

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ADAPTAÇÃO DE UM MODELO SIMPLIFICADO PARA  
VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA  
URBANA NA FORMAÇÃO DE ILHA DE CALOR NOTURNA**

**CAMILA MAYUMI NAKATA OSAKI**

São Carlos

2016

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

**ADAPTAÇÃO DE UM MODELO SIMPLIFICADO PARA  
VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA  
URBANA NA FORMAÇÃO DE ILHA DE CALOR NOTURNA**

**CAMILA MAYUMI NAKATA OSAKI**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Léa Cristina Lucas de Souza

Coorientação: Prof. Dr. Daniel Souto Rodrigues

São Carlos

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da Biblioteca Comunitária UFSCar  
Processamento Técnico  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N163a Nakata Osaki, Camila Mayumi  
Adaptação de um modelo simplificado para  
verificação da influência da geometria urbana na  
formação de ilha de calor noturna / Camila Mayumi  
Nakata Osaki. -- São Carlos : UFSCar, 2016.  
130 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São  
Carlos, 2016.

1. Geometria urbana. 2. Ilha de calor urbana. 3.  
Simulação computacional. 4. SIG. I. Título.

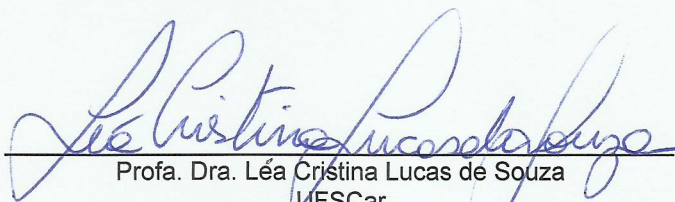


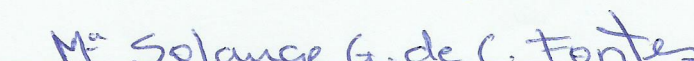
---

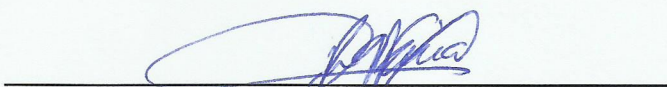
**Folha de Aprovação**

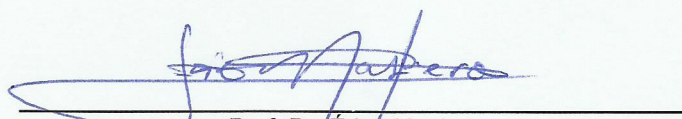
---

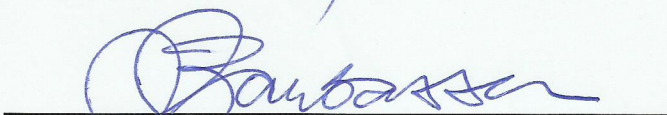
Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Tese de Doutorado da candidata Camila Mayumi Nakata Osaki, realizada em 19/01/2016:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Léa Cristina Lucas de Souza  
UFSCar

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Maria Solange Gurgel de Castro Fontes  
UNESP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. João Roberto Gomes de Faria  
UNESP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Érico Masiero  
PUCAMP

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ademir Paceli Barbassa  
UFSCar

## RESUMO

---

NAKATA-OSAKI, Camila Mayumi. Adaptação de um modelo simplificado para verificação da influência da geometria urbana na formação de ilha de calor noturna. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil. Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

