arborização viária média a alta, com presença de áreas verdes públicas (praças e bosques).	Jardim Brasil Jardim Chapadão Jardim Guanabara Vila Nova	<b>F_04</b> <b>F_05</b> <b>F_08</b>
<b>23</b>	Região grande adensamento, com predominância de quadras mistas, compostas por edificações de gabarito baixo alto. Uso majoritariamente comercial ou de serviços nas edificações baixas e residencial nas edificações altas. Arborização viária alta, com presença de praças e áreas verdes públicas.	Cambuí	<b>F_03</b> <b>F_07</b>
<b>26</b>	Região grande adensamento, com predominância de quadras mistas, compostas por edificações de gabarito médio a alto. Uso majoritariamente comercial ou serviços, com algum uso residencial no caso de edifícios altos.	Botafogo Centro Vila Itapura	<b>F_06</b>
<b>29</b>	Região com predominância de edificações baixas com 1 ou 2 pavimentos, de uso residencial, comercial ou de serviços. Presença de edifícios altos em certas áreas adjacentes a grandes eixos de circulação (Avenida Aquidabã e Av. Princesa D'Oeste). Arborização viária variável de baixa a alta, com presença de duas grandes áreas verdes densamente arborizadas (Bosque dos Jequitibás e Bosque São José) poucas praças e alguns amplos empreendimentos como estádios e colégios.	Bosque Guarani Jardim Primavera Jardim Proença Jardim São Fernando	<b>F_02</b> <b>F_09</b>
<b>32</b>	Região com predominância de edificações baixas, com 1 ou 2 pavimentos, de uso majoritariamente residencial. Presença intensa de edificações de uso comercial ou de serviços próximo à grandes eixos de circulação (Av. Eng. Antônio F. de Paula Souza). Presença de ampas áreas verdes ao sul da região.	Jardim Antônio Von Zuben Jardim dos Oliveiras Vila Carlito Vila Ipê	<b>F_01</b>

Fonte: o autor.



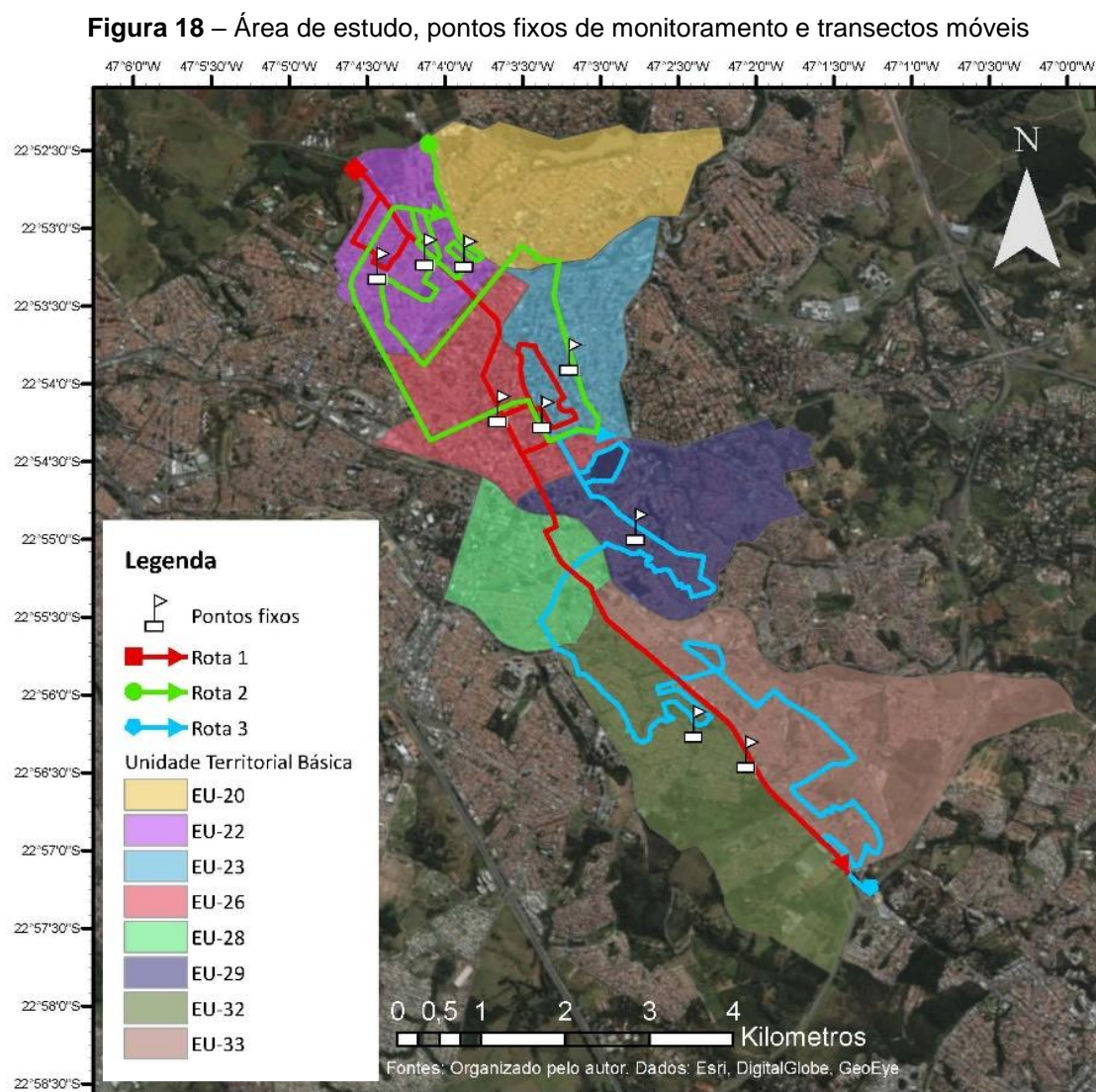
**Quadro 5** – Descrição do entorno imediato dos pontos fixos de monitoramento

UTB	Cod.	Descrição do ponto de instalação e entorno imediato	Altura
22	F_04	Poste de entrada de energia pertencente a uma residência térrea adaptada para prestação de serviços. Ponto situado no cruzamento de duas vias locais de mão dupla, com pouco trânsito durante todo o dia. Entorno composto predominantemente por residências térreas.	3,50
	F_05	Poste de entrada de energia pertencente a uma instituição educacional. Ponto situado no cruzamento de duas vias locais de mão dupla, diretamente em frente a um bosque densamente arborizado. Entorno composto por edificações térreas ou sobrados, de uso residencial ou de serviços.	3,00
	F_08	Poste de entrada de energia pertencente a um estabelecimento comercial. Ponto situado próximo ao cruzamento de duas avenidas de mão dupla e grande circulação de veículos. Entorno composto por edificações de térreas ou sobrados, de uso residencial, comercial ou	2,90
23	F_03	Poste de entrada de energia pertencente a um estacionamento. Ponto situado próximo ao centro do cânion, de frente a uma via local de circulação mediana, além de uma praça com alto grau de arborização. Entorno composto por edificações residenciais altas.	3,50
	F_07	Poste de entrada de energia pertencente a um estabelecimento comercial. Ponto situado próximo ao cruzamento de duas vias locais de grande circulação de veículos. Entorno composto por edificações de térreas ou sobrados, de uso comercial ou de serviços, e edifícios	3,00
26	F_06	Poste de entrada de energia pertencente ao estacionamento de um edifício tombado. Ponto situado no cruzamento de uma avenida de grande porte com uma via local estreita. Entorno composto por edificações gabarito médio a alto, com pouca ou nenhuma	3,50
29	F_02	Poste de entrada de energia pertencente a uma residência de dois pavimentos. Ponto situado em uma via local de mão dupla. Entorno composto por sobrados de uso residencial.	4,00
	F_09	Poste de entrada de energia pertencente a uma residência térrea. Ponto situado em uma via local de mão dupla, a menos de 50 m de um bosque densamente arborizado. Entorno composto por edificações de térreas ou sobrados, de uso residencial.	3,30
32	F_01	Poste de entrada de energia pertencente a uma residência térrea. Ponto situado próximo ao centro do cânion, em uma via local de baixa circulação de veículos. Entorno composto por edificações residenciais de um a dois pavimentos, com baixa arborização viária.	4,00

Fonte: o autor.

Para as campanhas de monitoramento móvel, foram definidos três transectos, de acordo com os seguintes critérios: primeiramente, suas extensões foram limitadas de modo que um automóvel não leve mais do que uma hora para percorrê-las em qualquer horário (mesmo em condições de tráfego intenso) a uma velocidade máxima de 40 Km/h; em segundo lugar, considerando o efeitos da orientação dos cânions urbanos em seus respectivos microclimas, priorizaram-se eixos de deslocamento com direção noroeste-sudeste ou

sudoeste-nordeste; por fim, buscou-se distribuir as rotas de maneira equilibrada entre avenidas e vias locais, cruzando pontos fixos de monitoramento, áreas verdes e cruzamentos entre rotas onde possível. Na Figura 18 são apresentados os pontos fixos de monitoramento e os transectos que foram percorridos durante coleta móvel de dados, assim como as UTBs do município de Campinas contempladas pela área de estudo.

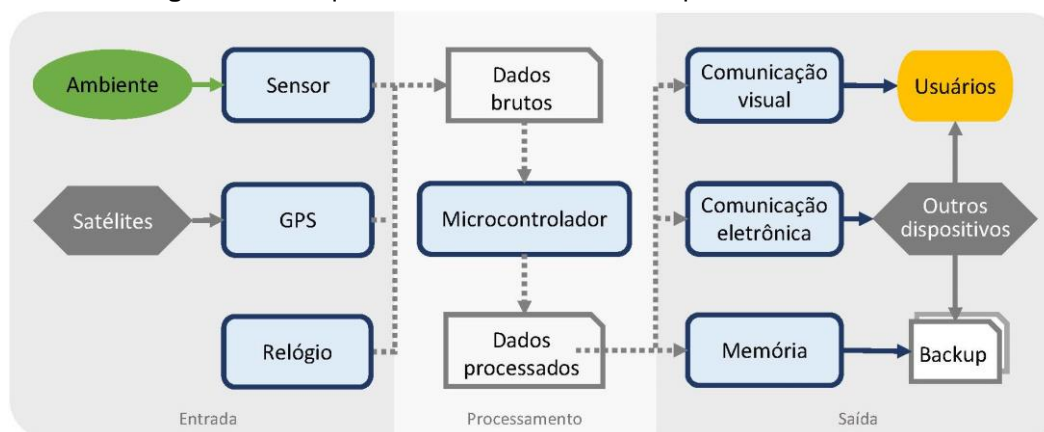


Fonte: o autor.

Para as medidas móveis, optou-se pelo desenvolvimento e utilização de um aparato para aquisição de dados georreferenciados, com frequência e sensibilidade superiores às do equipamento utilizado para o monitoramento fixo. Com maior frequência de aquisição, as distâncias entre os pontos de coleta de dados foram reduzidas. Com o reduzido tempo de resposta, o aparato foi capaz de medir com maior fidelidade variações microclimáticas abruptas e localizadas.

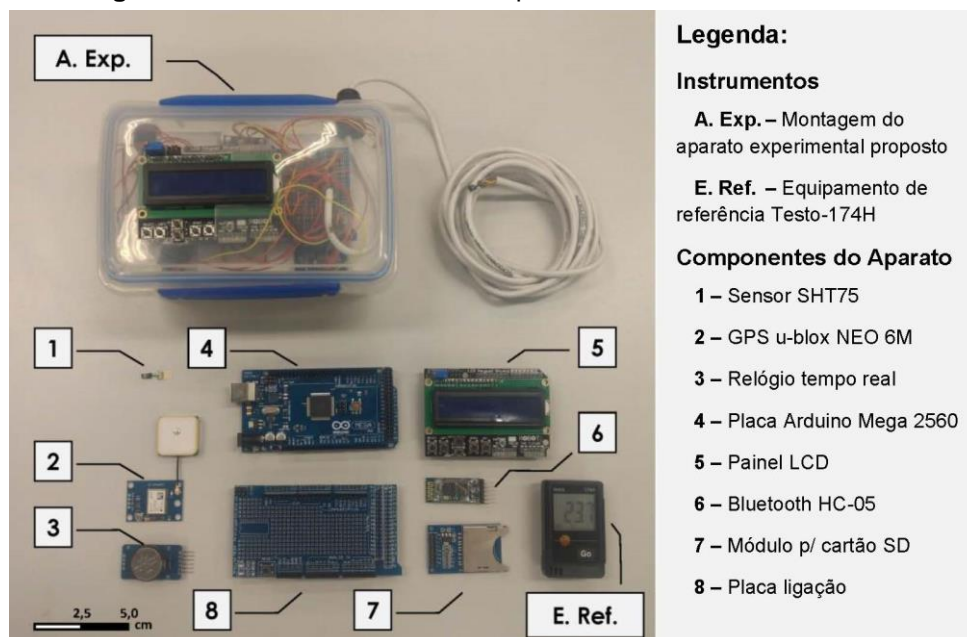
Baseado na plataforma de prototipagem Arduino, o aparato desenvolvido atendeu às necessidades da pesquisa ao agregar funcionalidades de módulos independentes. A coleta de dados foi feita pelos três módulos de entrada: i) sensor; ii) *Global Positioning System* (GPS); e iii) relógio de tempo real. O processamento dos dados (decodificação e organização) foi realizada por um módulo central composto por uma placa microcontroladora. Após processamento, os dados foram enviados para os três módulos de saída, que os armazenavam (cartão de memória), exibiam (visor de cristal líquido) e retransmitiam (*bluetooth*). Uma representação esquemática do funcionamento do aparato desenvolvido é apresentada na Figura 19. Sua montagem, seus componentes e o equipamento de referência, um *datalogger* Testo 174H (equipamento utilizado para o monitoramento fixo), são apresentados na Figura 20. As especificações de ambos os equipamentos são apresentadas no Quadro 6.

**Figura 19** – Esquema de funcionamento do aparato desenvolvido



Fonte: o autor.

**Figura 20** – Instrumentos utilizados para coleta de dados ambientais



Fonte: o autor.

**Quadro 6** – Quadro de especificação do datalogger Testo 174H e do aparato desenvolvido.

Instrumento	Equipamento de referência - E. Ref		Aparato experimental - A. Exp			
	Testo 174H		Modo de baixa resolução		Modo de alta resolução	
Variável	Tar	Uar	Tar	Uar	Tar	Uar
Resolução	0,10 °C	0,10 %	0,04 °C	0,40 %	0,01 °C	0,05 %
Precisão	±0,50 °C	±3,0 % entre 2 e 98 %	±0,30 °C	±1,8% entre 10 e 90 %	±0,30 °C	±1,8% entre 10 e 90 %
Frequência máx.de aquisição [med./min.]	1		60		12	
Capacidade de armazenamento	16 mil valores <sup>1</sup>		202 milhões de entradas de dados <sup>2</sup>			
Custo aproximado [R\$/US\$ <sup>3</sup> ]	1030,00/306,00		450,00/134,00			

**Notas:**

1 - Cada variável medida conta como 1 valor.

2 - Valor estimando considerando cartão de memória com capacidade útil de 14.8 GB, mesma utilizada durante os testes. Cada entrada de dado consiste em uma linha de texto com valores de data, hora, temperatura e umidade do ar, longitude, latitude.

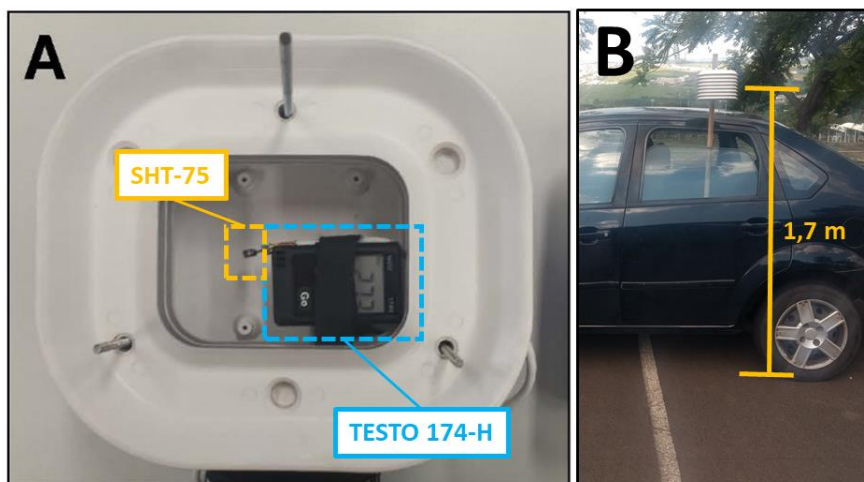
3 - Cotação do dolar em 06/04/2018 - R\$ 3,3680.

Fonte: o autor.

Para avaliar a calibração do aparato desenvolvido, o mesmo foi utilizado em paralelo ao equipamento de referência (*datalogger* Testo 174H) em todas as

campanhas de coleta. O sensor do aparato experimental e o equipamento de referência foram instalados em um mini abrigo meteorológico que, por sua vez, foi fixado a um automóvel a uma altura de 1,7 metros, conforme apresentado na Figura 21- quadros A e B.

**Figura 21** – Instrumentos utilizados para coleta de dados ambientais



Fonte: o autor.

A coleta de dados ocorreu no final do mês de agosto de 2018, entre os dias 20 e 23, a aproximadamente um mês do fim do período de inverno. Nesse período, os dataloggers utilizados para o monitoramento fixo foram instalados em seus respectivos pontos e programados para realizar a aquisição dos dados a cada dez minutos, mesmo intervalo de aquisição da estação meteorológica pertencente ao CEPAGRI. Esta estação foi utilizada como referência e se localiza ao norte da área de estudo, a uma distância dos pontos de monitoramento que varia de 7,5 a 13,5 km. Os detalhes de sua localização são apresentados no APÊNDICE I. As campanhas de medições móveis foram realizadas por três veículos que percorreram os transectos definidos, nos períodos da manhã, tarde e noite, em intervalos regulares de seis horas (09:00, 15:00 e 21:00). Enquanto um dos veículos foi conduzido pelo autor, os demais foram conduzidos por indivíduos não relacionados direta ou indiretamente à pesquisa. Ambos os indivíduos receberam o treinamento aproximado de duas horas acerca do escopo da coleta e da operação do aparato desenvolvido, incluindo uma única coleta demonstrativa, acompanhada pelo autor, no seu respectivo transecto. O aparato experimental foi configurado para realizar a aquisição de dados (data, hora, temperatura e umidade do ar, latitude, longitude,

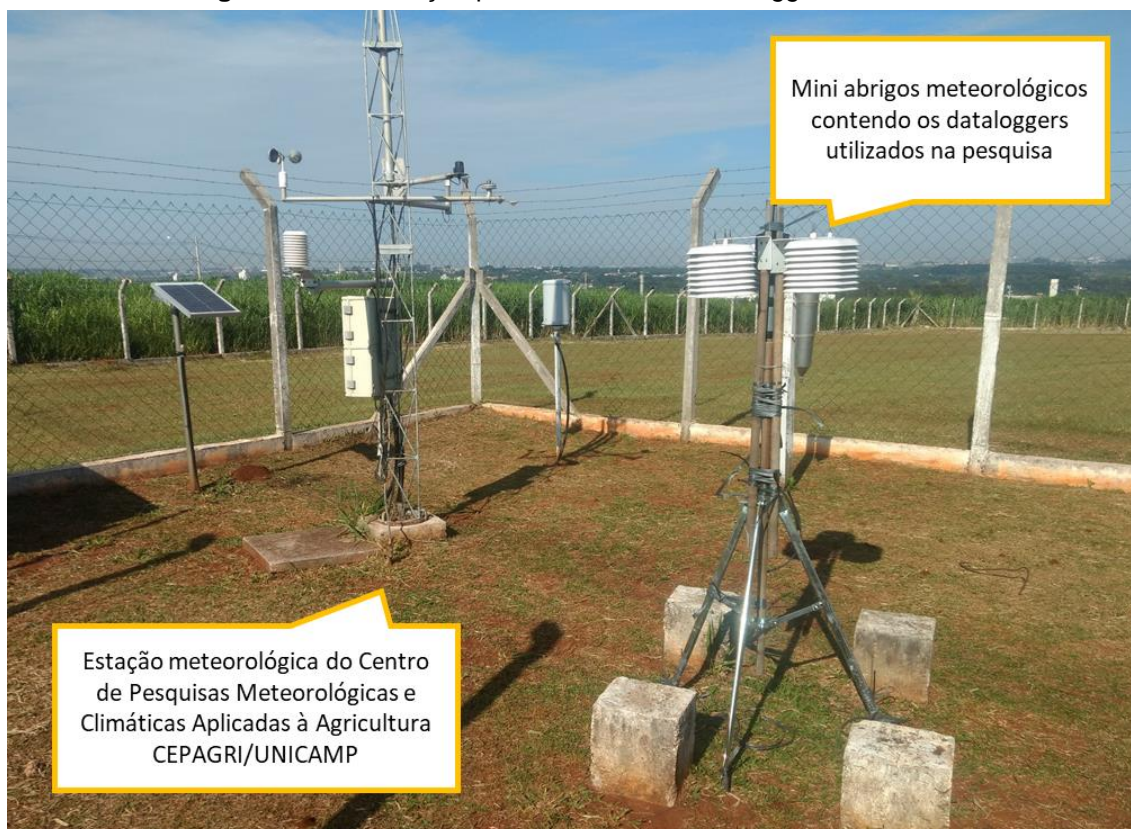


velocidade e orientação de deslocamento do veículo) no modo de alta resolução, a cada cinco segundos. O *datalogger* Testo 174H foi configurado de modo a coletar o maior número de medidas possíveis durante o transecto, registrando valores de temperatura e umidade do ar uma vez por minuto. Uma vez que este instrumento não possui GPS para realizar o georreferenciamento automático dos dados, as suas medidas foram comparadas àquelas registradas pelo aparato desenvolvido através do horário de aquisição dos dados.

Uma vez coletados, os dados ambientais passaram por um tratamento composto por duas etapas: filtragem e correção dos dados. O procedimento de filtragem teve como objetivo eliminar valores identificados como não válidos ou repetidos. No caso do monitoramento fixo, foram considerados valores não válidos aqueles que apresentavam grande discrepância ou incoerência com os demais valores coletados para um determinado período (como variações súbitas por curtas durações, ou valores em final de escala dos instrumentos). No caso das medidas móveis, foram considerados como valores repetidos aqueles coletados com o veículo em velocidades inferiores a 20 km/h e valores não válidos aqueles coletados com o veículo em velocidades superiores a 40 km/h; valores extremos e incoerentes com a realidade foram considerados como erros de medição. O procedimento de correção teve intuito de compensar variabilidades instrumentais, temporais e espaciais, quando necessário.

Através de um procedimento de calibração por referência, foi possível verificar os desvios entre os valores medidos pelos instrumentos utilizados durante a pesquisa (*dataloggers* Testo 174H) e o instrumento de referência: a estação meteorológica do CEPAGRI. Neste procedimento, os *dataloggers* utilizados foram instalados nas imediações da estação meteorológica, conforme pode ser observado na Figura 22, realizando coletas simultaneamente à esta (a cada dez minutos) por um período de nove dias. Assim, foram realizadas 1.200 medidas simultâneas.

**Figura 22** – Calibração por referência dos *dataloggers* utilizados



Fonte: o autor.

Com base nos valores medidos pela estação meteorológica, foi calculada a probabilidade de cada *datalogger* apresentar desvio inferior à  $\pm 0,6$  °C, precisão combinada dos equipamentos (Quadro 7). Em todos os casos, as probabilidades estimadas foram superiores a 92%.