---

A formação de ilha de calor noturna é um fenômeno de destaque em pesquisas de planejamento urbano e conforto térmico. Esse fenômeno é resultado da influência das características da urbanização, que alteram o balanço energético das cidades, e caracteriza-se pelo aumento da temperatura do ar, da periferia para o centro das cidades. A ilha de calor tem como uma das principais causas, a geometria urbana. Nesse contexto, o modelo proposto por Oke, em 1981, se tornou referência na área por sua importância em estudos de análise de relação entre a geometria urbana e a formação de ilhas de calor. Esta pesquisa tem como objetivo verificar o papel da geometria urbana na formação de ilhas de calor noturna, a partir da adaptação de um modelo simplificado para uma ferramenta de simulação computacional SIG (Sistema de Informação Geográfica). Os procedimentos metodológicos contam com as etapas de: estudo da base teórico-numérica, desenvolvimento de um algoritmo de cálculo e sua incorporação à plataforma SIG, monitoramento de dados para calibração (validação) e simulação. Os dados medidos para a validação da ferramenta demonstraram uma tendência crescente da ilha de calor com o aumento da relação H/W (altura/largura) do cânion, mas há comportamentos distintos para diferentes faixas de comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ). A ferramenta desenvolvida, *THIS (Tool for Heat Island Simulation)*, foi utilizada em simulação de diferentes cenários, que demonstrou que cânions urbanos de maior rugosidade resultam em valores de ilha de calor duas vezes menor em relação aos cânions de menor rugosidade, para um mesmo valor de relação H/W. O desenvolvimento da ferramenta *THIS* amplia as possibilidades de simulações para previsão de ilhas de calor para diferentes condições climáticas e sugere uma discussão mais aprofundada sobre a influência de diferentes configurações de geometria urbana na formação de ilhas de calor.

Palavras-chave: ilha de calor urbana, geometria urbana, simulação computacional, SIG.

## ABSTRACT

---

Nocturnal heat island formation is a prominent phenomenon in research of urban planning and thermal comfort. This phenomenon is the result of the influence of urbanization characteristics, which alter the energy balance of the cities, and is characterized by an increase in air temperature, from the periphery to the center of cities. The heat island has as a major cause, the urban geometry. In this context, the model proposed by Oke, in 1981, became a reference in the area because of its importance in analytical studies of relation between urban geometry and the formation of heat islands. This research aims to determine the role of urban geometry in the formation of nocturnal heat islands, from the adaptation of a simplified model for a computational simulation tool GIS (Geographic Information System). The methodological procedures have steps: study of theoretical and numerical base, developing a calculation algorithm and its incorporation into the GIS platform, data monitoring for calibration (validation) and simulation. The measured data for the tool validation demonstrated an increasing trend of heat island with increasing H/W ratio (height/width) canyon, but there are different behavior for different ranges of roughness length ( $Z_0$ ). The developed tool, THIS (Tool for Heat Island Simulation), was used in simulation of different scenarios, which showed that urban canyons of greater roughness result in heat island values twice lower compared to the canyons of lower roughness, for the same H/W ratio. The development of THIS tool expands the possibilities of simulations to forecast heat islands to different climatic conditions and suggests further discussion on the influence of different urban geometry settings in the formation of heat island.

Keywords: urban heat island, urban geometry, computational simulation, GIS.

## AGRADECIMENTOS

A autora agradece à FAPESP e à CAPES pelo apoio financeiro e à algumas pessoas que contribuíram ao longo do doutorado, de forma direta ou indireta, para as quais expresso a minha consideração.

À prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Léa Cristina Lucas de Souza, por sua dedicação e comprometimento na orientação desta tese de doutorado, pelo seu incentivo, e por suas palavras sempre sinceras e amigas.

Ao prof. Dr. Daniel Souto Rodrigues, pela sua colaboração nesta tese como coorientador, pela sua paciência e simpatia, e por me fazer sentir tão bem acolhida na Universidade do Minho durante os meses de estágio de doutorado em Braga, Portugal.

Ao Antônio Carlos Pepino e aos docentes do PPGEU, em especial à prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Eliane Viviani.

Aos colegas de laboratório da UFSCar, Érico Masiero, Juliano Souza Vasconcelos, André Bressa Donato Mendonça, Levi Henrique Silvestre Elisei, Elisângela Cristina Sorano Gonçalves, Mariene Benutti Giunta, Ary Rodrigues Alves Netto, Pedro Renan Debiazi, Marcia Thais Suriano, Adriano Miola Bernardo e Priscilla Souza Bond, pelo apoio prestado durante a realização dos levantamentos de dados, pelas trocas de conhecimentos e pela amizade.

Aos professores do departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, prof. Dr. Rui Ramos, prof. Dr. António Duarte, prof. Dr. Paulo Ribeiro e prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lúgia Silva, às secretárias Anabela Sampaio e Carla Oliveira, e aos estimados colegas do LabSIG, Carolina Neiva, Bruno Mendes e Fernando Fonseca, pela amizade e boas recordações.

Aos meus pais, Orlando e Yoshimi, e sogros Roberto (in memoriam) e Shiu, pelo apoio e carinho que me impulsionam a buscar sempre o melhor de mim.

Em especial, agradeço ao Maurício, pela compreensão e incentivo expressados ao longo de todos esses anos, mesmo nos momentos mais difíceis.

## **DEDICATÓRIA**

Ao Maurício, que com o seu apoio incondicional mantém a minha perseverança em sempre lutar pelos meus sonhos.



## LISTA DE FIGURA

Figura 2.1: Seção transversal generalizada de uma típica ilha de calor urbana. ....	23
Figura 2.2: Representação da atmosfera urbana em duas camadas térmicas. ....	25
Figura 2.3: Representação das causas possíveis da ICU. ....	28
Figura 2.4: Representação esquemática do ‘cânion urbano’ . ....	30
Figura 2.5: Perfil de via e relação H/W. ....	31
Figura 2.6: Exemplo de representação de FVC através de foto com lente olho-de-peixe ...	31
Figura 2.7: Temperatura do ar do cânion com a relação H/W simulado por UCM às 24h..	33
Figura 3.1: O modelo ‘urbano’ com sua base suporte de isolamento e proteção de polietileno. Um termopar é situado no piso no centro do canyon do modelo. ....	45
Figura 3.2: Relações H/W consideradas nos experimentos de Oke (1981). ....	46
Figura 3.3: Janela da área de trabalho do ArcMap do ArcGIS 10.2. ....	49
Figura 4.1: Fluxograma do método da pesquisa. ....	52
Figura 4.2: Sequência que resume os processos envolvidos na sub-rotina e justifica sua divisão em duas partes . ....	55
Figura 4.3: Exemplo de relação espacial ‘edifício-linhas de eixo’ . ....	56
Figura 4.4: Exemplo adotado para demonstrar as tabelas resultantes das relações espaciais . ....	57
Figura 4.5: Representação tridimensional das relações espaciais que envolvem linha, quadra e edifício; e apresentação das tabelas de atributos resultantes. ....	58
Figura 4.6: Esquema representativo das primeiras relações tabulares para o cálculo de geometria . ....	58
Figura 4.7: Associações espaciais do algoritmo para cálculo da relação H/W por eixo de quadra: (a) raio de proximidade a partir da linha de eixo de, por exemplo, 20m; (b) associação dos edifícios com a quadra; (c) associação da quadra ao eixo que a delimita. ..	59
Figura 4.8: Esquema representativo do resultado, de forma visual, da relação tabular que associa linha de eixo, edifícios e quadras (lado esquerdo em verde; lado direito em azul). ..	60

Figura 4.9: Ilustração tridimensional exemplificando os dados necessários para cálculo de $Z_0$ : alturas dos edifícios (H1...H9), áreas de fachadas (em amarelo), e áreas ocupadas (em laranja).....	61
Figura 4.10: Ordem das relações espaciais para a identificação pelo SIG da fachada voltada à rua.....	61
Figura 4.11: Exemplo ilustrando pontos de cada edifício associados ao eixo pelo raio de proximidade.....	62
Figura 4.12: Ilustração da tabela de resumo estatístico contendo somente os pontos de menor distância até o eixo de cada edifício ('Menor distância eixo-ponto').....	64
Figura 4.13: Fluxograma das relações entre as principais tabelas .....	66
Figura 4.14: Janela-formulário para inserção de dados de entrada na ferramenta THIS .....	68
Figura 4.15: Exemplo de tabela de dados de saída de simulação com a ferramenta THIS ..	69
Figura 4.16: Exemplos de mapas de saída de simulação com a ferramenta THIS no ArcMap .....	70
Figura 4.17: Exemplos de mapas de saída de simulação com a ferramenta THIS no ArcScene .....	70
Figura 4.18: Fluxograma da validação do algoritmo para os dados levantados nas áreas de estudo. ....	71
Figura 4.19: Localização das cidades de São José do Rio Preto e Bauru no estado de São Paulo.....	72
Figura 4.20: Áreas de estudo das quais foram selecionados os pontos de coleta de dados. 72	
Figura 4.21: Foto aérea da cidade de São José do Rio Preto.....	73
Figura 4.22: Pontos de estudo localizados na cidade de São José do Rio Preto .....	74
Figura 4.23: Foto aérea da cidade de São José do Rio Preto com a indicação da localização da Estação Meteorológica da CIIAGRO (área rural) e dos pontos de medição (área urbana). ....	75
Figura 4.24: Data-logger HOBO Pro v2 .....	75
Figura 4.25: Foto aérea da cidade de Bauru. ....	76
Figura 4.26: Pontos de estudo localizados na cidade de Bauru.....	77
Figura 4.27: Foto aérea da cidade de Bauru com a indicação da localização da Estação Meteorológica do IPMET (área rural) e dos pontos de medição (área urbana). ....	77
Figura 4.28: Data-logger HOBO H8 Pro Series .....	78