**Quadro 7** – Estimativa do desvio entre os equipamentos utilizados e o equipamento de referência

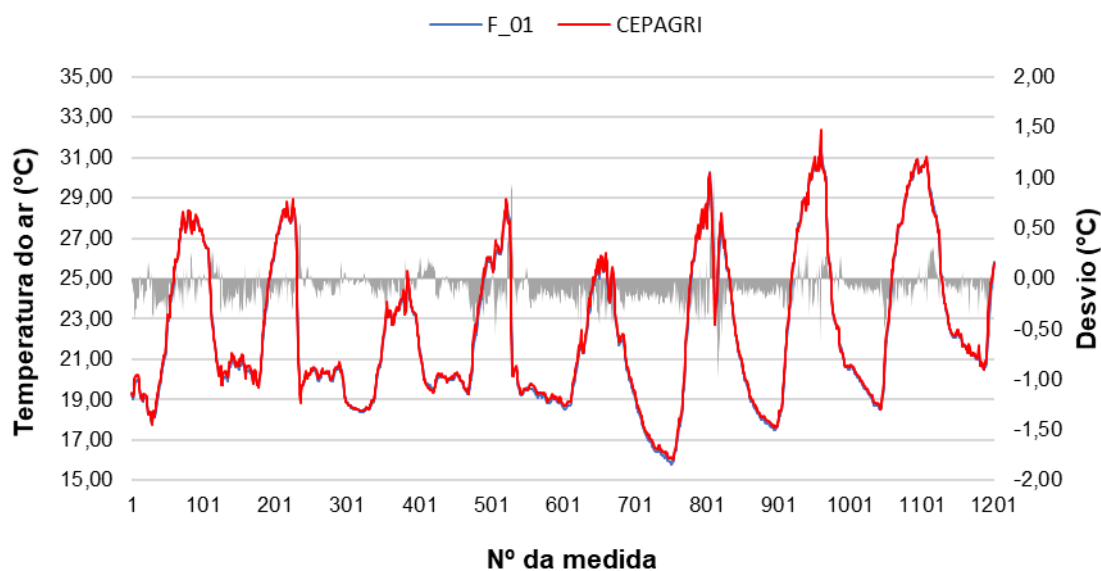
Datalogger	F_01	F_02	F_03	F_04	F_05	F_06	F_07	F_08	F_09	M_01	M_02	M_03
Desvio médio [°C]	-0,11	-0,20	-0,12	-0,16	-0,24	-0,12	-0,08	-0,19	-0,18	-0,06	-0,12	-0,05
$\sigma$ [°C]	0,17	0,26	0,19	0,24	0,26	0,29	0,32	0,25	0,19	0,32	0,25	0,33
$P(\pm 0,60$ °C)	1,00	0,94	0,99	0,97	0,92	0,95	0,93	0,95	0,98	0,94	0,97	0,93

Fonte: o autor.

Para confirmar a exatidão dos equipamentos, uma segunda etapa de verificação foi conduzida. Esta etapa consistiu em uma análise gráfica dos desvios entre os dados coletados pelos *dataloggers* e a estação meteorológica. Conforme exemplificado para o *datalogger* F\_01 na Figura 23, uma tendência de subestimar a temperatura do ar foi constatada em alguns instrumentos (F\_01, F\_02, F\_03, F\_04, F\_05, F\_08, F\_09, e F\_11). Em outros instrumentos (F\_06,

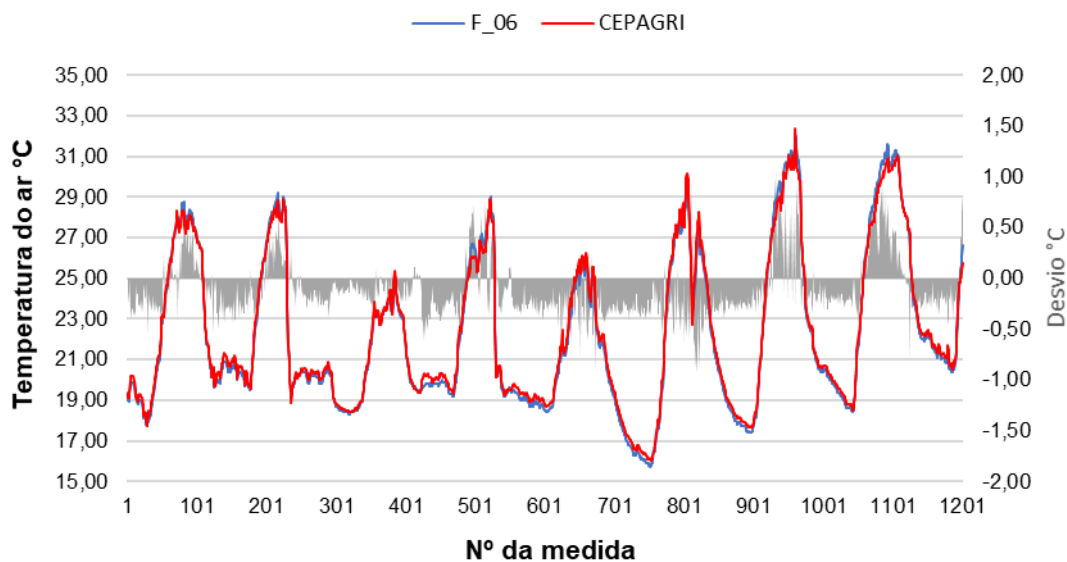
F\_07, F\_10 e F\_12), foi detectada a tendência de subestimar a temperatura do ar abaixo de determinados limites (aproximadamente 25°C) e superestimar-la acima destes, conforme exemplificado na Figura 24 para o *datalogger* F\_07.

**Figura 23** – Gráfico de análise de desvios: Datalogger F\_01 x CEPAGRI



Fonte: o autor.

**Figura 24** – Gráfico de análise de desvios: Datalogger F\_07 x CEPAGRI



Fonte: o autor.

Para corrigir estas tendências, equações de ajuste foi avaliadas no software *Curve Expert Basic* (HYAM, 2019). Com base em 72 modelos matemáticos, o software calcula as equações de ajuste, atribui uma pontuação (denominada *score*) a cada uma delas. Quanto maior a pontuação, maior a adesão do modelo



ao conjunto de dados. Para todos os equipamentos, o modelo de regressão linear obteve pontuação máxima ou próxima da máxima, de modo que foi escolhido como modelo padrão para potencial correção dos desvios (Quadro 8).

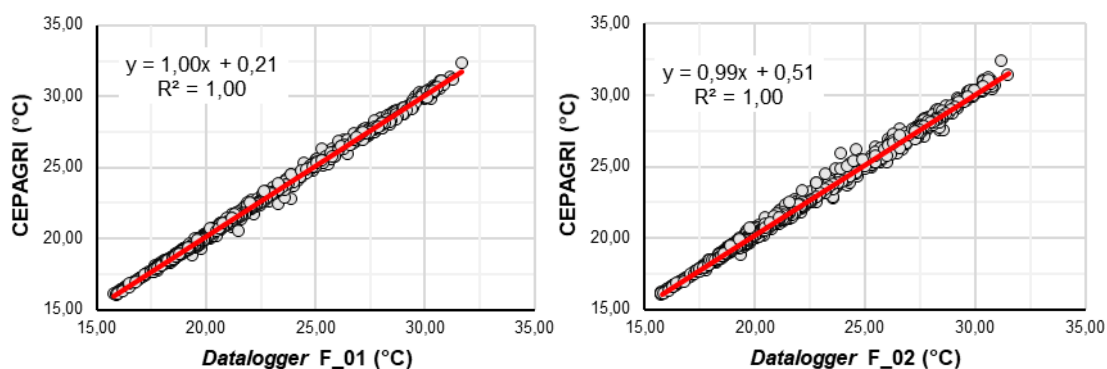
**Quadro 8** – Pontuação de adequação do modelo de regressão linear: *Datalogger* x Estação

<i>Datalogger</i>	Pontuação (score) máximo	Pontuação (score) da regressão linear	Equação da regressão linear	R <sup>2</sup>
F_01	988	988	1,00x + 0,21	1,00
F_02	993	992	0,99x + 0,51	1,00
F_03	991	991	1,00x + 0,04	1,00
F_04	987	987	1,01x - 0,04	1,00
F_05	988	988	0,98x + 0,72	1,00
F_06	990	988	0,96x + 1,08	1,00
F_07	988	986	0,96x + 1,08	0,99
F_08	987	987	0,99x + 0,51	1,00
F_09	991	991	1,01x + 0,03	1,00
M_01	988	986	0,95x + 1,07	1,00
M_02	989	989	0,97x + 0,69	1,00
M_03	988	987	0,95x + 1,28	1,00

Fonte: o autor.

Gráficos contendo as medidas realizadas pela estação meteorológica em função das medidas realizadas por cada *datalogger* e as respectivas regressões lineares podem ser observados na Figura 25.

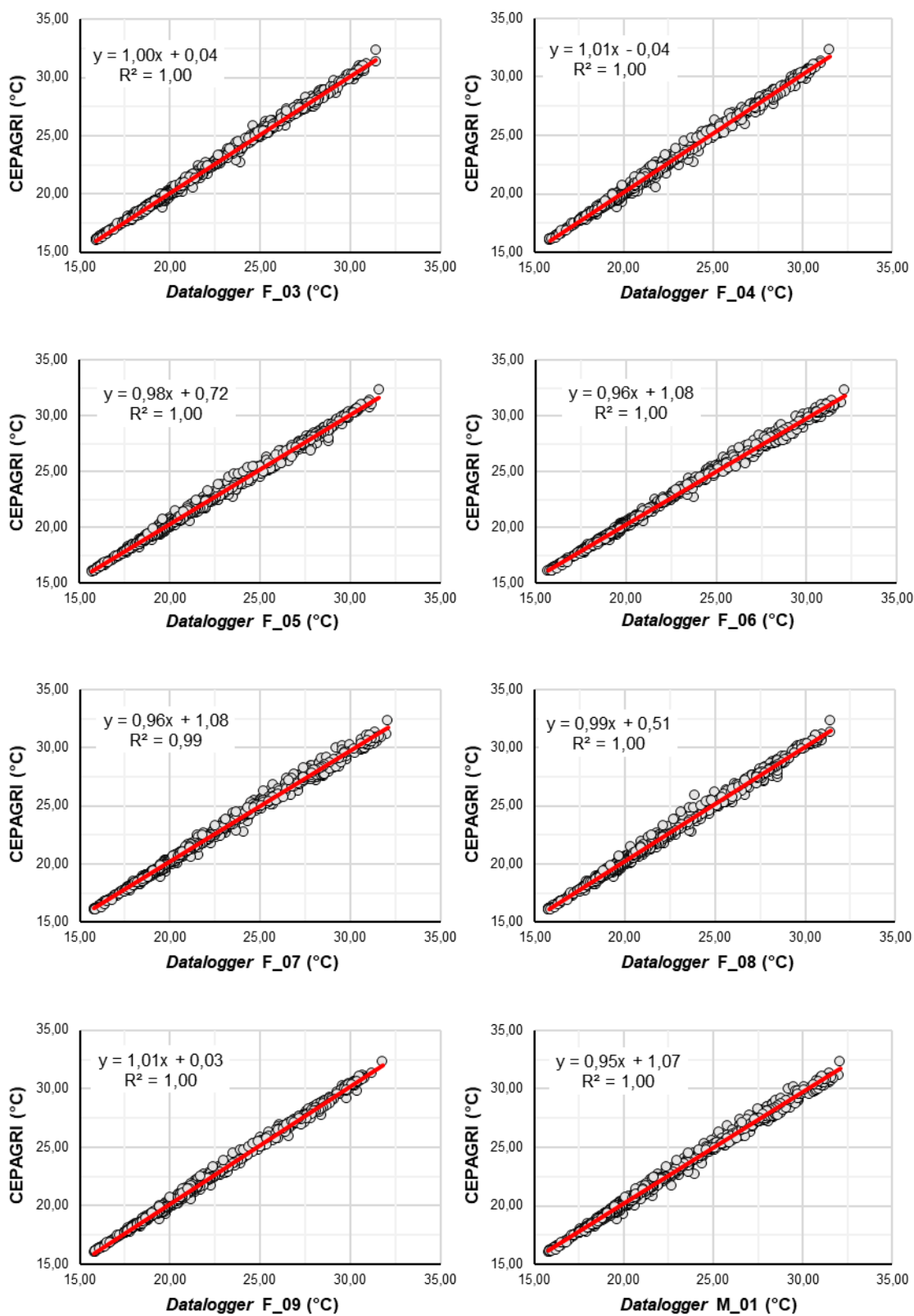
**Figura 25** – Calibração por referência: Gráficos para análise de distribuição dos desvios entre *dataloggers* e a estação meteorológica



(Continua)

**Figura 25** – Calibração por referência: Gráficos para análise de distribuição dos desvios entre *dataloggers* e a estação meteorológica

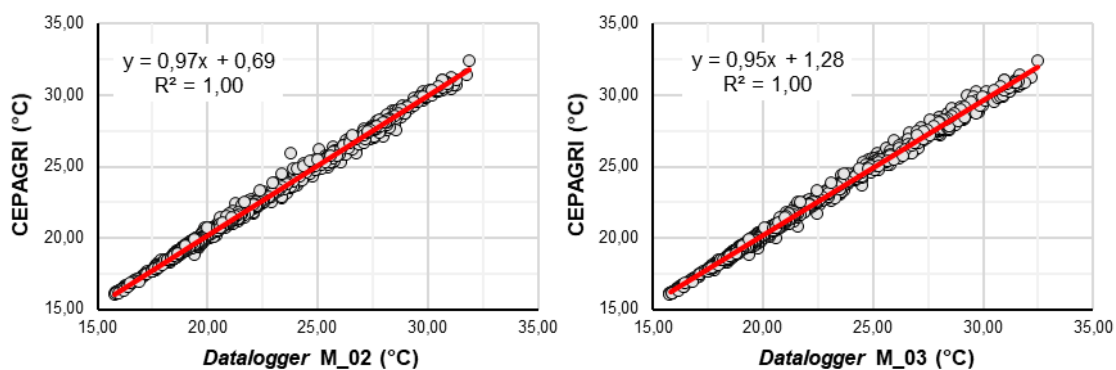
(Continuação)



(Continua)

**Figura 25** – Calibração por referência: Gráficos para análise de distribuição dos desvios entre *dataloggers* e a estação meteorológica

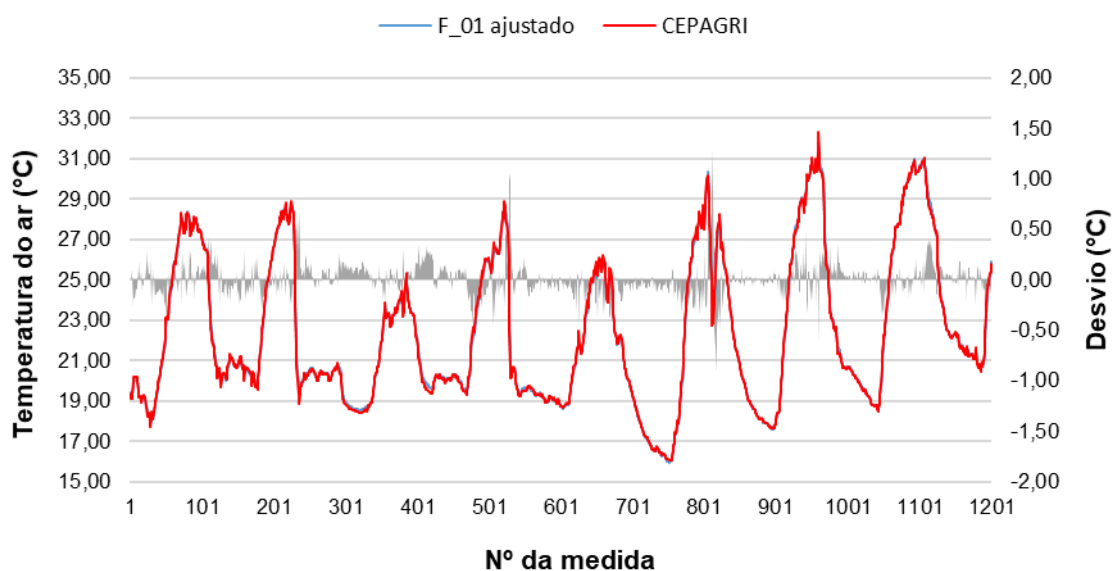
(Conclusão)



Fonte: o autor.

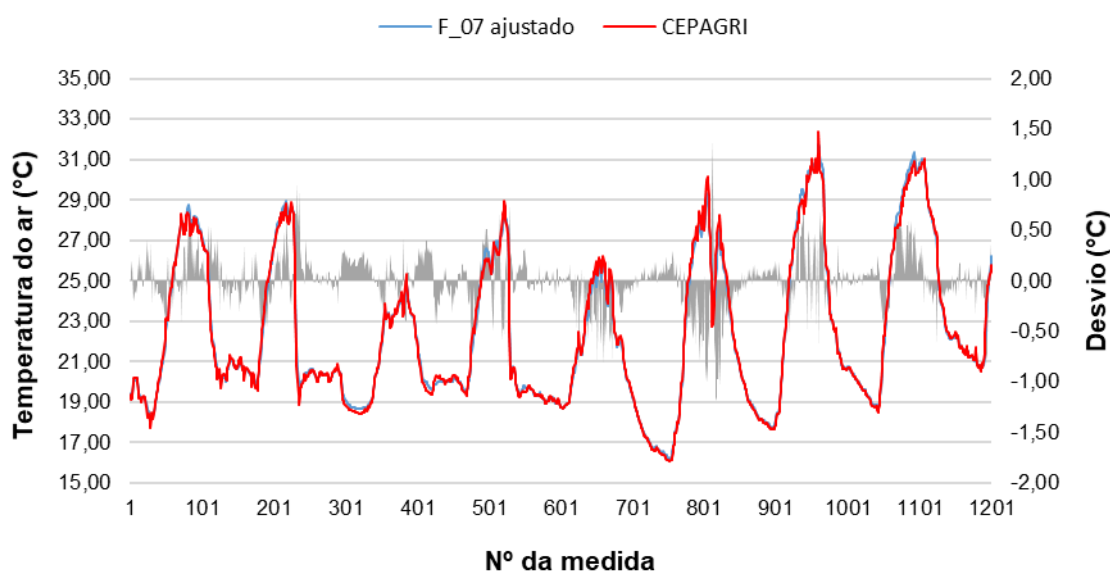
Conforme pode ser observado na Figura 26 e na Figura 27, a aplicação das equações de ajuste resulta em aparente redução e redistribuição dos desvios medidos. No Quadro 9 são apresentados o desvio médio e o desvio padrão de cada instrumento após este ajuste. Ambos os valores apresentaram redução frente àqueles avaliados para o mesmo conjunto de dados sem aplicação das equações de ajuste (Quadro 7). A significância da diferença entre os dois conjuntos de dados foi confirmada por meio do teste t pareado bicaudal ( $\alpha=5\%$ ).

**Figura 26** – Gráfico de análise de desvios: *Datalogger* F\_01 ajustado x CEPAGRI



Fonte: o autor.

**Figura 27** – Gráfico de análise de desvios: *Datalogger F\_07* ajustado x CEPAGRI



Fonte: o autor.

**Quadro 9** – Estimativa do desvio entre os equipamentos utilizados e o equipamento de referência após aplicação das equações de ajuste

Datalogger	F_01	F_02	F_03	F_04	F_05	F_06	F_07	F_08	F_09	M_01	M_02	M_03
Desvio médio [°C]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma$ [°C]	0,17	0,25	0,19	0,23	0,25	0,23	0,27	0,25	0,19	0,26	0,23	0,25
$P(\pm 0,60 \text{ } ^\circ\text{C})$	1,00	0,98	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	1,00	0,98	0,99	0,98

Fonte: o autor.

Desta forma, a implementação de equações de ajuste para calibrar os instrumentos empregados na coleta de dados ambientais foi comprovada estatisticamente. No entanto, no que diz respeito à correção instrumental, optou-se pela utilização de dados brutos, uma vez que as magnitudes dos desvios verificados não foram consideradas relevantes no contexto urbano.

Devido à baixa autonomia dos aparatos desenvolvidos para as campanhas de medidas móveis, seu desvio em relação à estação meteorológica foi calculado de maneira indireta, a partir dos desvios medidos pelos *dataloggers* utilizados paralelamente (Figura 21) em cada veículo, conforme apresentado no Quadro 10. Neste caso, foi considerada a precisão combinada dos três instrumentos ( $\pm 0,50^\circ\text{C}$ ,  $\pm 0,10^\circ\text{C}$  e  $\pm 0,30^\circ\text{C}$ ) para definir a faixa aceitável de desvio ( $\pm 0,90^\circ\text{C}$ ).

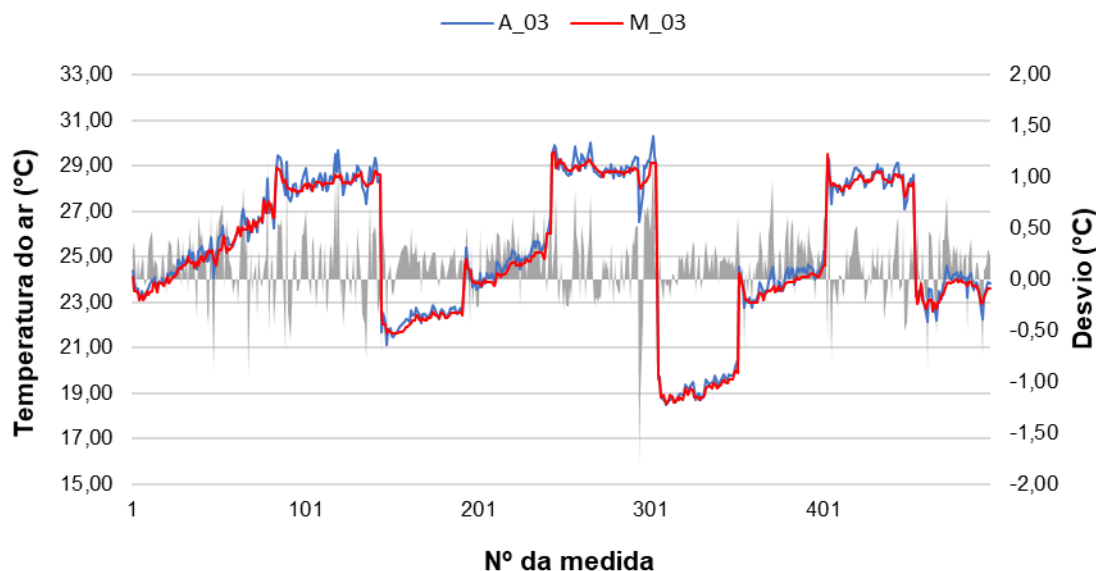
**Quadro 10** – Estimativa indireta do desvio entre os aparatos desenvolvidos e o equipamento de referência

Instrumentos comparados	CEPAGRI	M_01	CEPAGRI	CEPAGRI	M_02	CEPAGRI	CEPAGRI	M_03	CEPAGRI
	x M_01	x AP_02	x AP_02	x M_02	x AP_01	x AP_01	x M_03	x AP_03	x AP_03
Desvio médio [°C]	-0,06	0,07	0,01	-0,12	-0,08	-0,20	-0,05	0,14	0,09
$\sigma$ [°C]	0,32	0,37	0,49	0,25	0,36	0,44	0,33	0,33	0,47
P( $\pm 0,90$ °C)	-	-	0,93	-	-	0,94	-	-	0,94

Fonte: o autor.

Assim, verificou-se que desvios entre os aparatos desenvolvidos e a estação meteorológica tem probabilidade aproximada de 94% de apresentar valores inferiores à margem de precisão total dos instrumentos ( $\pm 0,90$ °C).

Os desvios entre os aparatos desenvolvidos e os *dataloggers* utilizados na obtenção de medidas móveis também foram avaliados quanto à presença de tendências por meio da distribuição dos seus desvios (Figura 28).

**Figura 28** – Gráfico de análise de desvios: Aparato AP\_03 x Datalogger M\_03

Fonte: o autor.

Mais uma vez, o modelo matemático escolhido como curva de ajuste padrão para a análise de distribuição dos desvios foi o modelo de regressão linear (Quadro 11).

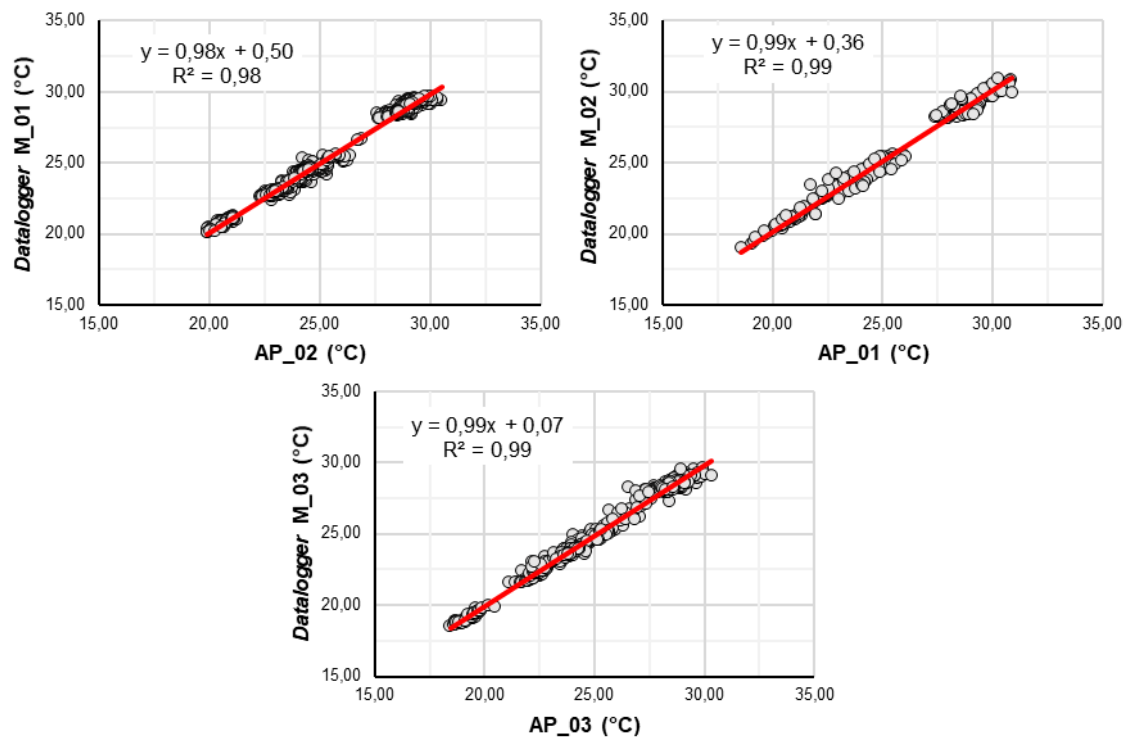
**Quadro 11** – Pontuação de adequação do modelo de regressão linear: Aparatos x Dataloggers

Equipamento	Pontuação (score) máximo	Pontuação (score) da regressão linear	Equação da regressão linear	R <sup>2</sup>
AP_01	973	970	0,99x + 0,36	0,99
AP_02	971	965	1,01x - 0,10	0,98
AP_03	976	973	0,99x + 0,07	0,99

Fonte: o autor.

Os gráficos contendo as medidas realizadas pelos aparatos em função das medidas realizadas por cada *datalogger* e as respectivas regressões lineares podem ser observados na Figura 29.

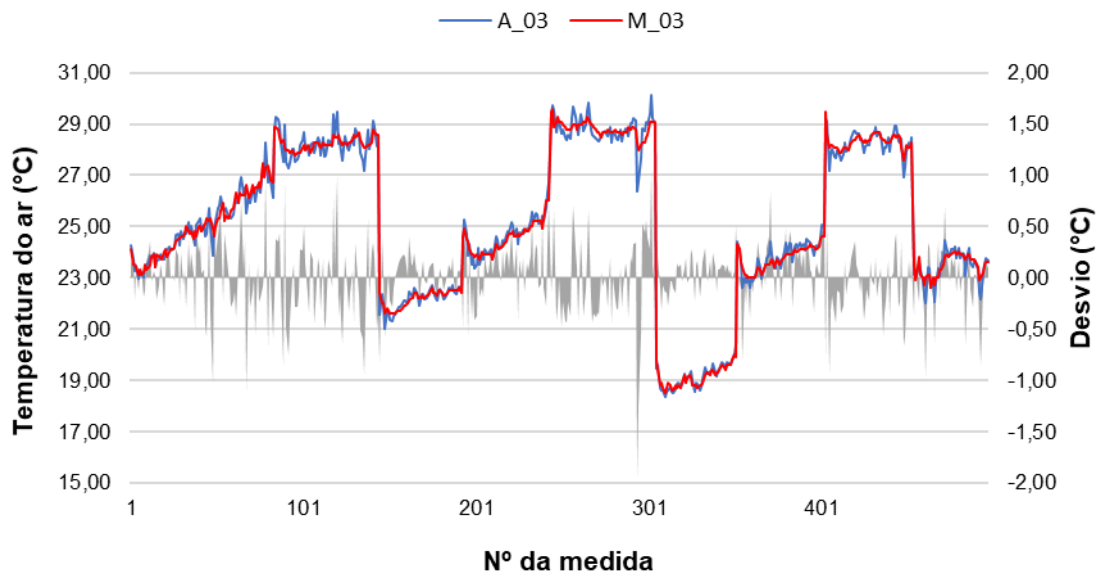
**Figura 29** – Calibração por referência: Gráficos para análise de distribuição dos desvios entre aparatos e *dataloggers*



Fonte: o autor.

Novamente, a aplicação das equações de ajuste resulta em aparente redução e redistribuição dos desvios medidos (Figura 30).

**Figura 30** – Gráfico de análise de desvios: Aparato AP\_03 ajustado x *Datalogger* M\_03



Fonte: o autor.

No Quadro 12 são apresentados o desvio médio e o desvio padrão de cada instrumento após o ajuste. Ambos os valores apresentaram redução frente àqueles avaliados para o mesmo conjunto de dados sem aplicação das equações de ajuste (Quadro 10). A significância da diferença entre os dois conjuntos de dados foi confirmada por meio do teste t pareado bicaudal ( $\alpha=5\%$ ).

**Quadro 12** – Estimativa indireta do desvio entre os aparados desenvolvidos (após ajuste) e o equipamento de referência

Instrumentos comparados	CEPAGRI	M_01	CEPAGRI	CEPAGRI	M_02	CEPAGRI	CEPAGRI	M_03	CEPAGRI
	x M_01	x AP_02	x AP_02	x M_02	x AP_01	x AP_01	x M_03	x AP_03	x AP_03
Desvio médio [°C]	-0,06	0,00	-0,06	-0,12	0,00	-0,12	-0,05	0,00	-0,05
$\sigma$ [°C]	0,32	0,36	0,48	0,25	0,36	0,44	0,33	0,33	0,47
$P(\pm 0,90 \text{ } ^\circ\text{C})$	-	-	0,94	-	-	0,95	-	-	0,94

Fonte: o autor.

Assim, avaliou-se que equações de ajuste poderiam ser aplicadas para reduzir a tendência de superestimar os valores medidos nos aparatos AP\_02 e AP\_03, e de subestimar os valores medidos no aparato AP\_01. No entanto, devido também à magnitude destes desvios, a adoção de correção instrumental também foi dispensada nestes casos.

Utilizando o Modelo Digital de Elevação do município para calcular a diferença de altitude entre cada ponto de coleta de dados e a estação meteorológica, situada a 655 m de altitude, a correção topográfica compensou uma redução de 0,5°C na temperatura média do ar a cada 100 m de elevação, conforme apontado por Marin, Pandorfi e Ferreira (2003), para localidades situadas na região Sudeste do Brasil.

A variação natural da temperatura do ar entre o início e o término de cada campanha de monitoramento móvel pode ser compensada através de quatro métodos distintos: *i*) correção temporal única; *ii*) correção temporal múltipla; *iii*) correção temporal de múltipla distância; e *iv*) correção temporal de múltipla distância e cobertura superficial (LIU et al., 2017b).

O método da correção temporal única consiste em utilizar a variação da temperatura do ar medida por um único instrumento de referência para corrigir os dados coletados. Como exemplo, LCONTE et al. (2015) utilizaram os valores de temperatura do ar medidos no início e no final de cada campanha de coleta de dados pela estação meteorológica mais próxima à sua área de estudo para

calcular uma taxa linear de correção. Em TSIN et al. (2016), os dados coletados por medidas móveis em diversos transectos foram corrigidos de acordo com os valores medidos por estações meteorológicas estacionárias próximas. Neste caso, no entanto, foi adotado um critério de correção inversamente proporcional à relação entre a temperatura medida pela estação meteorológica em um dado instante e a temperatura média medida durante a respectiva campanha de coleta.

O método da correção temporal múltipla é similar à correção temporal única, exceto pelo fato de utilizar a variação média medida por um grupo de instrumentos de referência.

O método da correção temporal de múltiplas distâncias considera que, quanto maior for a proximidade entre um instrumento de referência e um ponto de coleta, maior será a representatividade da variação medida por este instrumento. Assim, este método considera a distância entre múltiplos instrumentos de referência e o ponto de coleta móvel como um fator de ponderação na correção a ser aplicada. Em SHI et al. (2018), medidas horárias provenientes de estações meteorológicas do Observatório de Hong Kong<sup>3</sup>, interpoladas linearmente, foram utilizadas para compensar variações atmosféricas naturais durante as campanhas de coleta. Cada ponto de coleta foi corrigido de acordo com a estação mais próxima.

Por fim, o método de correção temporal de múltipla distância e cobertura superficial estabelece que, além da distância, a semelhança entre a cobertura superficial subjacente ao instrumento de referência e o ponto de coleta deve ser considerada na avaliação de sua representatividade (LIU et al., 2017b).

Analisando o desvio absoluto médio entre a temperatura corrigida pelos quatro métodos e a temperatura real em três casos distintos, LIU et al. (2017b) apontam que correções realizadas através dos três primeiros métodos geram resultados semelhantes, enquanto o método de correção temporal de múltipla distância e cobertura superficial gera desvios aproximadamente 50% menores do que aqueles verificados pelos demais métodos. Apesar do seu aparente

---

<sup>3</sup> Tradução livre de *Hong Kong Observatory*



desempenho superior, este método é considerado recente e ainda necessita de maiores validações. Assim, nesta pesquisa, foi empregado o método de correção temporal múltipla para calcular uma taxa linear de correção da temperatura do ar, de modo que todas as medidas móveis fossem sincronizadas com seu respectivo horário de referência (09:00, 15:00 ou 21:00).

A taxa linear de correção da temperatura do ar foi calculada a partir dos dados coletados pelos pontos fixos de monitoramento, como sendo a variação média da temperatura do ar medida pelos nove instrumentos durante os períodos aproximados de realização das campanhas de coleta em cada um dos dias: entre 9:00 e 10:30 para as coletas realizadas no período da manhã, entre 15:00 e 16:30 para coletas realizadas no período da tarde e entre 22:00 e 22:30 para as coletas realizadas no período da noite, conforme Equação 2.

$$Ct_{i,j} = \frac{T_{i,j+90} - T_{i,j}}{90} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$Ct_{i,j}$  = Taxa linear de correção da temperatura do ar

$T_{i,j+90}$  = Temperatura do ar medida 90 minutos após o horário de referência

$T_{i,j}$  = Temperatura do ar medida no horário de referência  $i$ , no dia  $j$

$i$  = dia de realização da campanha

$j$  = Horário de referência da campanha

Os valores de correção aplicados para cada dia e horário de referência são apresentados no Quadro 13:

**Quadro 13** – Taxa linear de correção da temperatura do ar

Fator de correção temporal C [°C/hora]			
Período da campanha / horário de referência	Dia		
	20	21	23
Manhã / 09:00	2,11	2,05	2,05
Tarde / 15:00	-0,45	-0,40	-0,40
Noite / 21:00	-0,78	-0,72	-0,72

Fonte: o autor.

Desta forma, a temperatura corrigida para efeitos de altitude e de horário de coleta, foi calculada de acordo com a Equação 3:

$$T_{C_{i,k}} = T_{m_{i,k}} - \Delta t_{i,j} \cdot Ct_{i,j} - \Delta a_{i,k} \cdot Ca \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$T_{C_k}$  = Temperatura corrigida

$T_{m_k}$  = Temperatura medida

$\Delta t_{i,j}$  = Diferença de tempo entre o horário de referência da campanha e o horário de coleta do dado

$Ct_{i,j}$  = Taxa linear de correção da temperatura do ar

$Ca$  = Taxa linear de correção topográfica

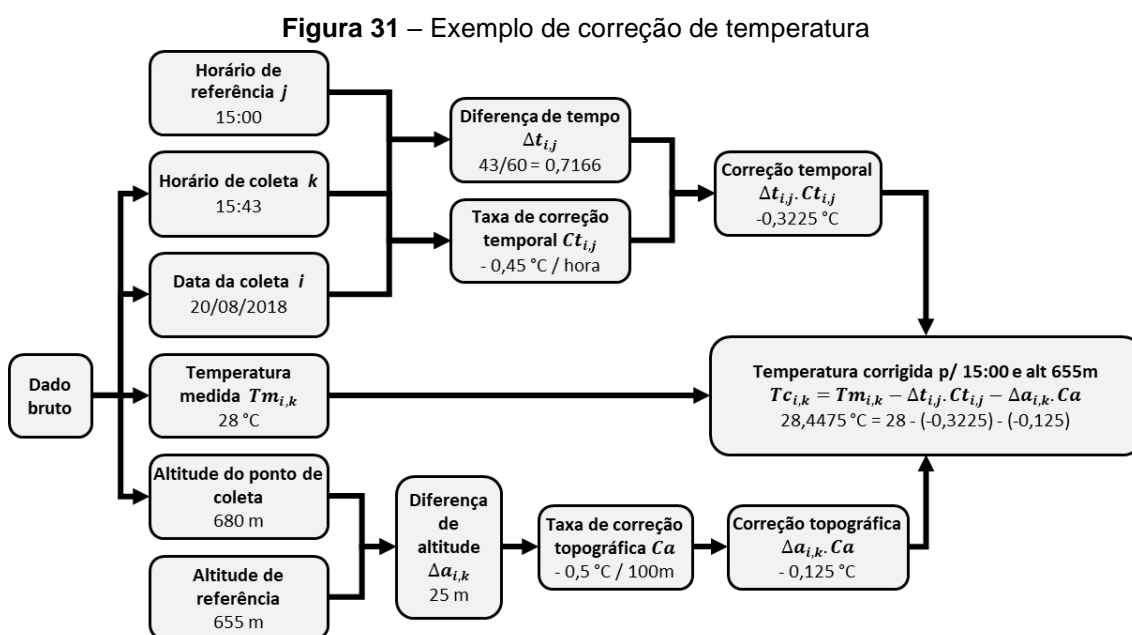
$\Delta a_k$  = Diferença de altitude entre o local de coleta do dado e a altitude de referência (655m)

$i$  = dia de realização da campanha

$j$  = horário de referência da campanha

$k$  = horário de coleta

A a aplicação destas correções está exemplificada na Figura 31.



Fonte: o autor

Após o tratamento para cada dia e horário, a krigagem, que consiste em um método geoestatístico de regressão linear, foi aplicada a cada conjunto de dados de temperatura para interpolar seus valores e gerar imagens do campo térmico da área de estudo. Para contornar a ausência de dados em regiões específicas da área de estudo, que gera efeitos indesejáveis no resultado da krigagem, foi realizada a transposição de dados coletados em regiões de características similares para estes locais (um total de 11 pontos). Desta forma, nove imagens rasterizadas do campo térmico da área de estudo. Estas imagens foram então sobrepostas de acordo com seu horário de referência, a fim de se obter três imagens do campo térmico médio da área de estudo.

Os resultados das campanhas de medidas móveis, compensados para a altitude 655m e para os horários de referência de 09:00, 15:00 e 21:00, foram comparados aos valores medidos no mesmo instante pela estação meteorológica do CEPAGRI, considerado como referencial de temperatura rural. Desta forma, foi calculada a intensidade da Ilha de Calor Urbana para todos os pontos avaliados na área de estudo. Interpolando os valores medidos nestes pontos pelo método da krigagem, foram elaborados mapas da variação espacial da intensidade da ilha de calor urbana na área de estudo em cada um dos horários de referência.

#### 4.4. CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

A caracterização morfológica da área de estudo foi realizada majoritariamente através de geoprocessamento na plataforma ArcGIS (ESRI, 2017), baseado em camadas de dados obtidas junto à Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Urbano (SEPLAN) da Prefeitura de Campinas. Estas camadas estão apresentadas no Quadro 14.

A primeira etapa do processo de caracterização morfológica consistiu em uma análise preliminar qualitativa da área de estudo, na escala das quadras onde foram examinados os seguintes critérios:

- Número de pavimentos: considerando um pavimento padrão de 3 m, o MDS foi utilizado para avaliar o número de pavimentos predominante nas quadras.
- Uso: com base no conhecimento do autor a respeito da área de estudo e do acesso a imagens do *Google Street View* (Google, 2018), foi identificado o uso das quadras: residencial, comercial ou serviços.

- Permeabilidade dos lotes: com base em avaliação visual da ortofoto, a presença de coberturas naturais e permeáveis nas quadras foi estimada e classificada em baixa (área permeável inferior a 20% da área da quadra), média (área permeável entre 20 e 80% da área da quadra) e alta (presença estimada de áreas permeáveis na quadra superior a 80%)
- Estrutura viária: com base na ortofoto do município, a estrutura viária próxima a quadra foi avaliada entre local estreita (largura inferior a 8 m), local média (largura entre 8 e 16 m) e avenidas.
- Arborização: o grau de arborização presente nos canteiros e passeios foi avaliado entre esparsa ou inexistente (presença pontual ou nula de árvores no entorno da quadra), média (presença considerável de árvores em um ou dois lados da quadra) ou abundante (presença considerável de árvores em mais de dois lados da quadra).
- Presença de lotes vazios: a presença de lotes vazios foi verificada em todas as quadras, considerando-se afirmativa quando sua área representava porção significativa da quadra (área estimada superior a 25% da área da quadra).
- Espaços verdes públicos: a presença de espaços verdes públicos, tais como praças, parques ou bosques, foi avaliada em um raio aproximado de 500 m da quadra.

**Quadro 14** – Camadas de dado obtidas junto à PMC para a caracterização morfológica da área de estudo

Nome	Descrição	Formato
Ortofoto_2014	Ortofotos geradas a partir de cobertura aerofotogramétrica do município.	Raster
2014_MDT	Modelo Digital do Terreno (MDT): levantamento altimétrico do terreno (solo) do município, obtido através de perfilamento a laser realizado em 2014.	Raster
Altura_predios	Modelo Digital de Superfície (MDS): levantamento altimétrico da superfície modificada do município (construções, vegetação, etc), obtido através de perfilamento a laser realizado em 2014.	Raster
area_edificada_restituicao_2014	Planta da área edificada dos lotes do município. Gerada por correção/adequação manual do MDS de 2014.	Vetor (polígono)
quarteiroes_nao_concluido	Planta dos quarteirões do município, digitalizada manualmente.	Vetor (polígono)
eixos_logradouros	Digitalização do eixo central dos logradouros do município.	Vetor (linhas)

Fonte: o autor.

Desta maneira, as quadras contidas na área de estudo foram classificadas em 36 tipologias distintas, relacionadas no Quadro 15 e apresentadas na Figura 32. Tipologias para a representação de quadras de cobertura predominantemente natural também foram incluídas. Onde necessário, quadras grandes ou demasiadamente heterogêneas foram subdividas.

**Quadro 15** – Tipologias utilizadas na caracterização preliminar das quadras

<b>Tipo</b>	<b>Número de pavment.</b>	<b>Uso</b>	<b>Perm. dos lotes</b>	<b>Estrutura Viária</b>	<b>Arborização</b>	<b>Presença lotes vazios</b>	<b>Espaços verdes públicos</b>
TP10	1 a 2	Residencial	Baixa	Local estreita	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP11	1 a 2	Residencial	Baixa	Local média	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP12	1 a 2	Residencial	Baixa	Local média	Média	Sim	Sim
TP13	1 a 2	Residencial	Baixa	Local média	Abundante	Sim	Sim
TP14	1 a 2	Residencial	Alta	Local média	Esparsa ou inexistente	Sim	Sim
TP15	1 a 2	Residencial	Alta	Local média	Abundante	Sim	Sim
TP16	1 a 2	Residencial	Média	Local estreita	Abundante	Sim	Sim
TP20	3 a 5	Residencial	Baixa	Local média	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP21	6 a 10	Residencial	Baixa	Local média	Média	Pouca ou nenhuma	Não
TP22	15 a 25	Residencial	Baixa	Local média	Esparsa ou inexistente	Sim	Sim
TP31	1 a 5	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local estreita e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Não
TP32	1 a 2	Comercial, serviços	Baixa	Local estreita e avenidas	Abundante	Pouca ou nenhuma	Não
TP33	1 a 2	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP34	1 a 2	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Média	Pouca ou nenhuma	Sim

(Continua)

**Quadro 11** – Tipologias utilizadas na caracterização preliminar das quadras

(Continuação)

<b>Tipo</b>	<b>Número de pavment.</b>	<b>Uso</b>	<b>Perm. dos lotes</b>	<b>Estrutura Viária</b>	<b>Arborização</b>	<b>Presença lotes vazios</b>	<b>Espaços verdes públicos</b>
TP35	1 a 2	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Abundante	Pouca ou nenhuma	Sim
TP36	1 a 2 3 a 5	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP37	1 a 2 3 a 5	Comercial Serviços	Baixa	Local média e avenidas	Média	Pouca ou nenhuma	Sim
TP40	1 a 3 15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Não
TP41	1 a 2 15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Abundante	Pouca ou nenhuma	Não
TP42	1 a 2 15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP43	1 a 2 15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Média	Pouca ou nenhuma	Sim
TP44	1 a 2 15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Abundante	Pouca ou nenhuma	Sim
TP45	15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Baixa	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Sim
TP80 (*)	-	Comercial Serviços	Baixa	Local média a grande	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Não
TP81 (**)	1 a 3 15 a 25	Residencial, comercial ou serviços	Alta	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Significativa	Não
TP82	Cimento, concreto, pavimento ou pedras	Estacionamentos, canteiros	Baixa	N/A	N/A	N/A	Não
TP83	Cimento, concreto, pavimento ou pedras	Estacionamentos, canteiros	Média	N/A	N/A	N/A	Não
TP88 (***)	1 a 4	Residencial, serviços	Alta	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	Pouca ou nenhuma	Não
TP89 (***)	1 a 4	Residencial, serviços	Alta	Local média e avenidas	Abundante	Pouca ou nenhuma	Não

(Continua)

**Quadro 11** – Tipologias utilizadas na caracterização preliminar das quadras

(Conclusão)

Tipo	Número de pavement.	Uso	Perm. dos lotes	Estrutura Viária	Arborização	Presença lotes vazios	Espaços verdes públicos
TP90	Água	Canal	Alta	N/A	N/A	N/A	N/A
TP91	Água	Lago	Alta	N/A	N/A	N/A	N/A
TP95	Terra	Solo exposto	Alta	N/A	Esparsa ou inexistente	N/A	N/A
TP96	Área verde	Cultivo	Alta	Terra	Variável	N/A	N/A
TP97	Área verde	Lazer	Alta	Local média e avenidas	Esparsa ou inexistente	N/A	N/A
TP98	Área verde	Lazer	Alta	Local média e avenidas	Média	N/A	N/A
TP99	Área verde	Lazer	Alta	Local média e avenidas	Abundante	N/A	N/A

\* Amplos empreendimentos

\*\* Área desocupada

\*\*\* Áreas de clubes ou chácaras com prédios largos e espaçados

Fonte: o autor.

A partir desse mapa de caracterização preliminar (Figura 32), foi formulada uma hipótese inicial da configuração das LCZs da área de estudo, descritas no Quadro 16 e apresentadas na Figura 33. Esta hipótese inicial contemplou a existência de 22 zonas climáticas locais onde predominavam características do ambiente construído, além de outras 4 zonas climáticas locais caracterizadas pela predominância de superfícies naturais. Uma vez que o presente estudo tem maior interesse em verificar a influência do ambiente construído no microclima de áreas urbanizadas, a quantificação das características morfológicas das potenciais zonas climáticas identificadas nesta hipótese inicial foi realizada somente nos locais com predominância do ambiente construído. Assim, 22 áreas circulares com 250 m de raio, foram selecionadas como amostras da área de estudo. Além de sua composição e seu posicionamento em relação à hipótese inicial de zonas climáticas locais, a escolha dessas áreas de análise amostral levou em consideração a interseção com os transectos de medidas móveis, visando maior aproveitamento dos dados coletados. As 22 áreas de análise amostral podem ser observadas na Figura 33. A classificação em LCZs das áreas com predominância de superfícies naturais foi realizada através de análise visual.

**Quadro 16** – Descrição das LCZs contidas na hipótese inicial

ZCL	Característica dominante
1 <sub>2</sub>	Mescla de edifícios altos com mais de 10 andares e edifícios médios, com 3 a 9 andares, em arranjo compacto. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, aço, alvenaria e vidro como materiais de construção.
1 <sub>3</sub>	Mescla de edifícios altos com mais de 10 andares e edifícios baixos, com 1 ou 2 andares, em arranjo compacto. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, aço, alvenaria, rocha e vidro como materiais de construção.
1 <sub>6</sub>	Mescla de edifícios altos com mais de 10 andares e edifícios baixos, com 1 ou 2 andares, em arranjo variável, de compacto a pouco espaçado. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, aço, alvenaria, rocha e vidro como materiais de construção.
2 <sub>1,3</sub>	Mescla de edifícios médios, com 3 a 9 andares, edifícios baixos, com 1 a 2 andares, e poucos edifícios altos, com mais de 10 andares, em arranjo compacto. Pouquíssimas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria e rocha como materiais de construção.
2 <sub>3</sub>	Mescla de edifícios médios, com 3 a 9 andares, e edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo compacto. Pouquíssimas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria e rocha como materiais de construção.
3	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo compacto. Poucas árvores, solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria, rocha e azulejo como materiais de construção.
3 <sub>1</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares e poucos prédios altos, com mais de 10 andares, em arranjo compacto. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria, rocha e azulejo como materiais de construção.