Figura 4.29: Representação da geometria dos 12 cenários hipotéticos simulados.....	79
Figura 5.1: Objetos de entrada para cálculo pela extensão THIS e destaque (em vermelho) das linhas de eixo que representam os pontos de medição no levantamento de dados na cidade de São José do Rio Preto .....	82
Figura 5.2: Objetos de entrada para cálculo pela extensão THIS e destaque (em vermelho) das linhas de eixo que representam os pontos de medição no levantamento de dados na cidade de Bauru .....	83
Figura 5.3: Intensidade máxima de ICU simulada pelo modelo de Oke e obtida em medição .....	84
Figura 5.4: Gráfico de comparação de dados reais e simulados pelo modelo de Oke, na faixa de $Z_0=0,39$ à $1,23$ , com linha de tendência, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e equação da regressão linear para dados de $Z_0 < 2,0$ . .....	85
Figura 5.5: Gráfico de comparação de dados reais e simulados pelo modelo de Oke, na faixa de $Z_0=2,39$ à $15,98$ , com linha de tendência, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e equação da regressão linear para dados de $Z_0 \geq 2,0$ . .....	86
Figura 5.6: Correlação de dados antes e depois da validação revelando o desempenho do modelo adaptado em relação ao modelo de Oke .....	88
Figura 5.7: Intensidade máxima de ICU simulada pelo modelo de Oke e pelo modelo adaptado, e obtida em medição.....	88
Figura 5.8: Gráfico dos resultados da simulação dos cenários urbanos.....	89
Figura 5.9: Relação entre a intensidade máxima da ilha de calor observada em levantamentos de campo e o fator de visão do céu de suas áreas. Os dados da América do Norte, Europa e Australasia são de Oke (1981). Os dados da Coreia e Japão são de Park (1987). E os dados do Brasil (cidades de São José do Rio Preto e Bauru) são provenientes desta tese.....	91
Figura 5.10: Exemplo de manipulação de dados de entrada para obtenção de mapa de resultados para um maior número de pontos pela ferramenta THIS. ....	95
Figura 5.11: Exemplo de mapa de interpolação de resultados de simulação com o THIS no ArcMap .....	96
Figura 5.12: Exemplo de mapa de interpolação de resultados de simulação com o THIS no ArcScene .....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Comprimentos de rugosidade ( $Z_0$ ) representativos de terrenos urbanizados...	34
Tabela 4.1: Exemplo de tabela '1. Proximidade edifício-eixo' .....	57
Tabela 4.2: Exemplo de tabela '2. Resultados da 1ª parte' .....	60
Tabela 4.3: Exemplo de tabela '3. Proximidade eixo-pontos' .....	62
Tabela 4.4: Exemplo de tabela '4. Menor distância eixo-ponto' .....	64
Tabela 4.5: Exemplo de tabela '5. Proximidade fachada-eixo' .....	65
Tabela 4.6: Exemplo de tabela '6. Resultados da 2ª parte' .....	65
Tabela 4.7: Determinação dos critérios para as simulações de cenários urbanos .....	79
Tabela 5.1: Dados de geometria urbana e ilha de calor dos pontos da cidade de São José do Rio Preto.....	82
Tabela 5.2: Dados de geometria urbana e ilha de calor dos pontos da cidade de Bauru .....	83
Tabela 5.3: Resultados da simulação dos cenários urbanos.....	89