Fonte: o autor.

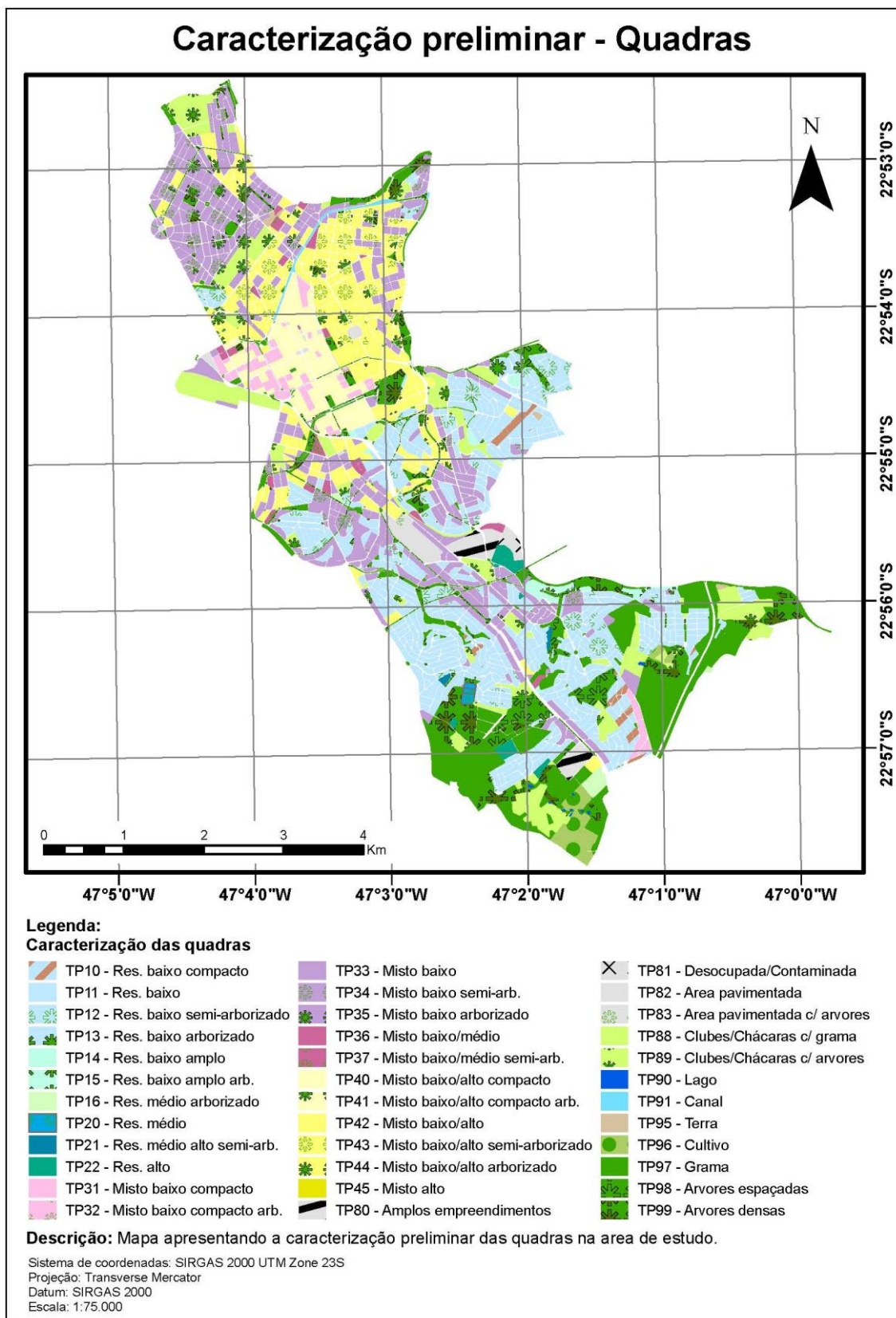


**Quadro 12** – Descrição das LCZs contidas na hipótese inicial

ZCL	Característica dominante
3 <sub>4</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares e poucos prédios altos, com mais de 10 andares, em arranjo variável, de compacto a pouco espaçado. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria, rocha e vidro como materiais de construção.
3 <sub>5</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares e poucos edifícios médios, com 3 a 9 andares, em arranjo variável, de compacto a pouco espaçado. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria, rocha e vidro como materiais de construção.
3 <sub>6</sub>	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares em arranjo variável, de compacto a pouco espaçado. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de alvenaria, rocha e azulejo como materiais de construção.
4	Predominância de edifícios altos, com mais de 10 andares, em arranjo espaçado. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, aço, alvenaria e vidro como materiais de construção.
6	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo espaçado. Presença moderada árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, alvenaria, rocha e azulejo como materiais de construção.
6 <sub>3</sub>	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo variável, de espaçado a compacto. Presença moderada árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de alvenaria, rocha e azulejo como materiais de construção.
6 <sub>B</sub>	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo espaçado, com áreas de arborização densa. Presença moderada árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de alvenaria, rocha e azulejo como materiais de construção.
7	Predominância de edifícios baixos, em arranjo compacto. Poucas árvores e solo pavimentado ou terra exposta. Uso de tijolos sem acabamento, madeiras e telhas de fibrocimento como materiais de construção.
8	Edifícios grandes e baixos, de 1 a 3 andares, como armazéns, depósitos ou mercados, bem espaçados. Solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, estruturas e telhas metálicas como materiais de construção.
9	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, bem espaçados. Presença moderada árvores e solo permeável. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.
A	Árvores densas
B	Árvores espaçadas
D	Cobertura gramínea
E	Solo rochoso ou pavimentado

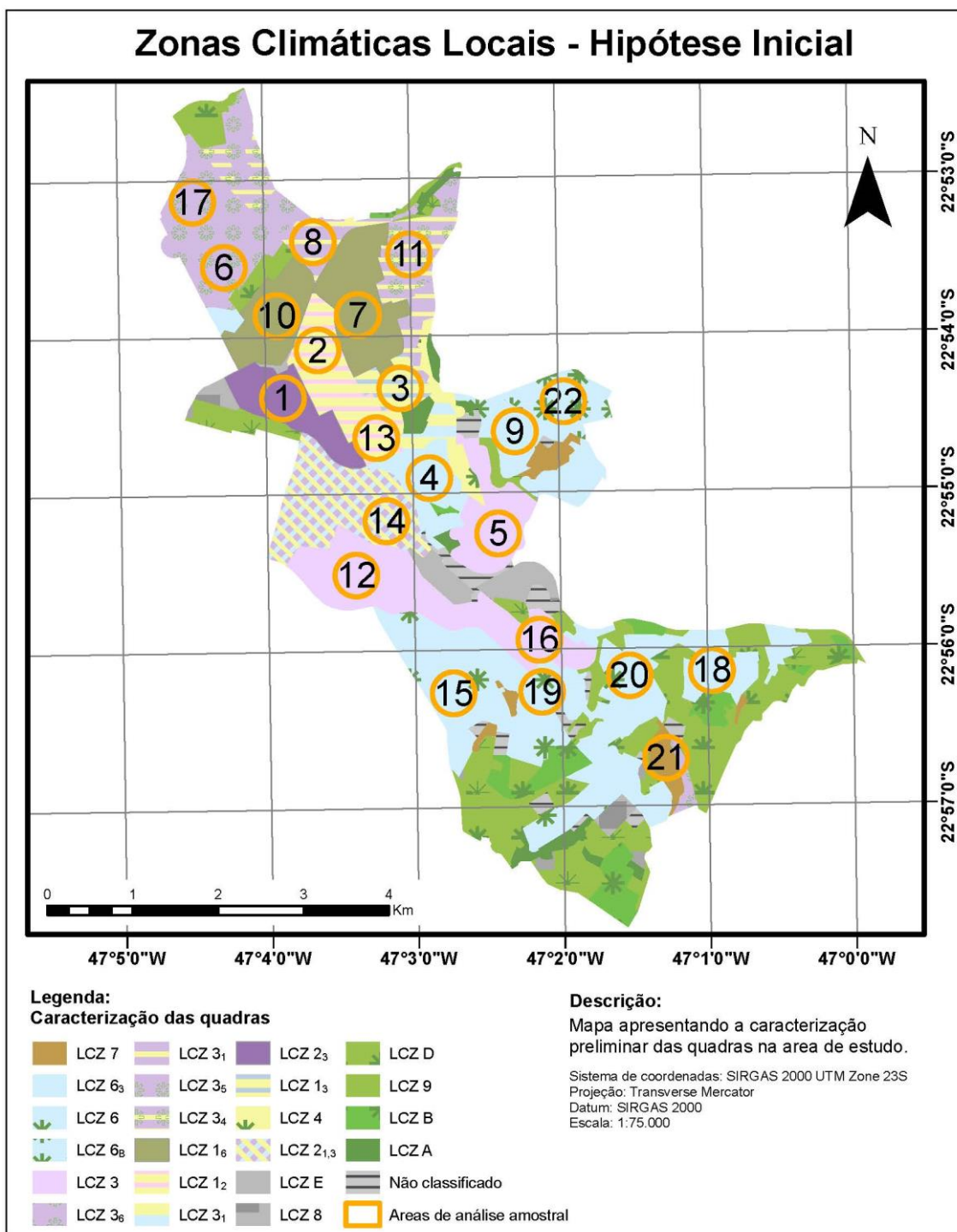
Fonte: o autor.

Figura 32 – Mapa de caracterização preliminar das quadras



Fonte: o autor.

Figura 33 – Zonas Climáticas Locais – Hipótese Inicial



Fonte: o autor.

Para a verificação e classificação das potenciais LCZs propostas nesta hipótese inicial, foram avaliados sete parâmetros urbanísticos, dentre os dez indicados na metodologia de classificação das LCZs (STEWART; OKE, 2012): fator de visão do céu, relação altura e largura (relação H/W), porcentagem de superfície edificada, porcentagem de superfície impermeável, porcentagem de

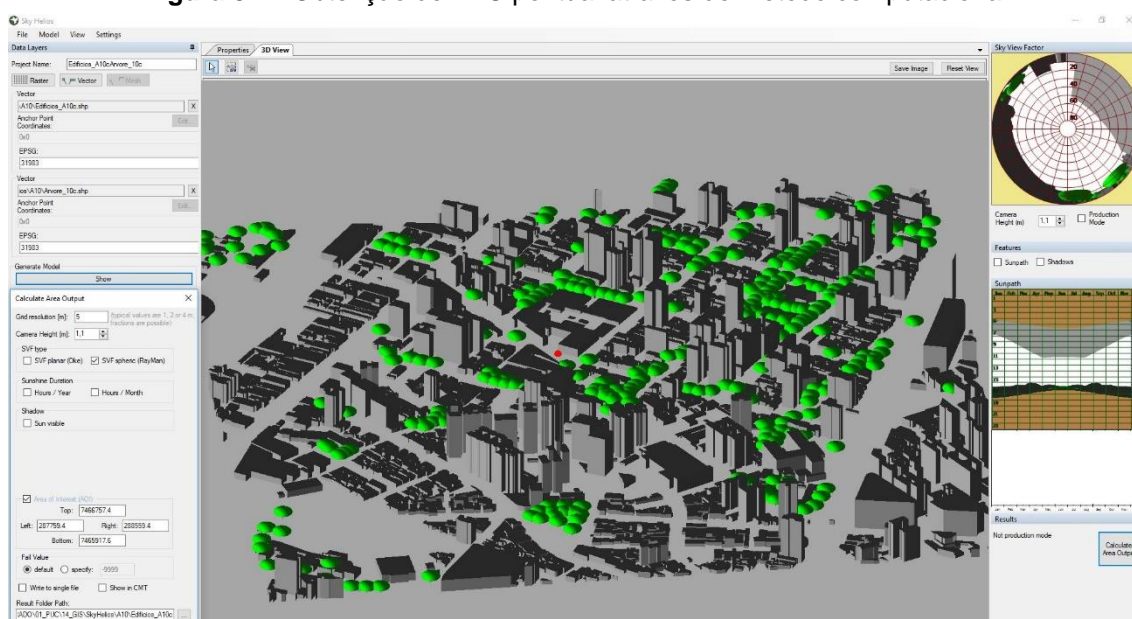
superfície permeável, altura dos elementos de rugosidade e classe de rugosidade do terreno (DAVENPORT et al., 2000). Os demais parâmetros (absortância, albedo e fluxo de calor antropogênico) não foram avaliados.

### **Fator de visão do céu:**

A obtenção de valores de FVC foi realizada através de simulação computacional das 22 áreas de análise amostral por meio do programa SkyHelios (MATZARAKIS; MATUSCHEK, 2011), considerando a volumetria das edificações e da arborização presentes em um recorte de 800 x 800 m, com mesmo centro da área amostral. A volumetria das edificações foi obtida pela relacionando a altura média das edificações, obtida pelo MDS, à sua planta, disponível na camada de área construída. A arborização foi introduzida manualmente, ponto a ponto, por meio de inspeção visual da ortofoto. Como padrão, foi adotada uma árvore com tronco de 4 m de altura e 0,5 m de diâmetro, copa de 12 m de altura e 10 m de raio. A resolução adotada para a simulação foi de 5,0 m e a altura dos pontos de análise em relação à superfície foi de 1,1 m. Valores de FVC calculados em locais sobrepostos à área edificada foram removidos do resultado final previamente à sua utilização.

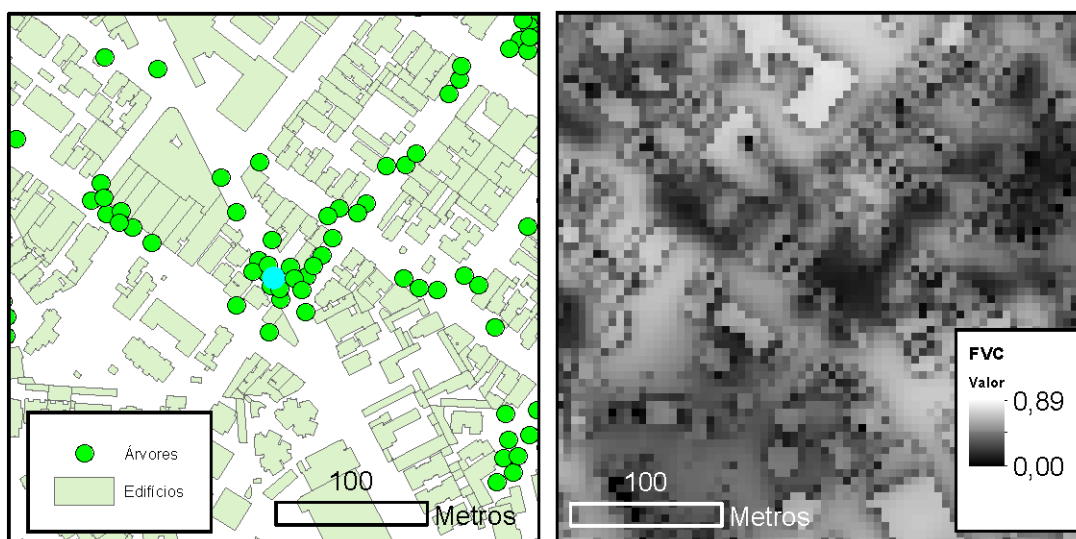
A configuração da simulação para a área e análise amostral 10 está ilustrada na Figura 34. O resultado para esta mesma área está apresentada na Figura 35.

**Figura 34** – Obtenção de FVC pontual através de método computacional



Fonte: o autor.

**Figura 35** – Mapa obstáculos (edificações e vegetação) e mapa resultante de valores contínuos de FVC



Fonte: o autor.

Além de ser utilizado para a classificação das LCZs, o fator de visão do céu foi utilizado neste estudo como variável independente, indicadora do grau de adensamento construtivo verificado em um dado local e correlacionado ao valor da temperatura do ar neste mesmo local, considerada como variável dependente para que seja analisada a influência do adensamento construtivo na intensidade da ilha de calor urbana.

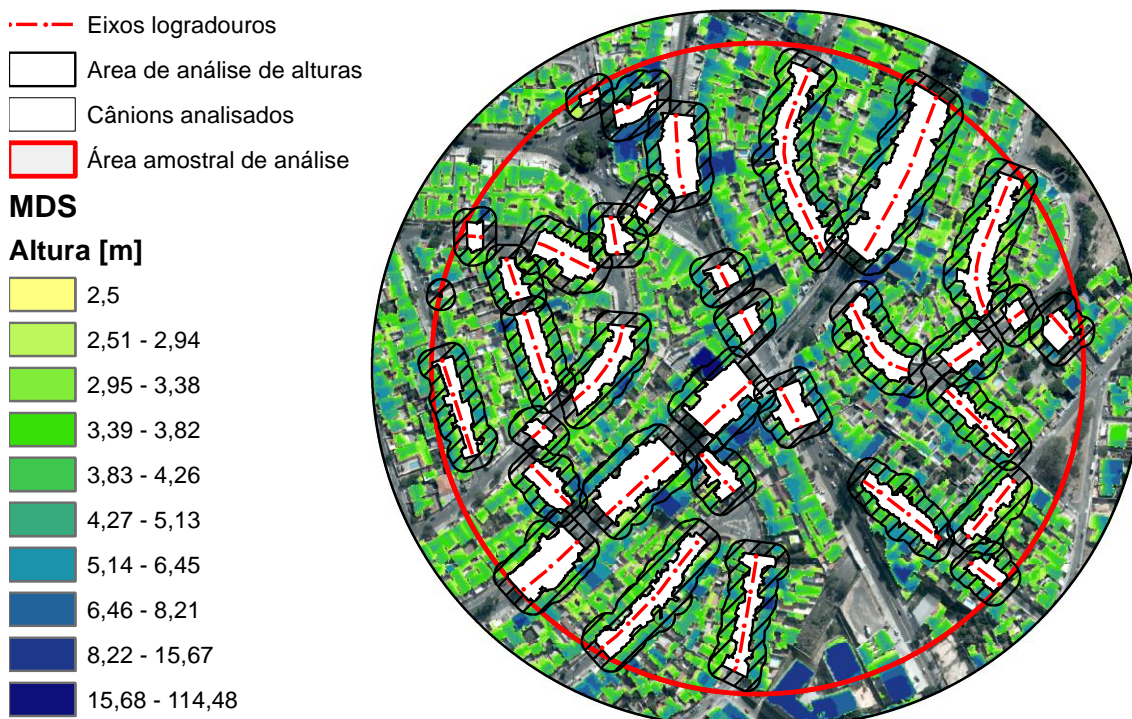
### **Relação altura e largura (relação H/W):**

A relação H/W denota a proporção entre a altura e largura média das edificações encontradas nos dois lados de um cânion urbano e distância média entre as fachadas opostas. Neste estudo, o cálculo da geometria dos cânions foi feito de acordo com o seguinte procedimento: a partir do eixo dos logradouros inclusos nas áreas amostrais, foram geradas áreas de abrangência com 30 m de largura, valor superior à largura da maioria dos cânions encontrados na área de estudo. A seguir, foram eliminadas sobreposições entre estas áreas e a camada de áreas edificadas. Uma vez que cruzamentos não são inclusos no cálculo da relação H/W, a intersecção entre os próprios cânions gerados foi também eliminada. Desta forma, os cânions processados foram limitados em sua largura pela fachada das edificações (até uma largura máxima de 30 m) e em seu comprimento a até uma distância de 15m do ponto central de cada cruzamento. Através de inspeção visual e ajustes manuais, cânions com largura superior a



30m foram adequados, trechos desprovidos de edificações nos dois lados foram removidos e adequações pontuais consideradas necessárias foram realizadas. Cada trecho de cânion urbano obtido teve seu comprimento calculado como aquele de intersecção com respectivo eixo de logradouro. Com base neste valor de comprimento e da área do polígono que compõe o cânion, uma largura média, ou largura equivalente, foi calculada. Posteriormente, considerando um raio de abrangência de dez metros a partir de suas faces externas, foi obtida a altura média das edificações no entorno dos cânions. Um exemplo desse processo é apresentado na Figura 36.

**Figura 36** – Obtenção da relação H/W para os cânions urbanos da área de análise amostral N° 6



Fonte: o autor.

O valor de relação H/W para cada área amostral foi contabilizado como a média ponderada da relação H/W dos cânions por ela contidos, considerando o comprimento destes como fator de ponderação.

### **Porcentagem de superfície edificada**

A porcentagem de superfície edificada foi calculada como a razão entre a somatória da área edificada contida em cada área amostral e o valor total de sua área.

### **Porcentagem de superfície permeável**

O cálculo da porcentagem de superfície permeável foi feito através de procedimento de amostragem. Em cada área analisada, de três a cinco quadras completamente contidas no interior desta e consideradas representativas do padrão avaliado, passaram por um processo de digitalização de suas áreas permeáveis (solos cobertos por vegetação, solos desnudos ou piscinas). A razão entre área permeável digitalizada e a área edificada destas quadras foi então relacionada à área edificada total da área analisada para calcular a área permeável total no interior das quadras. À esse valor foi adicionada a área permeável de canteiros, praças, canais, entre outros, de modo a obter a área permeável total no espaço analisado. A razão entre essa área e a área total analisada foi considerada como porcentagem de superfície permeável.

### **Porcentagem de superfície impermeável**

A porcentagem de área restante, não considerada edificada ou permeável, foi considerada como porcentagem de superfície impermeável.

### **Gabarito médio dos elementos de rugosidade**

Desprezando-se células com valores abaixo de 2,5 m, abaixo dos quais não se considerou tratar como uma estrutura ou edificação, o gabarito médio dos elementos de rugosidade foi calculado como a média das alturas apontadas pelo MDS em cada área amostral.

### **Classe de rugosidade**

A classe de rugosidade foi atribuída a cada área de análise amostral de acordo com a descrição apresentada na Figura 37.

**Figura 37** – Tabela de classe de rugosidade de Davenport

<b>Classe de Davenport</b>	<b>Comprimento de rugosidade, <math>z_0</math> (m)</b>	<b>Descrição da paisagem</b>	<b>LCZ correspondente</b>
1. Mar	0,0002	Mar aberto, planície coberta por neve, deserto, asfalto e concreto com áreas abertas de vários quilômetros.	E, F, G
2. Suave	0,005	Paisagem sem particularidades e sem obstáculos, com pouca ou nenhuma vegetação.	E, F
3. Aberto	0,03	Terreno rural nivelado com vegetação baixa e obstáculos isolados, separados por distância equivalente a 50 vezes sua altura. Exemplo: grama, tundra, pista de pouso.	D
4. Aberto rugoso	0,10	Área de cultivo baixo ou vegetação rasteira; terreno rural moderadamente aberto, com obstáculos ocasionais (árvores isoladas, construções baixas) separados por distância equivalente a 20 vezes sua altura.	7, C, D
5. Rugoso	0,25	Área de cultivo alto ou de altura variável; obstáculos esparsos, separados por distância aproximada de 8 a 15 vezes sua altura,, dependendo da porosidade. Exemplo: construções ou barreiras de árvores.	5-10, B, C
6. Muito rugoso	0,50	Área de cultivo intensivo com fazendas extensas e conjuntos de árvores separados por distância equivalente a 8 vezes sua altura; pomares, sertões. Áreas urbanizadas com edificações baixas espaçadas entre 3 e 7 vezes sua altura, sem árvores altas.	2, 3, 5, 6, 9, 10, B
7. Deslisante	1,00	Paisagem ocupada por obstáculos grandes, de altura similar, separados por distância equivalente a uma vez sua altura, como florestas maduras. Áreas urbanizadas sem variação significativa de altura.	2, 4
8. Caótico	$\geq 2,0$	Paisagem com obstáculos grandes distribuídos de forma irregular. Exemplo: áreas densamente urbanizadas com um misto de edificações baixas e altas, floresta extensa com muitas clareiras.	1, 4, A

Fonte: adaptado de STEWART & OKE (2012)



## 5. RESULTADOS

### 5.1. CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS CLIMÁTICAS LOCAIS DA ÁREA DE ESTUDO

A fim de validar caracterização preliminar realizada na área de estudo (Figura 32), sete entre os dez parâmetros urbanísticos inclusos no método das Zonas Climáticas Locais (STEWART; OKE, 2012) foram quantificados em 22 áreas de análise amostrais. O Quadro 17 apresenta os resultados obtidos para cada um desses parâmetros em cada uma dessas áreas de análise.