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Sistema Clima Urbano. Articulação dos sistemas segundo os canais de percepção.....	21
Quadro 3.1: Potencialidades e limitações dos tipos de modelos em clima urbano. ....	42
Quadro 3.2: Potencialidades e limitações específicas de alguns modelos de clima urbano. ....	42
Quadro 3.3: Descrição das funções de algumas ferramentas disponíveis na janela <i>ArcToolbox</i> .....	49
Quadro 4.1: Exemplos de tipologias que caracterizam os cenários definidos para a simulação.....	80

## LISTA DE SÍMBOLOS

Grandeza	Símbolo	Unidade
Admitância térmica	$\mu$	$\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1/2}.\text{K}^{-1}$
Altura médias das edificações do entorno ( <i>height</i> )	H	m
Área	A	$\text{m}^2$
Área da face do lado do vento média	$A^*$	$\text{m}^2$
Área média ocupada por cada elemento	$A'$	$\text{m}^2$
Coeficiente empírico	A	
Comprimento de rugosidade	$Z_0$	
Densidade de fluxo radiativo líquido de ondas longas	$L^*$	$\text{W}/\text{m}^2$
Densidade do fluxo de calor de superfície devido às trocas líquidas de calor armazenado no solo subjacente	$\Delta Q_S$	$\text{W}/\text{m}^2$
Densidades de fluxo de calor sensível e latente devido a turbulência	$Q_H$ e $Q_E$	$\text{W}/\text{m}^2$
Densidades do fluxo de radiação de onda longa recebidas do 'céu' e emitidas pela superfície 'rural'	$L \downarrow$ e $L \uparrow$	$\text{W}/\text{m}^2$
Fator de visão da parede	$\psi_w$	
Fator de visão do céu	$\psi_s$	
Ilha de Calor Urbana	ICU	
Intensidade da ilha de calor	$\Delta T_{u-r}$	$^{\circ}\text{C}$
Intensidade máxima da ilha de calor	$\Delta T_{u-r(\text{max})}$	$^{\circ}\text{C}$
Largura da via ( <i>width</i> )	W	m
População	P	
Radiação líquida de onda longa para um ponto no chão de um cânion	$L_f^*$	$\text{W}/\text{m}^2$
Relação Altura/Largura	H/W	
Temperatura de superfície absoluta das paredes	$T_w$	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura de superfície absoluta do piso	$T_f$	$^{\circ}\text{C}$
Temperatura superficial total	$\Delta T$	$^{\circ}\text{C}$
Temperaturas de superfície absolutas correspondentes	$T_s$ e $T_r$	$^{\circ}\text{C}$
Tempo	t	min
<i>Urban Heat Island</i>	UHI	
Velocidade de vento regional no nível 10m	$\bar{u}$	m/s

## GLOSSÁRIO

**Absorção:** o processo no qual a energia radiante incidida é retida por uma substância.

**Add-in:** corresponde a um único arquivo que fornece recursos de extensão ao ArcGIS.

**Admitância térmica:** propriedade térmica da superfície que rege a facilidade com a qual irá obter ou liberar calor. É a raiz quadrada do produto da condutividade térmica e a capacidade térmica

**Albedo:** relação entre a quantidade de radiação solar refletida por um corpo para o montante incidido sobre ele

**Algoritmo:** descrição sequencial dos passos que devem ser executados, de forma lógica e clara, com a finalidade de facilitar a resolução de um problema

**Antropogênico:** são efeitos, processo, objetos ou materiais derivados de atividades humanas, em oposição a aqueles que ocorrem em ambientes naturais sem influência humana.

**ArcObjects:** é um ambiente de desenvolvimento da família de aplicações ArcGIS. ArcObjects é uma biblioteca de componentes COM que formam a base da plataforma do ArcGIS da ESRI.