**Quadro 17** – Parâmetros urbanísticos obtidos para as áreas de análise amostrais

Area Amostral	FVC	H/W	A. Ed. [%]	A. Imp. [%]	A. Perm. [%]	GR [m]	CR	LCZ
1	0,45	1,00	59,11	38,90	1,98	9,18	7	3 <sub>2</sub>
2	0,35	1,18	57,82	41,18	1,00	14,39	8	2 <sub>3</sub>
3	0,41	0,67	48,77	48,45	2,78	13,11	8	2 <sub>3</sub>
4	0,61	0,29	45,38	50,07	4,56	4,63	6	3 <sub>B</sub>
5	0,58	0,24	43,34	49,18	7,48	4,25	7	2 <sub>3</sub>
6	0,52	0,28	43,97	46,92	9,11	4,21	6	3
7	0,37	0,75	45,15	48,38	6,47	17,42	8	1 <sub>2</sub>
8	0,50	0,32	44,66	46,66	8,67	7,08	8	3 <sub>1</sub>
9	0,52	0,32	43,76	48,04	8,20	5,42	6	3 <sub>2</sub>
10	0,41	0,63	43,21	52,39	4,40	14,01	8	1 <sub>2</sub>
11	0,41	0,38	42,60	49,41	7,99	8,31	8	3 <sub>1</sub>
12	0,52	0,24	41,49	51,47	7,05	4,46	6	3 <sub>2</sub>
13	0,46	0,78	45,67	47,93	6,40	14,13	8	2 <sub>3</sub>
14	0,52	0,32	41,55	50,99	7,46	6,40	7	3 <sub>2</sub>
15	0,57	0,24	39,23	52,30	8,47	4,13	6	3
16	0,61	0,26	39,75	55,31	4,94	4,83	6	6 <sub>B</sub>
17	0,43	0,27	40,64	47,00	12,37	5,50	7	3 <sub>2</sub>
18	0,60	0,21	36,20	55,56	8,23	3,97	6	6
19	0,59	0,21	36,86	52,68	10,46	4,34	6	3
20	0,54	0,24	34,09	54,88	11,03	4,53	6	3 <sub>8</sub>
21	0,68	0,27	31,20	50,07	18,72	4,40	6	6 <sub>8</sub>
22	0,53	0,28	27,23	37,68	35,08	5,85	6	6

Fonte: o autor.

De acordo com a hipótese inicial de distribuição das LCZs na área de estudo, as 22 áreas de análise amostrais deveriam corresponder a 11 zonas climáticas distintas. Essa hipótese foi verificada como próxima ao cenário real, uma vez que as 22 áreas de análise foram efetivamente classificadas em 10 classes de LCZs locais distintas. Destaca-se que apenas 5 dentre as 22 áreas analisadas encontraram classificação dentro o conjunto original de LCZs. As

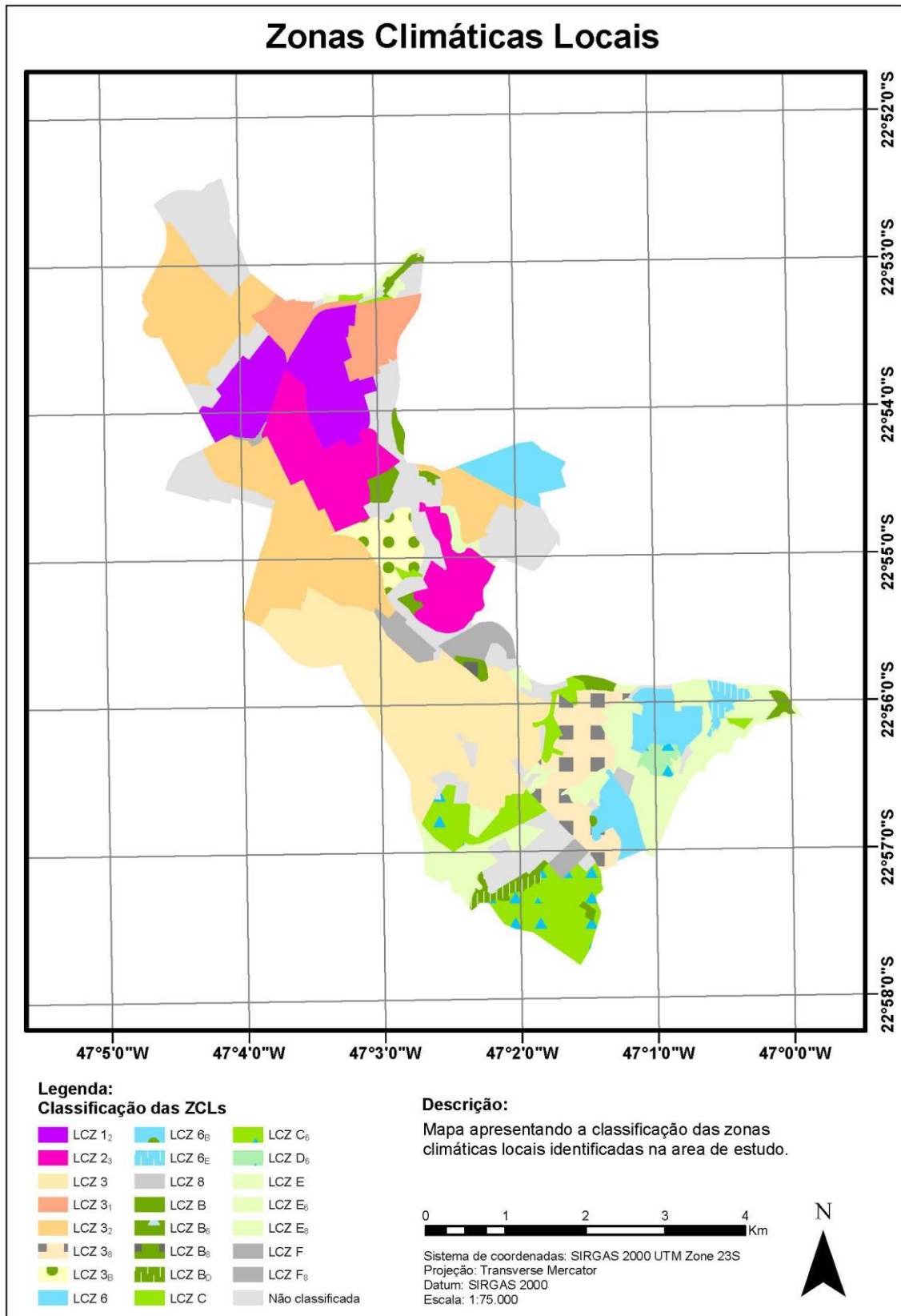
demais 17 áreas analisadas foram classificadas como uma mescla de duas tipologias distintas, de acordo com recomendação dos próprios elaboradores do método (STEWART; OKE, 2012). Esse resultado apresenta coerência com o padrão de urbanização verificado na região, sendo pouquíssimo homogêneo, típico de cidades brasileiras. O Quadro 18 apresenta uma breve descrição das Zonas Climáticas Locais identificadas e sua distribuição na área de estudo pode ser observada na Figura 38.

**Quadro 18** – Descrição das LCZs identificadas na área de estudo.

LCZ	Característica dominante	Áreas amostrais
1 <sub>2</sub>	Mescla de prédios altos com mais de 10 andares e prédios médios, com 3 a 9 andares, em arranjo compacto. Algumas árvores, mas solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, aço, rocha e vidro como materiais de construção.	7, 10
2 <sub>3</sub>	Mescla de prédios médios, com 3 a 9 andares, e edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo compacto. Pouquíssimas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	2, 3, 5, 13
3 <sub>1</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares e poucos prédios altos, com mais de 10 andares, em arranjo compacto. Poucas árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	8, 11
3 <sub>2</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares e poucos prédios médios, com 3 a 9 andares, em arranjo compacto. Árvores esparsadas e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	1, 9, 12, 14, 17
3 <sub>B</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo compacto, e áreas de arborização densa. Solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	4
3 <sub>8</sub>	Mescla de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo compacto, e amplos empreendimentos. Solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	20
3	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo compacto. Poucas árvores, solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	6, 15, 19
6	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo espaçado. Presença moderada árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	18, 22
6 <sub>B</sub>	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo espaçado, com áreas de arborização densa. Presença moderada árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	16
6 <sub>8</sub>	Predominância de edifícios baixos, com 1 a 3 andares, em arranjo espaçado, com presença pontual de amplos empreendimentos. Presença moderada árvores e solo predominantemente pavimentado. Uso de concreto, rocha, tijolo e azulejo como materiais de construção.	21

Fonte: o autor.

Figura 38 – Zonas Climáticas Locais da área de estudo



Fonte: o autor.

## 5.2. MONITORAMENTO FIXO DE TEMPERATURA DO AR

As médias horárias da temperatura do ar, medidas nos pontos fixos de monitoramento e no ponto de referência durante os dias 20, 21 e 23 de agosto, são apresentadas no Quadro 19. Entre às 18:00, final da tarde, e às 07:00, início da manhã, a temperatura mínima do ar foi registrada na estação meteorológica do CEPAGRI, considerada neste estudo como referencial de temperatura rural ou de área verde (os valores registrados foram de 0,1 a 1,4 °C inferiores ao da segunda menor temperatura em cada hora). No mesmo período, as temperaturas mais altas foram registradas nos pontos F\_03, F\_06 e F07, situadas nos bairros Cambuí e Centro, locais de maior verticalização dentre os pontos de monitoramento.

**Quadro 19** – Média horária da temperatura do ar medida nos pontos fixos de monitoramento

Hora	F_01	F_02	F_03	F_04	F_05	F_06	F_07	F_08	F_09	CEPAGRI
0:00	19,8	19,4	20,4	19,6	19,6	20,4	20,2	19,8	19,6	18,3
1:00	19,2	18,7	19,8	19,1	19,1	19,8	19,5	19,2	18,8	17,9
2:00	18,6	18,3	19,4	18,6	18,6	19,4	19,1	18,9	18,5	17,5
3:00	18,1	17,9	18,9	18,0	18,3	18,9	18,5	18,5	17,8	16,7
4:00	17,7	17,2	18,5	17,4	17,6	18,4	18,0	17,8	17,0	15,9
5:00	17,3	16,9	18,1	17,2	17,2	18,1	17,7	17,5	16,7	15,4
6:00	16,9	16,6	17,9	17,0	17,0	17,8	17,5	17,3	16,4	15,0
7:00	17,4	18,1	18,2	18,0	17,7	18,1	18,8	18,3	17,6	16,6
8:00	19,2	20,9	20,1	20,7	19,5	19,9	21,8	20,5	20,1	20,0
9:00	21,8	23,5	23,6	23,5	21,7	22,2	24,3	22,6	22,5	22,7
10:00	24,8	25,6	24,3	25,8	23,8	24,6	26,1	24,6	24,9	24,5
11:00	26,8	27,3	25,5	27,7	25,6	26,7	27,7	26,4	26,6	26,2
12:00	27,8	28,4	26,4	28,8	27,2	28,0	29,4	27,9	27,8	27,5
13:00	28,0	29,0	27,6	29,5	28,1	28,6	30,1	28,8	28,4	28,0
14:00	28,4	29,3	28,0	29,6	28,5	29,1	30,2	29,2	28,9	28,3
15:00	28,6	28,9	27,8	29,3	28,1	28,5	29,4	29,1	29,0	28,4
16:00	28,2	28,3	27,6	28,8	27,8	27,9	28,6	28,6	28,3	27,8
17:00	27,2	27,1	26,8	27,2	26,6	27,3	27,7	27,3	27,2	26,7
18:00	25,2	25,5	25,6	25,5	25,1	26,2	26,6	26,0	25,5	25,0
19:00	23,7	24,0	24,4	24,1	24,1	24,9	25,2	24,6	24,1	23,1
20:00	23,0	23,1	23,7	23,2	23,2	23,9	24,1	23,5	23,1	22,3
21:00	22,2	22,2	23,0	22,5	22,4	23,1	23,2	22,6	22,3	21,2
22:00	21,7	21,5	22,3	21,8	21,7	22,4	22,5	21,9	21,5	20,5
23:00	21,0	21,0	21,8	21,0	21,0	21,8	21,8	21,2	20,9	19,5
<b>LCZ</b>	<b>3</b>	<b>2<sub>3</sub></b>	<b>1<sub>2</sub></b>	<b>3<sub>2</sub></b>	<b>3<sub>2</sub></b>	<b>2<sub>3</sub></b>	<b>1<sub>2</sub> (*)</b>	<b>3 (*)</b>	<b>NC</b>	<b>D</b>

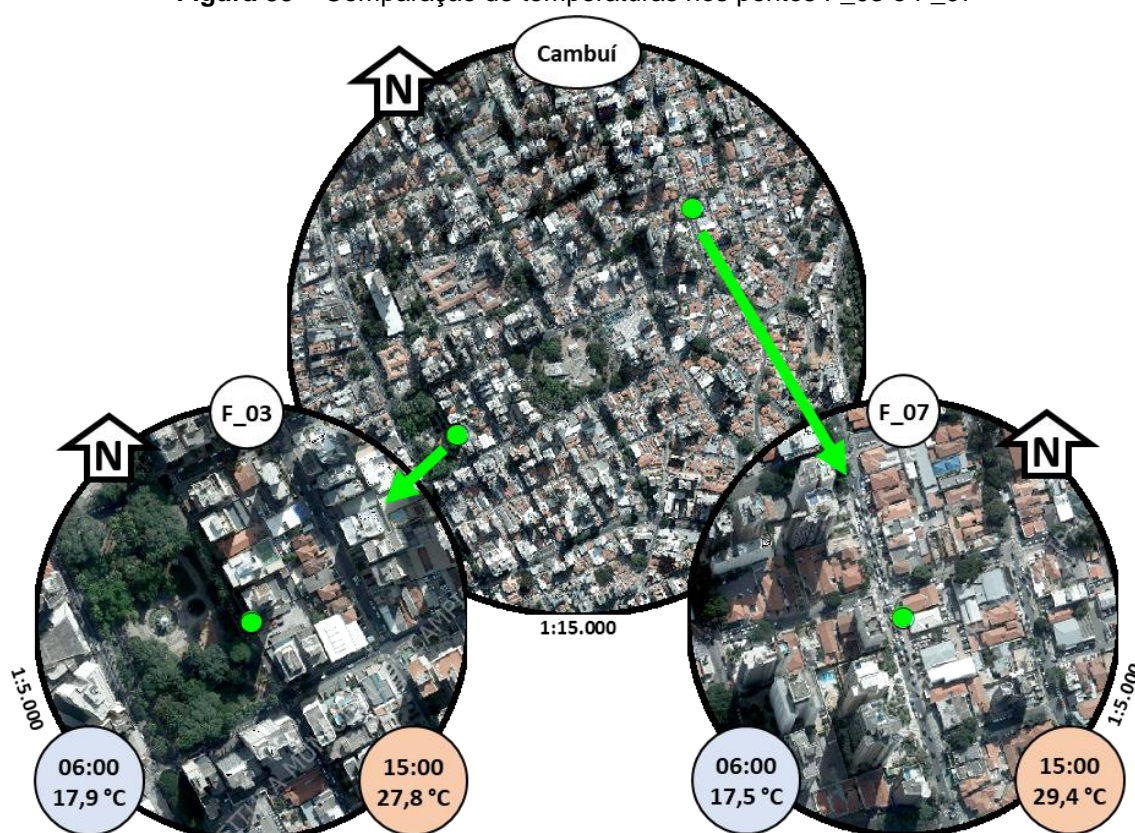
\* Pontos fixos de monitoramento estavam próximos aos limites da LCZ

Fonte: o autor.

Esses valores vão ao encontro à teoria do balanço superficial de Oke (1982), de acordo com a qual as superfícies urbanas apresentam um acúmulo de calor noturno, uma vez que têm suas dispersões de calor por radiação para a atmosfera reduzida pela baixa exposição ao céu, assim como perda de calor por trocas convectivas reduzidas pela baixa velocidade do vento como consequência da rugosidade superficial elevada pelas edificações.

Apesar de estarem entre os pontos que registraram as temperaturas mais altas entre às 18:00 e às 07:00, os pontos de monitoramento F\_03 e F\_05, os dois locais que registraram as menores temperaturas entre às 08:00 e às 17:00, resultados que podem ser atribuídos à presença de áreas mais arborizadas nas imediações desses dois pontos. O contraste entre a temperatura do ar verificada durante o período diurno nos pontos F-03 e F\_07 reforça essa constatação, dado distam menos de 700 m de distância e apresentam padrão similar de verticalização e de atividade antrópica, mesmo que o F\_07 possua menor grau de arborização em suas proximidades (Figura 39).

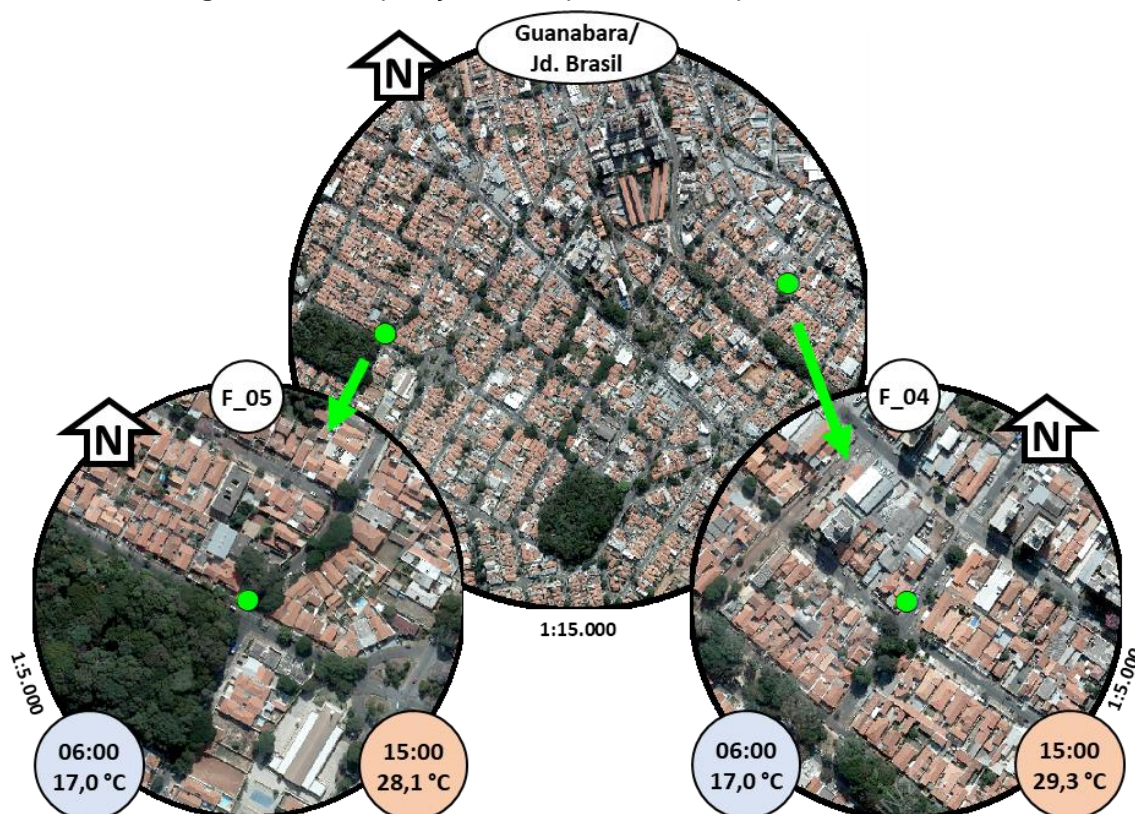
**Figura 39** – Comparação de temperaturas nos pontos F\_03 e F\_07





Este efeito de amenização da elevação da temperatura do ar durante o período diurno provocado pela presença de áreas verdes densamente arborizadas em meio ao tecido urbano, também foi constatado através da comparação entre os valores de temperatura registrados nos pontos F\_04 e F\_05, situados nos bairros Jardim Brasil e Guanabara, respectivamente, a uma distância aproximada de 840 m entre si. Ambos os pontos apresentaram a mesma temperatura mínima de 17 °C às 06:00, porém registraram uma diferença de 1,2 °C às 15:00, horário de temperatura máxima (Figura 39).

**Figura 40** – Comparação de temperaturas nos pontos F\_03 e F\_07



Fonte: o autor.

Essa redução no ganho de calor durante o dia, provocada pela presença de áreas arborizadas em meio ao tecido urbano (os pontos F\_03 e F\_05 se situavam em frente a uma praça arborizada e um bosque, respectivamente) e verificada tanto em áreas verticalizadas quanto áreas de baixos gabaritos, também encontra justificativa na teoria do balanço térmico superficial de Oke (1982). O sombreamento provocado pelas copas das árvores reduz a quantidade de radiação solar incidente sobre superfícies construídas, que frequentemente possuem valores de absorvância elevada. Simultaneamente, estes locais apresentam maior capacidade de absorver energia na forma de calor latente

devido à presença de solo permeável e evapotranspiração das plantas resultando em uma maior taxa de umidade do ar.

O Quadro 20 apresenta os valores médios da temperatura horária média registrada nos nove pontos de monitoramento fixo (F\_Med), o valor registrado no ponto de referência (CEPAGRI) e a diferença entre esses valores, a intensidade da ilha de calor urbana (*Urban Heat Island Intensity* – UHII).

**Quadro 20** – Intensidade mínima, média e máxima da Ilha de Calor Urbana registrada nos pontos de monitoramento fixo em relação ao ponto de referência (CEPAGRI)

Hora	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
F_Min	17,4	19,2	21,7	23,8	25,5	26,4	27,6	28,0	27,8	27,6	26,6	25,1
F_Med	18,0	20,3	22,9	24,9	26,7	28,0	28,7	29,0	28,7	28,2	27,2	25,7
F_Max	18,8	21,8	24,3	26,1	27,7	29,4	30,1	30,2	29,4	28,8	27,7	26,6
CEPAGRI	16,6	20,0	22,7	24,5	26,2	27,5	28,0	28,3	28,4	27,8	26,7	25,0
UHII_Min	0,8	-0,7	-1,0	-0,8	-0,7	-1,1	-0,4	-0,4	-0,6	-0,3	0,0	0,1
UHII_Med	1,4	0,3	0,1	0,4	0,5	0,5	0,7	0,7	0,3	0,4	0,5	0,7
UHII_Max	2,1	1,8	1,5	1,6	1,5	1,9	2,1	1,8	1,0	1,0	1,1	1,6

Hora	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00
F_Min	23,7	23,0	22,2	21,5	20,9	19,4	18,7	18,3	17,8	17,0	16,7	16,4
F_Med	24,3	23,4	22,6	21,9	21,3	19,9	19,3	18,8	18,3	17,7	17,4	17,2
F_Max	25,2	24,1	23,2	22,5	21,8	20,4	19,8	19,4	18,9	18,5	18,1	17,9
CEPAGRI	23,1	22,3	21,2	20,5	19,5	18,3	17,9	17,5	16,7	15,9	15,4	15,0
UHII_Min	0,6	0,7	1,0	1,0	1,4	1,1	0,8	0,8	1,1	1,1	1,3	1,4
UHII_Med	1,2	1,2	1,4	1,4	1,8	1,5	1,3	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1
UHII_Max	2,1	1,9	2,0	2,0	2,3	2,1	1,9	1,9	2,2	2,5	2,7	2,9

Fonte: o autor.

É possível observar que a intensidade máxima média da ilha de calor urbana medida através do monitoramento fixo foi de 2,1 °C, e ocorreu às 06:00, pouco antes do horário do nascer do sol neste período, que ocorre aproximadamente às 06:30. Já a intensidade mínima, de 0,1 °C, ocorre às 09:00, uma vez que o aumento da temperatura do ar ocorre mais rapidamente no ponto de referência em comparação aos pontos de monitoramento, até esse momento. Isto ocorre potencialmente devido à maior massa térmica do ambiente construído, resultando em um efeito de inércia e um efeito de sombreamento. Até este horário, o ângulo da altura solar está abaixo de 40°, o que limita a incidência de radiação solar diretamente no interior dos cânions urbanos, diferentemente do que ocorre no ponto de referência que, sem edificações no seu entorno, já se encontrava completamente exposto desde o início da manhã. Após às 09:00, a temperatura dos cânions urbanos passa a subir com maior rapidez, uma vez que os cânions estão mais expostos à radiação solar direta.

Devido a este mesmo efeito de sombreamento, conforme o ângulo de altura solar volta a diminuir no período da tarde, após às 14:00, inicia-se o também a redução da temperatura do ar nos pontos de monitoramento. Por situar-se em uma área totalmente aberta, a temperatura do ar no ponto de referência (CEPAGRI) continua a aumentar até às 15:00. Assim, neste horário, a intensidade da ilha de calor urbana atinge um valor mínimo local de  $0,3^{\circ}\text{C}$ . As variações da temperatura do ar em todos os pontos de monitoramento, sua média e no ponto de referência podem ser observadas no gráfico da Figura 41.

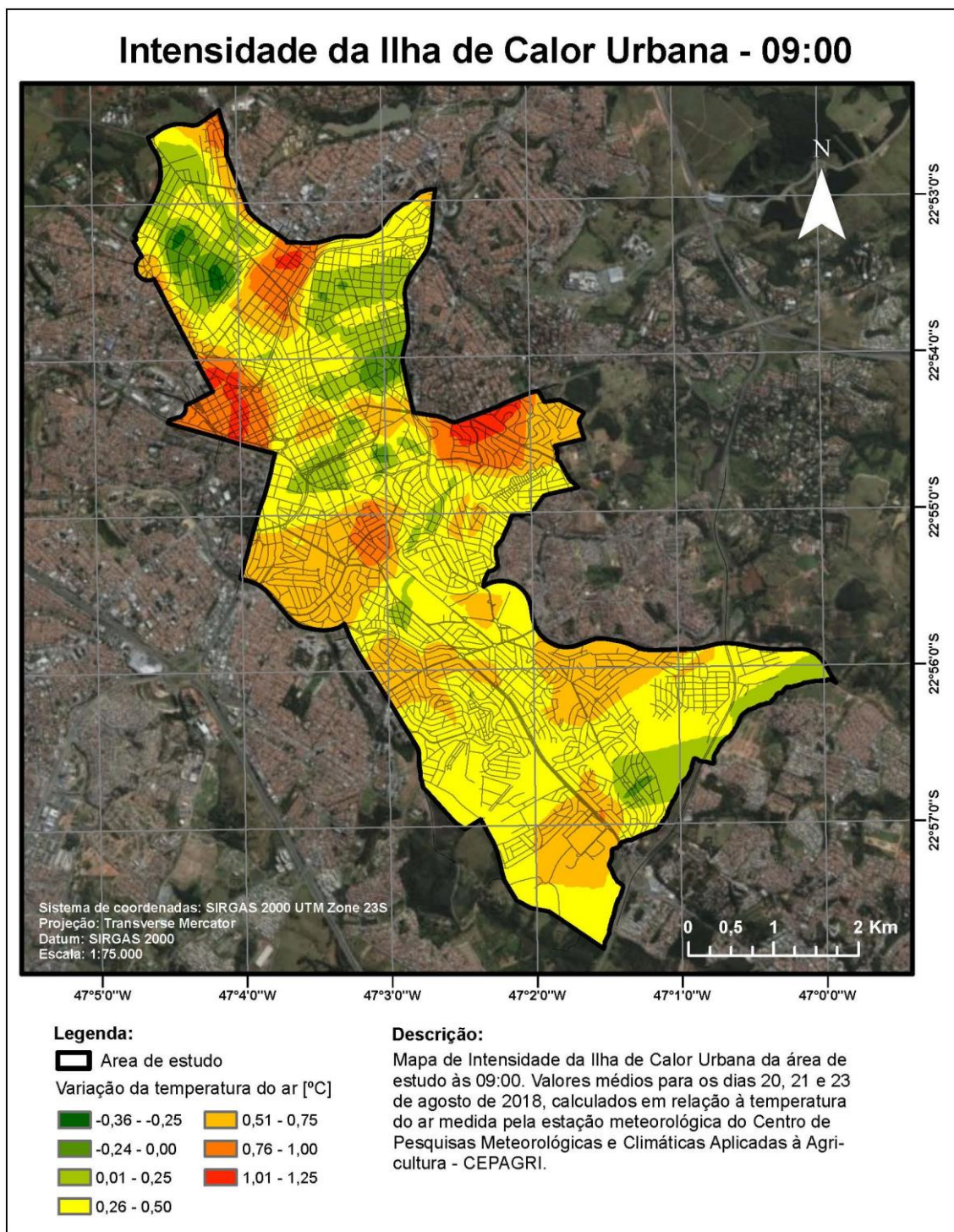




### 5.3. CAMPANHAS DE MEDIDAS MÓVEIS DA TEMPERATURA DO AR

A variação espacial da intensidade da ilha de calor urbana na área de estudo, obtida através das campanhas de medidas móveis pode ser observada na Figura 42 (campanhas realizadas às 09:00), Figura 43 (campanhas realizadas às 15:00) e Figura 44 (campanhas realizadas às 21:00).

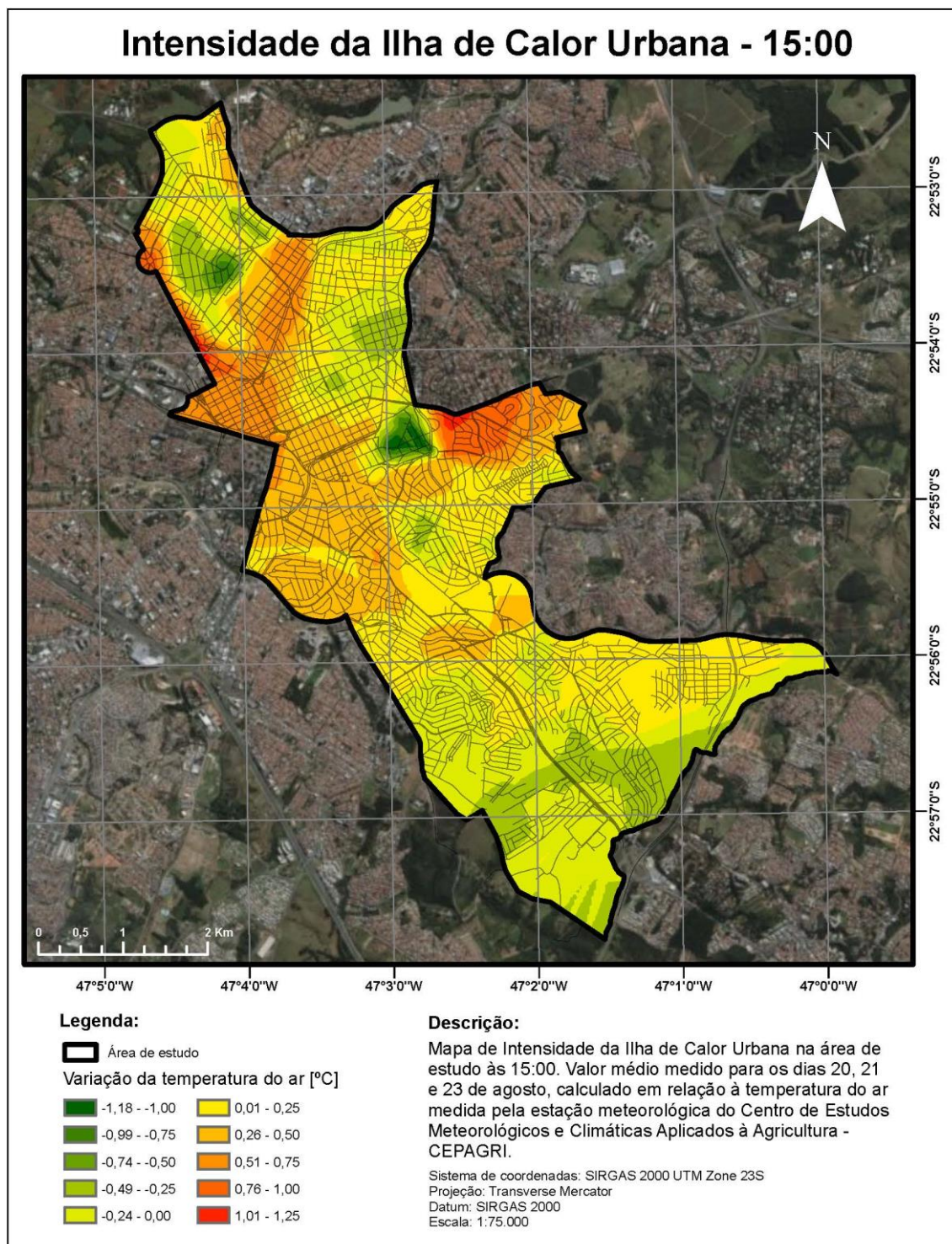
**Figura 42** – Espacialização da Intensidade da Ilha de Calor Urbana na área de estudo às 09:00



Fonte: o autor.



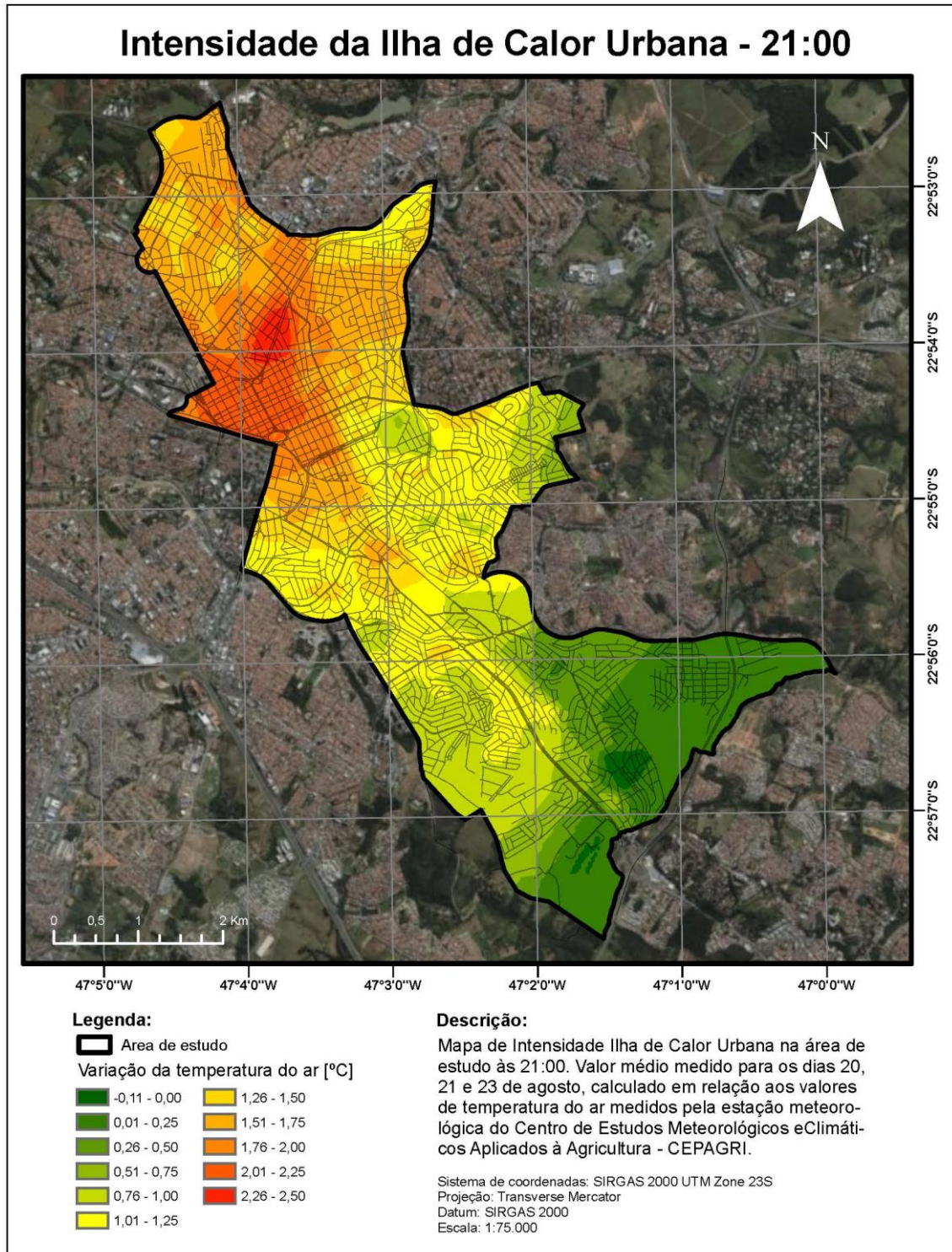
**Figura 43** – Espacialização da Intensidade da Ilha de Calor Urbana na área de estudo às 15:00



Fonte: o autor.



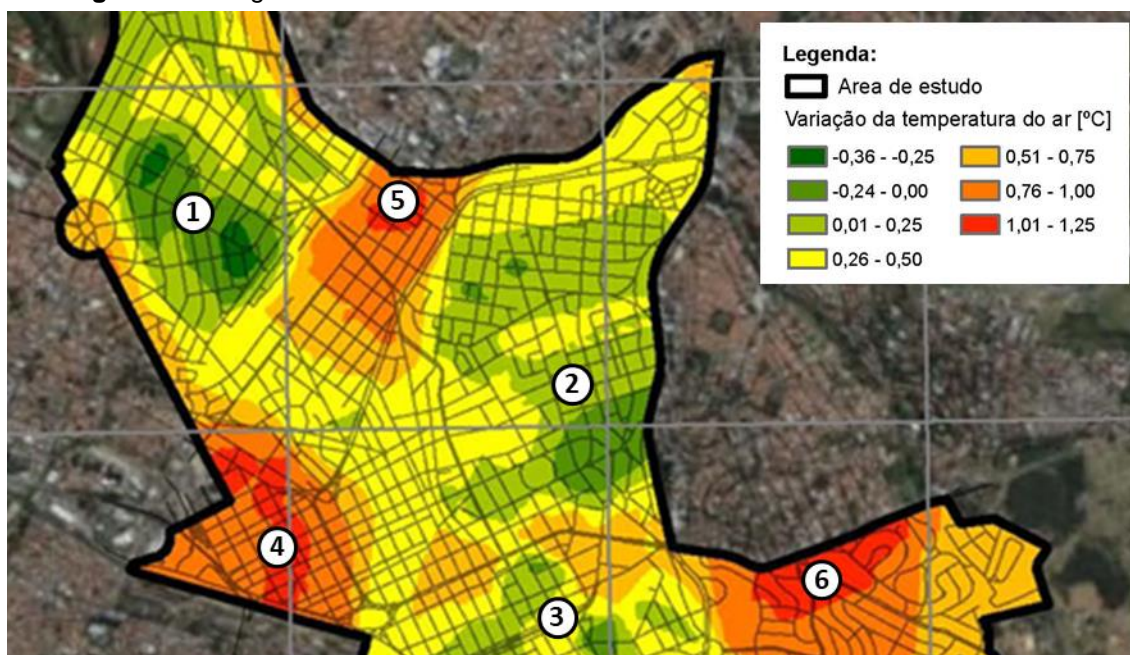
**Figura 44** – Espacialização da Intensidade da Ilha de Calor Urbana na área de estudo às 21:00



Fote: o autor.

A amplitude térmica da ilha de calor urbana registrada às 09:00 da manhã foi de 1,61 °C, a menor entre os 3 horários avaliados (2,43 °C às 15:00 e 2,61 °C às 21:00). Neste horário, as áreas que apresentaram menor aquecimento do ar se encontravam nos bairros Jardim Brasil e Guanabara, especialmente nas imediações do Bosque dos Alemães e o Bosque dos Italianos, locais de densa arborização (ponto 1 na Figura 45). Nesta região, a variação na temperatura do ar avaliada foi de -0,36 a +0,25 °C. Efeito similar, em menor intensidade (variação de temperatura do ar entre +0,01 e +0,25 °C) pôde ser observado no bairro Cambuí (ponto 2 na Figura 45), com destaque para a região entre o Centro de Convivência e a Praça Ralph Stettinger, localizada na Avenida José de Souza Campos, além da área que abrange o Bosque dos Jequitibás, Praça Professora Sílvia Simões Magro, Largo do Pará, Praça Conde F. Matarazzo e Praça José Rodríguez (ponto 3 na Figura 45). Dentre as regiões que apresentaram maior aquecimento, entre 0,76 e 1,25 °C, está a área menos verticalizada do Centro, entre a Avenida Senador Saraiva e a avenida Lix da Cunha, a área da Vila Itapura compreendida entre as Avenidas Barão de Itapura e Orozimbo Maia e o eixo da Avenida Moraes Sales com destaque para a área do baixo Jardim Paraíso (pontos 4, 5 e 6 na Figura 45, respectivamente). A região mais ao sul da área de estudo apresenta grau de aquecimento intermediário, com temperaturas entre 0,26 e 0,75 °C.

**Figura 45** – Regiões de maior e menor intensidade de Ilha de Calor Urbana às 09:00.

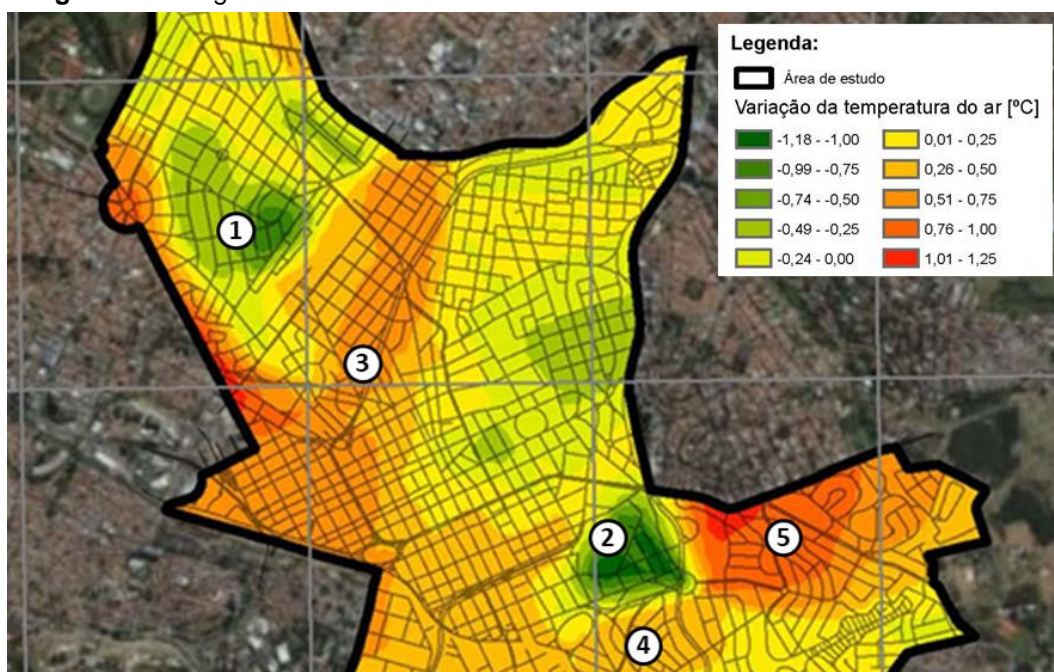


Fonte: o autor.



A ilha de calor urbana registrada às 15:00 apresenta significativas diferenças em relação àquela registrada no período da manhã. Áreas densamente arborizadas, que apresentavam temperaturas até 0,36 °C mais baixas que a temperatura de referência, passam a apresentar valores ainda menores, chegando a -1,18 °C (pontos 1 e 2 na Figura 46). No entanto, sua área de abrangência se mostra reduzida. No sentido oposto, as áreas que apresentavam maior aquecimento no período da manhã se mostram reduzidas em valores elevados, de +0,76 a +1,25 °C e mais abrangentes em valores mais baixos, de +0,26 a +0,75 °C. Assim, locais onde se detectavam focos isolados de aquecimento intenso no período da manhã passam a se conectar em uma ampla área de aquecimento (pontos 3, 4 e 5 na Figura 46). A região sul da área de estudo apresentou temperaturas ligeiramente inferiores às registradas no período da manhã, entre -0,49 e +0,25 °C.

**Figura 46** – Regiões de maior e menor intensidade de Ilha de Calor Urbana às 15:00.

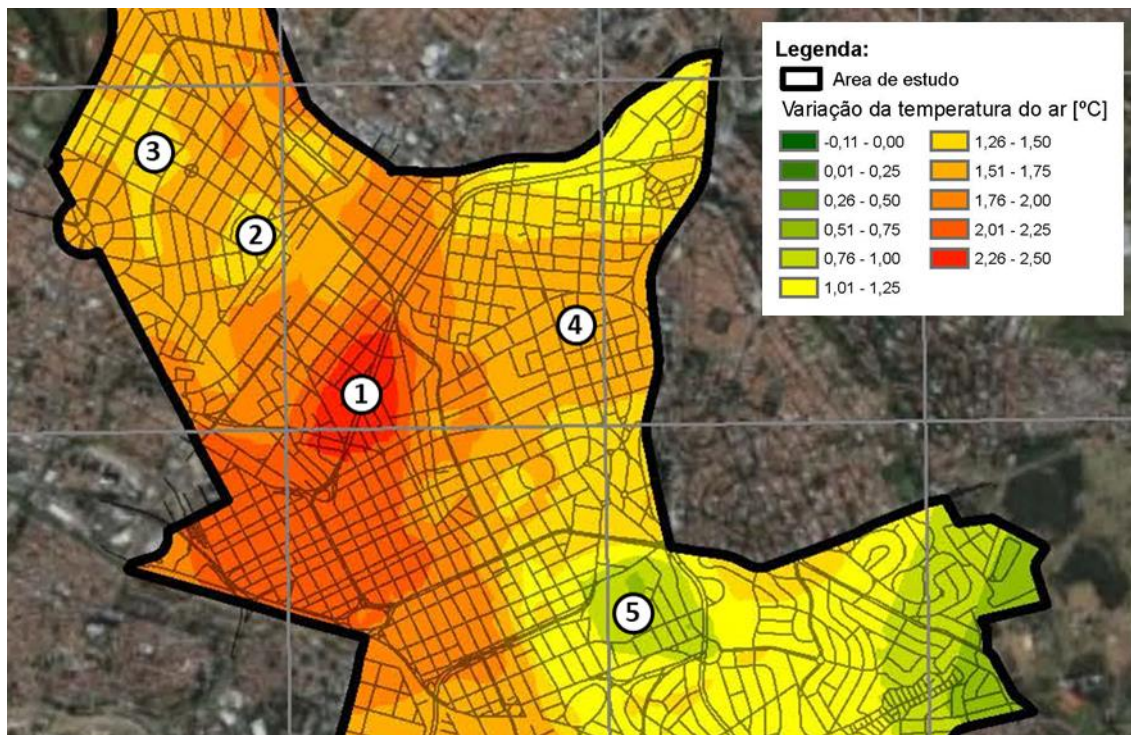


Fonte: o autor.

Os focos de aquecimento que estavam presentes na área de estudo no período da manhã e que se abrandaram, integrando-se no período da tarde, voltam a se intensificar de maneira concentrada no período noturno (ponto 1 na Figura 47), apresentando temperaturas do ar entre +1,26 e +2,50 °C mais altas do que a temperatura de referência. Mesmo regiões que apresentavam temperaturas do ar reduzida durante o dia, como as imediações do Bosque dos

Alemães, Bosque dos Italianos e bairro Cambuí (pontos 2, 3 e 4 na Figura 47, respectivamente) apresentam elevação de temperatura entre +1,26 e +1,75 °C. Já o Bosque dos Jequitibás (ponto 5 Figura 47) apresenta elevação de temperatura do ar mais branda, entre +0,51 e +1,00 °C. Apenas no extremo sudeste da área de estudo a temperatura do ar se aproxima da temperatura de referência, entre -0,11 e 0,25 °C.

**Figura 47** – Região de maior intensidade de Ilha de Calor Urbana às 21:00.



Fonte: o autor.

Por meio das campanhas de medidas móveis, foi possível observar variações temporais e espaciais do campo térmico da área de estudo que demonstram a influência da composição do tecido urbano no seu balanço térmico superficial. Por meio da correlação entre o fator de visão do céu e a variação da temperatura do ar medida às 21:00, esta pesquisa buscou quantificar a influência da morfologia do tecido urbano na intensidade da ilha de calor noturna em LCZs distintas. As equações de regressão linear obtidas para valores de FVC pontuais e médios (considerando um raio de abrangência de 100 m) em 8 LCZs avaliadas são apresentadas no Quadro 21. Estas LCZs correspondem a 14 áreas de análise amostral utilizadas durante a etapa de classificação da área de estudo que coincidem com os transectos de medidas móveis. Também são

apresentados neste quadro o número de pontos utilizado para a regressão e a amplitude dos valores de FVC considerados.