**Calor latente:** calor liberado ou absorvido por unidade de massa por um sistema de mudança de fase.

**Calor sensível:** a energia de calor capaz de ser sentida (por exemplo, com um termômetro). Usado em contraste com o 'calor latente'.

**Camada limite:** termo geral utilizado para designar a camada de ar adjacente a uma superfície

**Cânion urbano:** utilizado em climatologia e em planejamento urbano, para designar a combinação geométrica de superfícies horizontais e verticais intraurbanas. Trata-se de uma analogia ao cânion natural. Os cânions urbanos contribuem para o efeito de ilha de calor.

**Capacidade térmica:** quantidade de calor absorvido (ou liberado) por unidade de volume de um sistema para um correspondente aumento de temperatura (ou queda) de 1 grau.

**Clima:** Conjunto de condições atmosféricas que caracterizam uma região ao longo do ano.

**Coefficiente de arrasto:** é um número adimensional que é usado para quantificar o arrasto ou resistência de um objeto em um meio fluido tal como o ar ou a água. Também é chamado de coeficiente de resistência aerodinâmica ou de coeficiente aerodinâmico.

**Condutividade térmica:** propriedade física de uma substância, descrevendo sua capacidade de conduzir o calor pelo movimento molecular.

**DLL:** *Dinamic-link library* (biblioteca de vínculo dinâmico), é a implementação feita pela Microsoft para o conceito de bibliotecas compartilhadas nos sistemas operacionais Microsoft Windows e OS/2. Os formatos de arquivos para DLL são os mesmos dos arquivos executáveis para Windows. Assim como os executáveis (EXE), as DLL podem conter códigos, dados, e recursos (ícones, fontes, cursores, entre outros) em qualquer combinação.

**.esriAddIn:** é um arquivo compactado que contém a definição de um add-in para o ArcGIS. Esse tipo de arquivo pode ser criado usando qualquer ambiente de desenvolvimento apoiado pelo kit de desenvolvimento ArcObjects da ESRI.

**Evaporação:** processo pelo qual um líquido é transformado em um gás, na atmosfera.

**Fator de visão da parede:** proporção da abóbada celeste obstruída pelas edificações.

**Fator de visão do céu:** relação entre a quantidade de céu visível de um determinado ponto em uma superfície, ou seja, a proporção do hemisfério do céu sobre uma superfície horizontal.

**Ilha de calor:** aumento de temperatura do ar da periferia para o centro das cidades devido a inúmeros fatores decorrentes da urbanização.

**Logaritmo natural (Ln):** logaritmo de base 'e', onde o 'e' é um número irracional igual a 2,718281828459045... chamado de número de Euler. É, portanto, a função inversa da função exponencial.

**Macro:** conjunto de comandos ou instruções programado e guardado para poder ser reproduzido na mesma sequência em qualquer momento.

**Meteorologia:** é a ciência que estuda a atmosfera terrestre. Seus aspectos mais tradicionais e conhecidos são a previsão do tempo e a climatologia.

**Microsoft Visual Studio:** é um pacote de programas da Microsoft para desenvolvimento de software especialmente dedicado ao .NET Framework e às linguagens Visual Basic (VB), C, C++, C# (C Sharp) e J# (J Sharp). As linguagens com maior frequência nessa plataforma são: VB.NET (Visual Basic.NET) e o C# (C Sharp).



**Ondas curtas:** radiação solar direta, difusa, ou refletida pelo solo e pelo entorno.

**Ondas longas:** radiação térmica emitida pelo solo aquecido, pelo céu, ou pelo edifício.

**Reutilização de código:** é o uso de software existente, ou conhecimento de software, para a construção de um novo software.

**SIG:** Sistema de Informação Geográfica.

**Stand-alone:** programa completamente autossuficiente, que para seu funcionamento não necessitam de um software auxiliar, como um interpretador, sob o qual terão de ser executados.

**Sub-rotina de cálculo:** em ciência da computação, mais especificamente no contexto da programação, uma sub-rotina (função, procedimento ou subprograma) consiste em uma porção de código, que resolve um problema muito específico, partindo de um problema maior (a aplicação final).