**Quadro 21** – Correlação do Fator de Visão do Céu e a Intensidade da Ilha de Calor Urbana Noturna

LCZ	Áreas amostrais	FVC	UHII	R <sup>2</sup>	p	n	Valores SVF
1 <sub>2</sub>	7	Ponto	0,03x + 1,72	0,05	0,44	15	0,24 - 0,64
		100m	-0,62x + 1,98	0,70	<0,01	15	0,36 - 0,43
2 <sub>3</sub>	2, 3, e 5	Ponto	-1,24x + 2,12	0,20	<0,01	87	0,22 - 0,83
		100m	-2,44x + 2,66	0,37	<0,01	87	0,38 - 0,69
3	12, 15, 16 e 19	Ponto	-0,37x + 1,19	0,15	<0,01	102	0,11 - 0,86
		100m	-2,56x + 2,48	0,75	<0,01	102	0,46 - 0,73
3 <sub>1</sub>	8	Ponto	-0,19x + 1,91	0,49	<0,01	16	0,24 - 0,76
		100m	-0,87x + 2,22	0,94	<0,01	16	0,42 - 0,55
3 <sub>2</sub>	14 e 17	Ponto	0,06x + 1,37	0,03	0,08	88	0,04 - 0,77
		100m	0,00x + 1,40	<0,01	0,98	88	0,23 - 0,65
3 <sub>B</sub>	4	Ponto	0,03x + 1,22	0,33	0,03	14	0,43 - 0,82
		100m	-0,19x + 1,37	0,60	<0,01	14	0,65 - 0,70
3 <sub>8</sub>	20	Ponto	0,14x + 0,32	0,10	0,21	17	0,06 - 0,82
		100m	-0,22x + 0,51	0,01	0,66	17	0,23 - 0,65
6	21	Ponto	-0,10x + 0,02	0,17	0,10	17	0,52 - 0,84
		100m	-0,61x + 0,34	0,57	<0,01	17	0,60 - 0,69

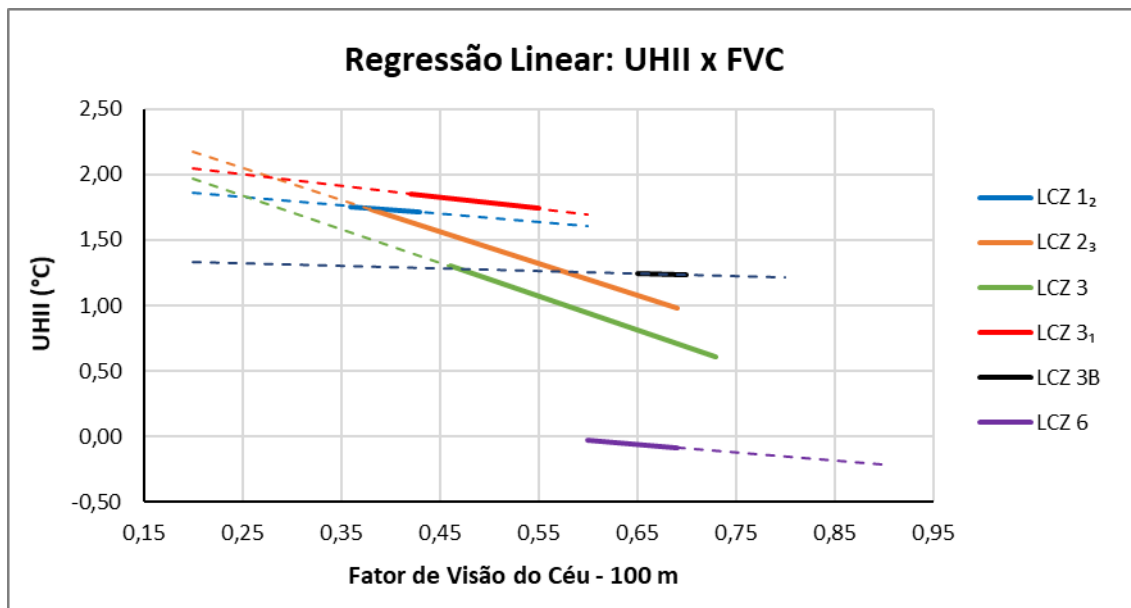
Fonte: o autor.

Exceto no caso das LCZs 3<sub>2</sub> e 3<sub>8</sub>, o coeficiente de determinação R<sup>2</sup> das regressões obtidas pelo valor de FVC médio foi superior ao das regressões obtidas pelo valor de FVC pontual. Enquanto os valores pontuais resultaram em regressões, em sua maioria, de baixíssima correlação ( $R^2 \leq 0,20$ ), os valores médios de FVC resultaram em regressões de correlação média ( $0,40 < R^2 \leq 0,60$ ) a alta ( $0,60 < R^2 \leq 0,80$ ), em sua maioria. A significância estatística das regressões estabelecidas utilizando valores médios de FVC também foi superior nestes casos, com destaque para as LCZs 1<sub>2</sub> e 6, onde o uso de valores médios de FVC trouxe o valor para abaixo do nível de significância de 5%.

Um gráfico com as regressões lineares das LCZs 1<sub>2</sub>, 2<sub>3</sub>, 3, 3<sub>1</sub>, 3<sub>B</sub> e 6, para valores médios de FVC (100 m), é apresentado na Figura 48. Linhas contínuas representam os valores de UHII calculados a partir do intervalo de valores de FVC encontrados na área de estudo para cada uma destas LCZs, enquanto as linhas tracejadas representam a extrapolação desses valores considerando limites teóricos de cada LCZ, conforme estabelecido por Stewart e Oke (2012).



**Figura 48** – Gráfico de regressão linear: UHII em função de FVC



Fonte: o autor.

As LCZs 1<sub>2</sub> e 3<sub>1</sub>, que possuem em comum a presença de edificações altas, apresentaram as maiores intensidades de Ilha de Calor Urbana dentre as LCZs analisadas. Apesar de possuir edificações altas como característica predominante e edificações médias como característica secundária, a LCZ 1<sub>2</sub> apresentou temperaturas entre 0,2 °C e 0,1 °C inferiores à LCZ 3<sub>1</sub>, que tem como característica predominante as edificações baixas e apenas como característica secundária as edificações altas. Ainda que possa ser atribuída à presença de arborização viária considerável na área de análise da LCZ 1<sub>2</sub>, em oposição ao baixo grau de arborização encontrada na área de análise da LCZ 3<sub>1</sub>, essa diferença não representa variação significativa, considerando o contexto do ambiente urbano. Desta forma, pode ser considerado que estas zonas apresentam a mesma relação entre sua morfologia e a variação do seu campo térmico.

A mesma consideração foi adotada para as Zonas Climáticas Locais 2<sub>3</sub> e 3, cujos valores de elevação da temperatura do ar apresentaram diferenças entre 0,20 e 0,26 °C. Em relação às demais Zonas Climáticas Locais avaliadas, as LCZs apresentaram as maiores taxas de elevação de temperatura do ar. Ainda que não possuam edificações altas em sua composição, para valores de FVC abaixo de 0,40, avaliou-se que a elevação da temperatura do ar nestas LCZs se assemelha àquela avaliada para as LCZs 1<sub>2</sub> e 3<sub>1</sub>, atingindo valor máximo entre

1,97 e 2,17 °C. Para valores de FVC acima de 0,50, no entanto, a elevação de temperatura nestas zonas se aproxima mais aos valores verificados para a LCZ 3<sub>B</sub>, também caracterizada primariamente por edificações baixas e compactas. Em seu valor mínimo a elevação supera apenas que aquela verificada na LCZ 6 composta também por edificações baixas, porém com maior espaçamento entre si. Nestes casos, a elevação da temperatura verificada foi de 0,98 e 0,61 °C para as LCZs 2<sub>3</sub> e 3, respectivamente.

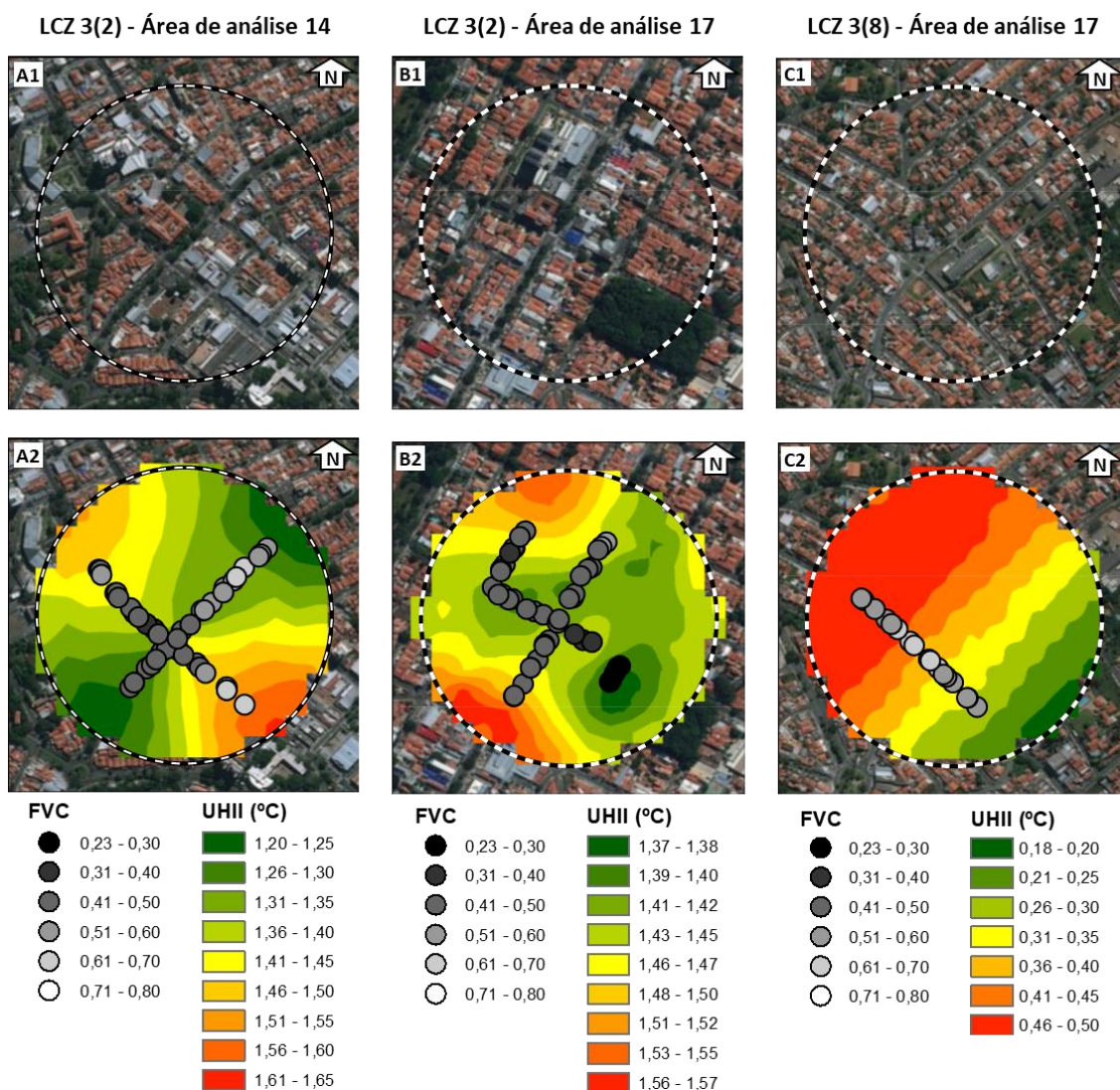
A LCZ 3<sub>B</sub>, também caracterizada primariamente por edificações baixas e compactas, apresentou a menor variação térmica dentre as Zonas Climáticas Locais Analisadas. Para valores de FVC entre 0,2 e 0,8, a intensidade da ilha de calor nesta zona climática varia apenas 0,11 °C, entre 1,33 e 1,22 °C. Esta estabilização das variações foi atribuída à presença de arborização esparsa, distribuída por toda a área de análise.

A LCZ 6, caracterizada por edificações baixas com espaçamento intermediário entre si, apresentou a elevação de temperatura mais baixa entre todas as Zonas Climáticas Locais analisadas, entre -0,03 e -0,21 °C.

No caso das LCZs 3<sub>2</sub> e 3<sub>8</sub>, a baixa correlação e significância dos resultados foi atribuída à heterogeneidades nas áreas de análise (Figura 49).

A área de análise 14 (Figura 49 – Quadro A1) apresenta tipologia construtiva composta por edificações maiores e ligeiramente mais altas em suas regiões noroeste e sudoeste, que apresentam microclima de temperatura mais elevada que as regiões nordeste e sudoeste, onde estão regiões de tipologia construtiva mais baixa com maior grau de arborização viária. Como resultado, o campo térmico desta área de análise apresenta aspecto de “sela” (Figura 49 – Quadro A2). Simultaneamente, devido à presença de arborização viária nas duas vias que compõe as rotas de medição móvel que cruzam essa área de análise, os valores mínimos de FVC se encontram próximo ao centro da “sela”, de modo que não é possível estabelecer uma boa correlação entre os valores de FVC e a variação da temperatura para esta área de análise.

**Figura 49** – Áreas de análise das LCZs 3(2) e 3(8)



A área de análise 17 (Figura 49 – Quadro B1) possui um bosque em sua região sudeste, uma quadra onde se localizam edifícios altos a noroeste. Devido à presença do bosque, pontos de análise com baixos valores de FVC, entre 0,23 e 0,40, se encontram nos locais de menor aquecimento, de 1,37 a 1,40 °C. A presença dos prédios ao norte cria um segundo local de baixo FVC, entre 0,31 e 0,50, com valores próximos aos encontrados nas imediações do bosque, porém onde é verificado aquecimento de 1,43 a 1,50 °C. Simultaneamente, devido à arborização presente no canteiro central da avenida que cruza a área de análise no eixo nordeste-sudoeste, esta avenida apresentou valores de FVC constantes, na faixa de 0,41 a 0,50, enquanto o aquecimento nestes pontos variou de 1,43 a 1,52 °C. Assim, devido à presença do bosque, dos edifícios altos

e da arborização no canteiro central da avenida, não foi encontrada correlação entre o FVC e a variação da temperatura do ar nesta área de análise.

A tipologia construtiva da área de análise 20 apresenta considerável homogeneidade, conforme pode ser observado na Figura 49 – Quadro C1. Seu campo térmico, no entanto, apresenta um gradiente de temperatura nítido e bem definido, decrescente de noroeste para sudeste (Figura 49 – Quadro C2). Uma aparente consequência de áreas verdes abertas a sudeste da área de análise se sobrepõe à influência do tecido urbano, justificando a fraca correlação entre o FVC e a UHII nesta área.

Assim, conforme resultados apresentados no Quadro 21 e na Figura 48 esta pesquisa verificou que distintas LCZs em uma mesma cidade apresentam distintas correlações entre o FVC e a UHII.

As LCZs 1<sub>2</sub> e 3<sub>1</sub>, caracterizadas por tipologias construtivas mistas, com grau de verticalização alto a médio e baixo a alto, respectivamente, tiveram elevação da temperatura do ar estimada mais alta, entre 1,61 e 2,05 °C, porém taxa de variação de temperatura do ar (coeficiente angular) intermediária, -0,62 para a LCZ 1<sub>2</sub> e -0,87 para a LCZ 3<sub>1</sub>.

As LCZs 2<sub>3</sub> e 3, caracterizadas por edificações compactas, com grau de verticalização médio a baixo e baixo, respectivamente, apresentaram elevação estimada da temperatura do ar mais ampla, entre 2,17 e 0,94°C. As taxas de variação da temperatura do ar destas LCZs também foram as maiores verificadas: -2,44 para a LCZ 2<sub>3</sub> e -2,56 a LCZ 3.

A LCZ 3<sub>B</sub>, caracterizada pelas mesmas edificações baixas e compactas, mas com presença secundária de árvores esparsas, apresentou temperaturas intermediárias e a mais baixa taxa de variação da temperatura do ar. Suas temperaturas estimadas ficam entre 1,22 e 1,33 °C, e sua taxa de variação de temperatura do ar é de -0,19.

Por fim, a LCZ 6, caracterizada por edificações baixas e esparsas, apresentou as temperaturas do ar estimadas mais baixas entre -0,03 e -0,21. Sua taxa de variação de temperatura foi de 0,61.

## 6. CONCLUSÃO

Considerou-se que a etapa preliminar de classificação qualitativa do tecido urbano, com base em inspeção visual de imagens de satélite, imagens dos locais e conhecimento prévio dos pesquisadores, foi efetiva em mapear a distribuição de Zonas Climáticas Locais na área de estudo, servindo de embasamento para a seleção das áreas amostrais que seriam utilizadas na classificação quantitativa destas LCZs. O número de classes identificadas pelo método quantitativo foi inferior àquele obtido pelo método qualitativo, o que reflete o fato de o método das LCZs trabalhar com faixas de valores para cada parâmetro avaliado, de modo que variações visuais nos padrões do tecido urbano podem ser verificadas entre LCZs de mesma classe. Estes fatos demonstram que, após classificação de áreas amostrais pelo método quantitativo, algoritmos de programação para classificação de imagens de satélite poderiam, com treinamento supervisionado, ser empregados para expandir a classificação das LCZs para o restante da área do município.

Através de um método misto de coleta de dados, composta por pontos fixos de monitoramento e campanhas de medidas móveis, foi avaliada a intensidade da ilha de calor urbana da área de estudo. Obter resultados espaciais similares com utilização exclusiva de pontos fixos de monitoramento demandaria uma rede de sensores ampla e numerosa, enquanto a utilização exclusiva de medidas móveis demandaria um aumento no número diário de campanhas de coleta e, conseqüentemente, um aumento considerável na mão de obra necessária para a condução destas. Assim, ao adotar o método misto, limitações individuais de cada método foram superadas, permitindo analisar a variação da temperatura do ar tanto em relação ao espaço quanto em relação ao tempo. Outras decisões consideradas fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa foram a adoção de um procedimento de calibração por referência dos instrumentos e aplicação de correções aos dados coletados (correção dos efeitos da topografia e correção da variação natural da temperatura do ar em função do tempo). Devido a essas etapas, houve ganho significativo na representatividade dos resultados obtidos.

Estes resultados demonstraram que durante o período da manhã a elevação da temperatura do ar é mais intensa em áreas urbanizadas com variado grau de adensamento, porém pouco sombreamento. Durante o período da tarde, existe uma homogeneização das áreas aquecidas, onde o aquecimento de áreas com pouco sombreamento é reduzido enquanto o aquecimento de áreas verticalizadas aumenta. Áreas com arborização viária ou arborização concentrada em praças demonstraram aquecimento ligeiramente reduzido neste horário, sendo que áreas com arborização densa, como bosques, apresentaram os menores valores registrados.

A partir do mapa da intensidade da ilha de calor às 21:00, a variação na temperatura do ar foi correlacionada a valores de FVC pontuais e médios (raio de abrangência de 100m) em distintas LCZs. Para valores de FVC abaixo de 0,45, LCZs 2<sub>3</sub> e 3, áreas urbanizadas de arranjo compacto, compostas por uma mescla de edificações médias (3 a 5 pavimentos) e baixas (1 a 2 pavimentos) ou somente edificações baixas, apresentam elevação noturna da temperatura do ar entre aproximadamente 1,5 e 2,2 °C. Esses valores são semelhantes aos verificados nas LCZs 1<sub>2</sub> e 3<sub>1</sub>, áreas urbanizadas de arranjo compacto, compostas por uma mescla de edificações baixas e altas (mais do que 5 pavimentos) ou médias e altas, onde a elevação foi de aproximadamente 1,7 a 2,0 °C. Para valores de FVC acima de 0,45, as LCZs 2<sub>3</sub> e 3 apresentaram elevação noturna da temperatura do ar entre 1,5 e 0,7 °C, comportamento mais próximo àquele apresentado pela LCZ 3<sub>B</sub>, de arranjo também compacto e edificações baixas. A LCZ 6, composta por edificações baixas, porém maior espaçamento, apresentou a menor elevação do ar entre todas as Zonas Climáticas Locais avaliadas, entre 0,0 e -0,2 °C, aproximadamente. Frente à estes resultados, conclui-se que, para valores de FVC abaixo de 0,45, os efeitos resultantes da compactação do tecido urbano na variação noturna da temperatura do ar prevalecem em relação aos efeitos resultantes de sua verticalização, de modo que LCZs compactas de baixa a média verticalização apresentam elevação de temperatura similar à LCZs compactas de gabarito médio a alto. Para valores de FVC superiores a 0,45, os efeitos da verticalização na elevação da temperatura do ar noturna se mostram mais significativos, de modo que as LCZs de arranjo compacto e verticalização média a alta registram temperaturas mais elevadas do que as LCZs de arranjo

compacto e verticalização baixa a média (0,5 °C). A pesquisa verificou ainda que a distribuição de heterogeneidades no tecido urbano (áreas densamente arborizadas, canteiros centrais arborizados e presença pontual de edifícios altos em meio a edifícios baixos) pode prejudicar o estabelecimento destas correlações.

Desta forma, conclui-se que a pesquisa atingiu o objetivo proposto de correlacionar o FVC à variação da temperatura do ar em diferentes LCZs. Ao avaliar a influência do FVC na elevação da temperatura do ar em áreas urbanizadas conforme a composição morfológica e superficial de seu tecido urbano, a pesquisa permite que o FVC seja utilizado mais efetivamente em estratégias de mitigação da ICU.

Conforme pode ser verificado pelos mapas de intensidade de ilha de calor às 09:00, 15:00 e 21:00, o campo térmico da área de estudo apresenta variações espaciais significativas ao longo do dia. Deste modo, em estudos futuros, pretende-se avaliar as correlações entre o FVC e a variação da temperatura do ar em outros horários (06:00, horário de intensidade máxima da ilha de calor e 15:00, horário de temperatura máxima).

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, E. et al. **Guidelines on climate metadata and homogenization** World Meteorological Organization, , 2003.

ALEXANDER, P. J.; FEALY, R.; MILLS, G. M. Simulating the impact of urban development pathways on the local climate: A scenario-based analysis in the greater Dublin region, Ireland. **Landscape and Urban Planning**, v. 152, p. 72–89, 2016.

ALI-TOUDERT, F. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. **Berichte des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg**, n. 15, p. 224, 2005.

BAIROCH, P.; GOERTZ, G. Factors of urbanisation in the nineteenth century developed countries: a descriptive and econometric analysis. **Urban Studies**, v. 23, n. 4, p. 285–305, 1986.

BECHTEL, B. et al. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 1, p. 199–219, 2015.

BENEVOLO, L. **A história da cidade**. 4a. ed. São Paulo: Perspectiva, 2009.

BRASIL. Lei N° 10.267, de 10 de Julho de 2001. Estatuto da Cidade. 11 jul. 2001, p. 1.

BROUSSE, O. et al. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. **Urban Climate**, v. 17, p. 116–134, 2016.

CAMPINAS. **A cidade de Campinas: Dados geográficos**. Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Campinas Disponível em: <<http://www.campinas.sp.gov.br/governo/seplama/dados-do-municipio/cidade/>>. Acesso em: 2 fev. 2018.

CAMPINAS. Lei complementar N° 189, 08 de janeiro de 2018. **Diário Oficial da Prefeitura Municipal de Campinas**, Poder Executivo, Campinas, SP, 09 jan. 2018. Suplemento. Disponível em: <[http://suplementos.campinas.sp.gov.br/admin/download/suplemento\\_2018-01-09\\_cod\\_473\\_1.pdf](http://suplementos.campinas.sp.gov.br/admin/download/suplemento_2018-01-09_cod_473_1.pdf)>. Acesso em: 09 abr. 2018.

CARDOSO, R. et al. Assessment of Urban Heat Islands in Small- and Mid-Sized Cities in Brazil. **Climate**, v. 5, n. 1, p. 14, 2017.

CEPAGRI - Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. Clima de Campinas. Disponível em : <<https://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-de-campinas.html>>. Acesso em 01/07/2018.

CHANDLER, T. J. **The Climate Of London**. 1st. ed. London: Hutchinson & Co Ltd, 1965.

CHAPMAN, L.; BELL, C.; BELL, S. Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 9, p. 3597–3605, 2017.

CHEN, L. et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach. **International Journal of Climatology**,



v. 32, n. 1, p. 121–136, 2012.

CHEN, Y. et al. Estimating the relationship between urban forms and energy consumption: A case study in the Pearl River Delta, 2005-2008. **Landscape and Urban Planning**, v. 102, n. 1, p. 33–42, 2011.

CHEUNG, H.; COLES, D.; LEVERMORE, G. Urban heat island analysis of Greater Manchester, UK using sky view factor analysis. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 5–17, 2016.

COLLISCHON, E.; FERREIRA, C. V. DE O. O fator de visão do céu e sua influência sobre as características térmico-higrométricas intraurbanas em Relotas/RS, Brasil. **Geographia Meridionalis**, v. 1, n. 1, p. 160–178, 2015.

DAVENPORT, A. et al. **Estimating the roughness of cities and sheltered country**. 12th Conference on Applied Climatology. **Anais...**Boston: American Meteorological Society, 2000

EMMANUEL, R.; KRÜGER, E. Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. **Building and Environment**, v. 53, p. 137–149, 2012.

ESRI. **World Imagery**. 29 mar. 2018. 1 mapa. Escala variável. Disponível em <[https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World\\_Imagery/MapServer](https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer)>. Acesso em: 08 abr. 2018.

ESRI. **ArcGIS Desktop**. Versão 10.5.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute – ESRI, Jun. 2017.

FENNER, D. et al. **Intra and inter “local climate zone” variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany***Meteorologische Zeitschrift*, 2017.

GÁL, T.; BECHTEL, B.; UNGER, J. **Comparison of two different Local Climate Zone mapping methods**. ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment. **Anais...**Toulouse France: ICUC9, 2015

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Versão 7,3,1,4507. Mountain Valley, CA. Google LLC, 2018.

GOOGLE. **Google Street View**. Versão 247. Mountain Valley, CA. Google LLC, 2018.

GOOGLE. **Mapa de fotos coletadas**. mar. 2018. 1 mapa. Escala variável. Disponível em <[https://www.google.com/maps/d/viewer?hl=en&mid=1S69qNnoIP4-RT\\_l36g9Tg2p1ARAhOCmZ&ll=22.901198951253846%2C-47.06711074999998&z=13](https://www.google.com/maps/d/viewer?hl=en&mid=1S69qNnoIP4-RT_l36g9Tg2p1ARAhOCmZ&ll=22.901198951253846%2C-47.06711074999998&z=13)>. Acesso em: 08 abr. 2018.

HÄB, K.; RUDELL, B. L.; MIDDEL, A. Sensor lag correction for mobile urban microclimate measurements. **Urban Climate**, v. 14, p. 622–635, 2015.

HÄMMERLE, M. et al. Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 105, n. 3, p. 521–527, 2011.

HE, X. et al. Influence of sky view factor on outdoor thermal environment and physiological equivalent temperature. **International Journal of Biometeorology**, v. 59,

n. 3, p. 285–297, 2015.

HOWARD, L. **The Climate of London**. 3. ed. [s.l.] International Association for Urban Climate, 2007. Disponível em: <[https://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward\\_Climate-of-London-V1.pdf](https://www.urban-climate.org/documents/LukeHoward_Climate-of-London-V1.pdf)> . Acesso em: 10 jun. 2018.

HYAMS, D. G. **Curve Expert Basic**. Versão 2.10. Hyams Development, 2019.

JOHNSON, I. D.; WATSON, I.D. The determination of view-factors in urban canyons. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**. n 23, p. 329–335. 1984.

KAISE, I. M.; FARIA, J. R. G. DE. **Validation of transects for air temperature and moisture profiles measurements in urban areas under high diurnal air temperatures variations**. 18th Internacional Conference on Passive and Low Energy Architecture. **Anais...**Florianópolis, Brazil: 2001

KALOUSTIAN, N.; BECHTEL, B. Local Climatic Zoning and Urban Heat Island in Beirut. **Procedia Engineering**, v. 169, p. 216–223, 2016.

KAMEL BOULOS, M. N. et al. Crowdsourcing, citizen sensing and sensor web technologies for public and environmental health surveillance and crisis management: Trends, OGC standards and application examples. **International Journal of Health Geographics**, v. 10, 2011.

KETTERER, C.; MATZARAKIS, A. Comparison of different methods for the assessment of the urban heat island in Stuttgart, Germany. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 9, p. 1299–1309, 2015.

KOLOKOTRONI, M.; GIRIDHARAN, R. Urban heat island intensity in London : An investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. **Solar Energy**, v. 82, n. 11, p. 986–998, 2008.

KONARSKA, J. et al. Influence of vegetation and building geometry on the spatial variations of air temperature and cooling rates in a high-latitude city. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 5, p. 2379–2395, 2016.

KOTHARKAR, R.; BAGADE, A. Urban Climate Local Climate Zone classification for Indian cities : A case study of Nagpur. **Urban Climate**, 2017.

KRÜGER, E.; DRACH, P.; BROEDE, P. Outdoor comfort study in Rio de Janeiro: site-related context effects on reported thermal sensation. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 3, p. 463–475, 2017.

KRÜGER, E. L.; MINELLA, F. O.; RASIA, F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil. **Building and Environment**, v. 46, n. 3, p. 621–634, 2011.

LECONTE, F. et al. Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements. **Building and Environment**, v. 83, p. 39–49, 2015.

LOPEZ, C. S. P. et al. Solar Radiation and Daylighting Assessment Using the Sky-view Factor (SVF) Analysis as Method to Evaluate Urban Planning Densification Policies Impacts. **Energy Procedia**, v. 91, n. 0, p. 989–996, 2016.

LIN, T. P. et al. Quantification of the effect of thermal indices and sky view factor on

park attendance. **Landscape and Urban Planning**, v. 107, n. 2, p. 137–146, 2012.

LIU, L. et al. An improved temporal correction method for mobile measurement of outdoor thermal climates. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 1–2, p. 201–212, 2017a.

LIU, L. et al. Analysis of local-scale urban heat island characteristics using an integrated method of mobile measurement and GIS-based spatial interpolation. **Building and Environment**, v. 117, p. 191–207, 2017b.

MARIN, F. R.; PANDORFI, H.; FERREIRA, A. S. Estimativa das temperaturas máximas, mínimas e médias mensais para o Brasil. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 13. **Anais...**Santa Maria: Maria, Universidade Federal de Santa, 2003

MATZARAKIS, A.; MATUSCHEK, O. Sky view factor as a parameter in applied climatology - Rapid estimation by the SkyHelios model. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 20, n. 1, p. 39–45, 2011.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 2, p. 131–139, 2010.

MEIER, F. et al. Urban Climate Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. **Urban Climate**, v. 19, p. 170–191, 2017.

MILLS, G. Luke Howard and The Climate of London. **Weather**, v. 63, n. 6, p. 153–157, 2008.

MIRZAEI, P. A. Recent challenges in modeling of urban heat island. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 200–206, 2015.

MIRZAEI, P. A.; HAGHIGHAT, F. Approaches to study Urban Heat Island e Abilities and limitations. **Building and Environment**, v. 45, n. 10, p. 2192–2201, 2010.

MONTEIRO, V. S. **Zonas climáticas locais e a relação com a morfologia urbana. Estudo de caso: Campinas / SP**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana)—Campinas, SP, Brasil: Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana, Universidade Católica de Campinas, 2018.

MONTEIRO, V. S. DE; PEZZUTO, C. C. **Classificação das Zonas Climáticas Locais. Estudo de caso – Campinas/SP**. I Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana Universidade. **Anais...**São Carlos, SP: SINGEURB 2017, 2017

MULLER, C. L. et al. Sensors and the city: A review of urban meteorological networks. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 7, p. 1585–1600, 2013.

MUNIZ, L. P.; PEZZUTO, C. C. **O efeito dos parâmetros urbanísticos na variação microclimática de um cânion urbano**. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**São Paulo: ENTAC, 2016

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

NG, E.; REN, C. Urban Climate China's adaptation to climate & urban climatic changes : A critical review. **Urban Climate**, v. 23, p. 352–372, 2018.

OKE, T. R. Towards a more rational understanding of the urban heat island. **Climat. Bull.(McGill)**, v. 5, n. December, p. 1–20, 1969.

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

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. **Intenational Journal of Climatology**. v. 1, n. 3, p. 237-254, 1981

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

OKE, T. R. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.

OKE, T. R. **Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites. Instruments and Observing Methods Report no. 81.** [s.l: s.n.].

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633–1644, 2007.

PEZZUTO, C C, DE CARVALHO, M. F. H., MOTA, L. T. M. Diferentes enfoques para avaliação do microclima urbano. **Cadernos PROARQ**, v. 26, p. 54–69, 2016.

PEZZUTO, C. C. Avaliação do ambiente térmico nos espaços urbanos abertos. estudo de caso em campinas, sp. 2007.

PIRINGER, M.; GRIMMOND, C. S. B.; JOFFRE, S. Investigating the Surface Energy Budget in Urban Areas - Recent Advances and Future Needs INVESTIGATING THE SURFACE ENERGY BALANCE IN URBAN AREAS – RECENT ADVANCES AND FUTURE NEEDS. **Water, Air and Soil Pollution: Focus**, v. 2, n. May, p. 1–16, 2002.

RODRIGUES DA COSTA, E. **O campo térmico e a qualidade ambiental urbana em Chapecó / SC.** Tese (Doutorado em Geografia)—Presidente Prudente, SP, Brasil: Programa de Pós-Graduação em Geografia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Presidente Prudente, 2015.

SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. **Solar Energy**, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 2011.

SKARBIT, N. et al. Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the “local climate zones” of Szeged, Hungary. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. March, p. 582–596, 2017.

SOUZA, L. C. L.; RODRIGUES, D. S.; MENDES, J. F. G. Sky-view factors estimation using a 3D-gis extension. **Eighth International IBPSA Conference**, n. 2001, p. 1227–1234, 2003.

SOUZA, L. C. L. DE et al. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 155–167, 2010.

SOUZA, L. C. L. DE. Relações Entre Ilhas De Calor, Geometria Urbana E Consumo De Energia Elétrica. **Revista Fórum Patrimônio - Ambiente Construído e Patrimônio**

**Sustentável**, v. 4, n. 1, p. 16, 2010.

STEYN, D. G. The calculation of view factors from fisheye-lens photographs. **Atmos-Ocean**, v. 3, n. 18, p.245–258, 1980.

STEWART, I. D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 2, p. 200–217, 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012.

STEWART, I. D.; OKE, T. R.; KRAYENHOFF, E. S. Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 4, p. 1062–1080, 2014.

TSIN, P. K. et al. Microscale mobile monitoring of urban air temperature. **Urban Climate**, v. 18, p. 58–72, 2016.

UNGER, J.; LELOVICS, E.; GÁL, T. Local climate zone mapping using GIS methods in Szeged. **Hungarian Geographical Bulletin**, v. 63, n. 1, p. 29–41, 2014.

UNITED NATIONS. **World Urbanization Prospects**. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/>>. Acesso em: 1 jun. 2018.

WANG, Y.; AKBARI, H. Effect of Sky View Factor on Outdoor Temperature and Comfort in Montreal. **Environmental Engineering Science**, v. 31, n. 6, p. 272–287, 2014.

WHITE, M. et al. Cool City Design : Integrating Real-Time Urban Canyon Assessment into the Design Process for Chinese and Australian Cities. **Urban Planning**, v. 1, n. 3, p. 25–37, 2016.

WONG, P. P.-Y. et al. The impact of environmental and human factors on urban heat and microclimate variability. **Building and Environment**, v. 95, n. JANUARY, p. 199–208, 2016.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of observation**. 7th. ed. Geneva: WMO, 2008. v. I & II



XU, Y. et al. Urban morphology detection and computation for urban climate research. **Landscape and Urban Planning**, v. 167, n. February 2016, p. 212–224, 2017.

YAN, H. et al. Assessing the effects of landscape design parameters on intra-urban air temperature variability: The case of Beijing, China. **Building and Environment**, v. 76, p. 44–53, 2014.


YANG, X.; LI, Y. The impact of building density and building height heterogeneity on average urban albedo and street surface temperature. **Building and Environment**, v. 90, p. 146–156, 2015.

## APÊNDICE I



**Ponto de monitoramento: F\_02**  
**Localização:** Rua Alaíde Nascimento de Lemos, Jardim Proença  
**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.  
**UTB:** EU-29  
**Altitude:** 677 m  
**Altura de instalação do abrigo:** 4,0 m  
**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 26627581)

1:200.000

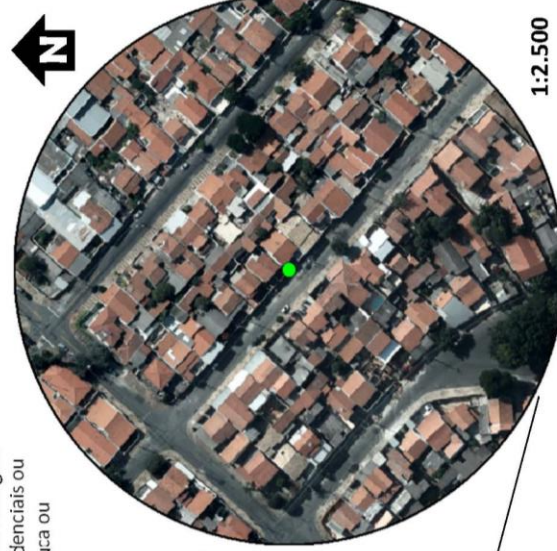



1:2.500

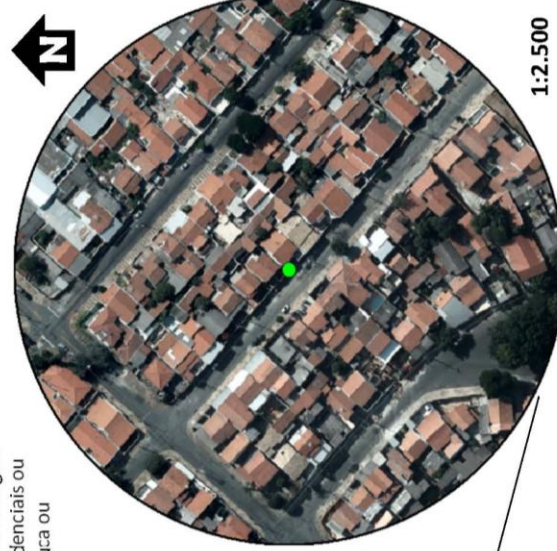



Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000



**Ponto de monitoramento: F\_01**  
**Localização:** Rua Francisco Bianchini, Vila Georgina  
**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.  
**UTB:** EU-32  
**Altitude:** 731 m  
**Altura de instalação do abrigo:** 4,0 m  
**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36685518)

1:200.000



1:2.500

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000



**Ponto de monitoramento:** F\_04

**Localização:** Rua Cel. Manuel de Moraes, Jardim Brasil

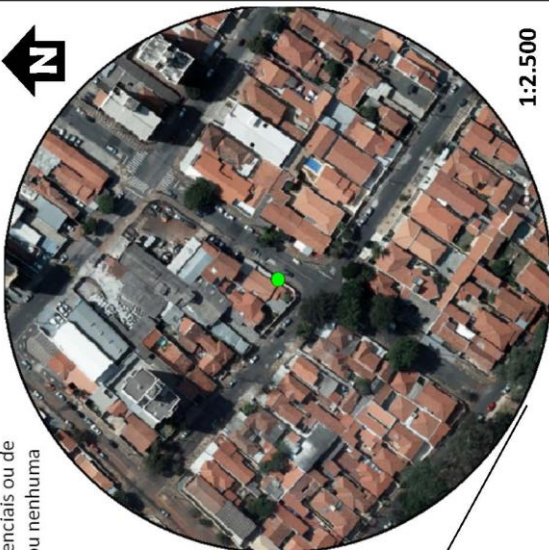
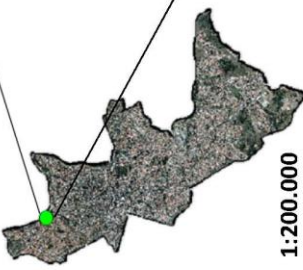


**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.

**UTB:** EU-29

**Altitude:** 675 m

**Altura de instalação do abrigo:** 3,5 m

**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36627168)

**Projeção/Datum:** UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000

**Ponto de monitoramento:** F\_03

**Localização:** Rua Boaventura do Amaral, Cambuí





**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.

**UTB:** EU-23

**Altitude:** 663 m

**Altura de instalação do abrigo:** 3,5 m

**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36623000)

**Projeção/Datum:** UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000



**Ponto de monitoramento:** F\_06

**Localização:** Rua Marechal Deodoro, Vila Itapura

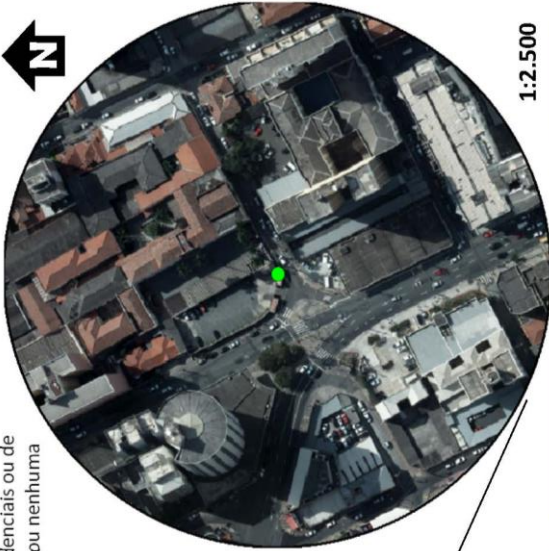



**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.

UTB: EU-29

**Altitude:** 664 m

**Altura de instalação do abrigo:** 3,0 m

**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36685429)

1:200.000

1:2.500

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000

**Ponto de monitoramento:** F\_05

**Localização:** Rua Dr. Miguel Penteado, Jardim Guanabara

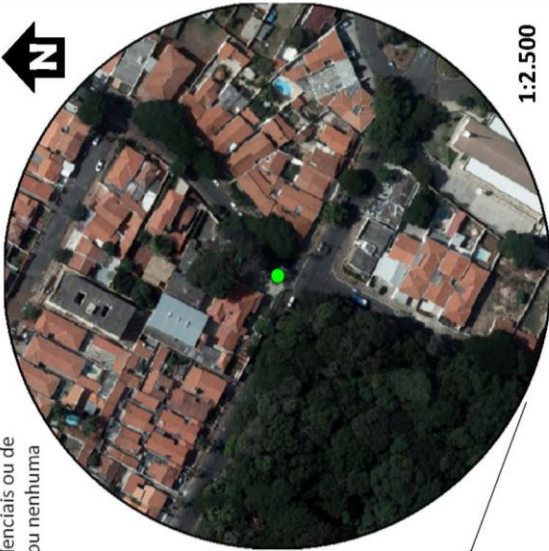
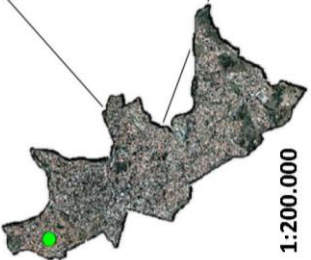


**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.

UTB: EU-29

**Altitude:** 715 m

**Altura de instalação do abrigo:** 3,0 m

**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36685440)

1:200.000

1:2.500

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000



**Ponto de monitoramento:** F\_08

**Localização:** Rua Avenida Brasil, Jardim Chapadão





**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.

UTB: EU-29

**Altitude:** 716 m

**Altura de instalação do abrigo:** 2,9 m

**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36627576)

1:200.000

1:2.500

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000

**Ponto de monitoramento:** F\_07

**Localização:** Rua Maria Monteiro, Cambuí

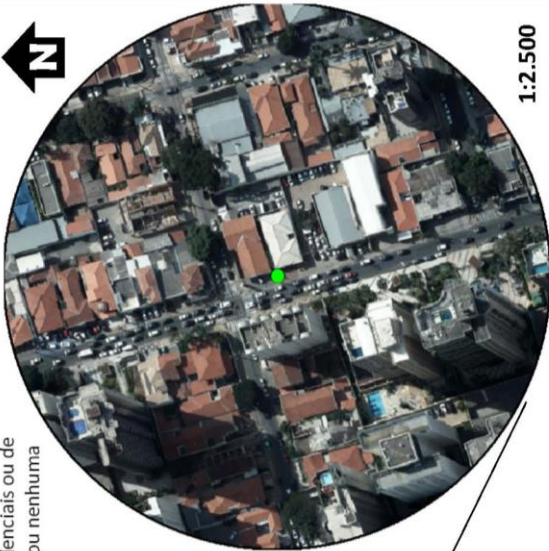



**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.

UTB: EU-29

**Altitude:** 669 m

**Altura de instalação do abrigo:** 3,5 m

**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 36686502)

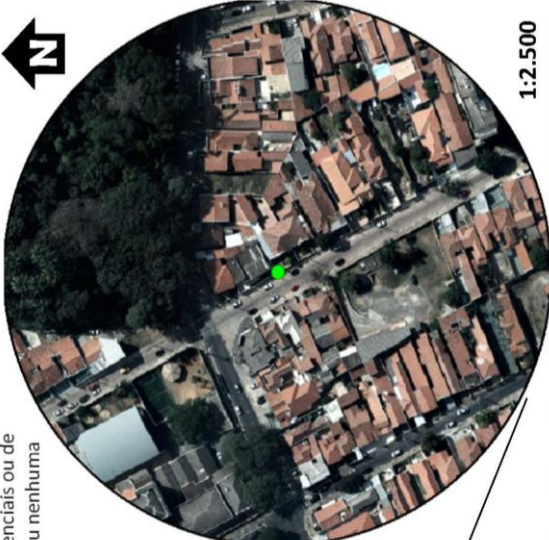



1:200.000

1:2.500

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000

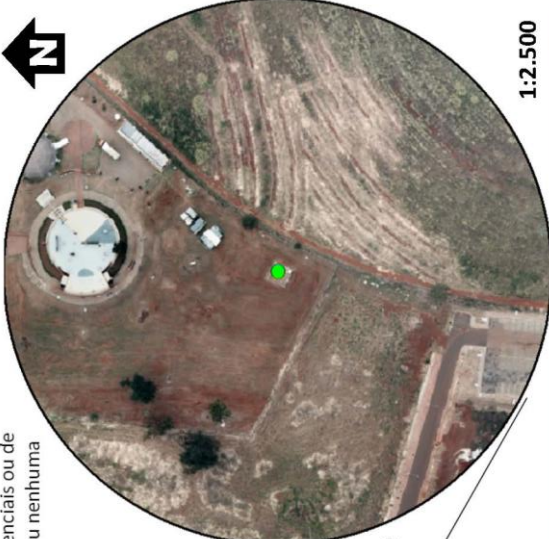
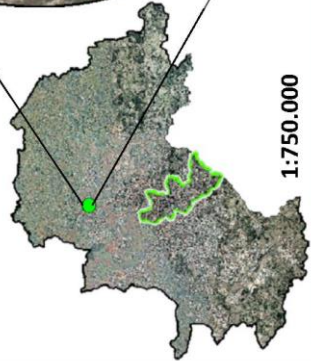

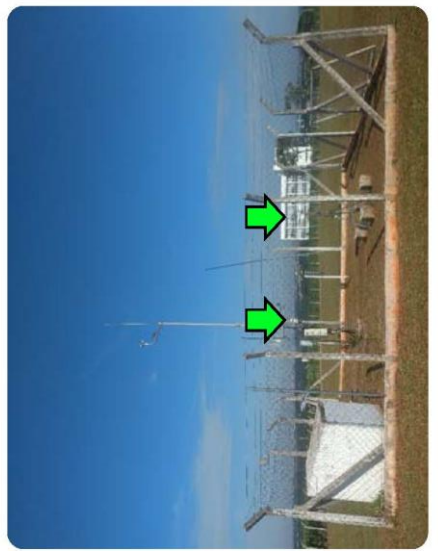


**Ponto de monitoramento:** F\_09  
**Localização:** Rua Padre Vieira, Bosque  
**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.  
**UTB:** EU-29  
**Altitude:** 689 m  
**Altura de instalação do abrigo:** 3,3 m  
**Eq. instalado:** Datalogger Testo 174-H (Nº 37203290)

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000

**Ponto de monitoramento:** Estação meteorológica CEPAGRI  
**Localização:** Avenida Alan Turing, Cidade Universitária  
**Descrição do entorno:** Edificações residenciais ou de serviços, com 1 a 2 pavimentos, pouca ou nenhuma arborização viária.  
**UTB:** EU-29  
**Altitude:** 655 m  
**Altura de instalação do abrigo:** 1,5 m  
**Eq. instalado:**

Projeção/Datum: UTM Zona 23 Sul / SIRGAS 2000