**Temperatura absoluta:** é a temperatura diretamente proporcional à quantidade de energia térmica em um sistema.

**Turbulência:** estado de fluxo de fluido, em que as velocidades instantâneas apresentam flutuações irregulares e aparentemente aleatórias. Essas flutuações são capazes de transportar propriedades atmosféricas (por exemplo, calor, vapor de água, impulso, etc.) em taxas muito superiores a processos moleculares.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	3
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	7
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	10
<b>LISTA DE QUADROS</b> .....	11
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	12
<b>GLOSSÁRIO</b> .....	13
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1. Objetivos.....	19
1.2. Hipótese.....	20
1.3. Estrutura da tese.....	20
<b>2. ILHA DE CALOR E GEOMETRIA URBANA</b> .....	21
2.1. Camadas atmosféricas.....	25
2.2. Causas e efeitos da ilha de calor.....	27
2.3. Geometria urbana.....	29
<b>3. MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE CLIMA URBANO</b> .....	37
3.1. Modelos numéricos.....	37
3.2. Modelos físicos.....	38
3.3. Modelos com base empírica.....	39
3.4. Comparação das potencialidades e limitações dos modelos.....	41
3.5. Modelo de Oke.....	44
3.6. Potencialidades do SIG para a inclusão de modelos.....	46

<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	51
4.1. Desenvolvimento da ferramenta.....	53
4.1.1. Operações para cálculo de ilha de calor pelo modelo de Oke.....	56
4.1.2. Operações para cálculo de ilha de calor pelo modelo adaptado.....	60
4.1.3. Interface com o usuário.....	67
4.2. Monitoramento de dados e calibração.....	70
4.2.1. Caracterização dos pontos de estudo e instrumentação.....	71
4.2.1.1. São José do Rio Preto.....	73
4.2.1.2. Bauru.....	76
4.3. Simulação.....	78
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	81
5.1. Desempenho do modelo de Oke.....	81
5.2. Desempenho do modelo adaptado.....	87
5.3. Influência da geometria urbana nas ilhas de calor.....	89
5.4. Discussões, contribuições e desdobramentos.....	90
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	97
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	100
<b>ANEXOS</b> .....	110
<b>APÊNDICE</b> .....	122

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento e a complexidade das cidades geram alterações climáticas, que impactam diretamente no ambiente pela influência no conforto térmico humano, no consumo energético e na qualidade do ar. Esses efeitos decorrentes do processo de urbanização na qualidade de vida urbana se apresentam de forma mais evidente nas cidades grandes e áreas metropolitanas, e intensificam preocupações com o ambiente urbano.

O estudo dos fenômenos decorrentes do processo de urbanização envolve o conhecimento dos diversos fatores e das interações que ocorrem no sistema chamado 'cidade'. Um dos efeitos mais evidentes da urbanização é a alteração no balanço energético, que promove o surgimento de microclimas intraurbanos. Os centros urbanos, devido às propriedades e arranjo de seus elementos, armazenam mais calor e tendem a apresentar temperaturas mais elevadas que as encontradas na periferia da cidade (ou área rural adjacente). Esse fenômeno é chamado de 'ilha de calor urbana' (ICU).

Devido à influência nas estimativas de aquecimento global, alguns autores (HAMDI, 2010; MENDONÇA e MONTEIRO, 2003), defendem ser importante saber em que extensão ocorre o crescimento das ICU com o aumento da urbanização. O tamanho da população, o aumento de fontes de calor e a geometria urbana são alguns dos vários fatores envolvidos no processo de urbanização.

O conhecimento dos efeitos da urbanização no aumento da temperatura do ar, na forma de ilha de calor, torna-se relevante em especial nas regiões tropicais de baixa latitude, em particular no Brasil, onde há evidente expansão urbana e um pequeno número de trabalhos desenvolvidos na área (BARBIRATO, 2010).

Dentre os fatores que influenciam a intensidade da ilha de calor, destaca-se a geometria urbana. Ela interfere nas trocas de radiação do espaço através dos fenômenos de reflexão, absorção e armazenamento térmico. Uma forma muito utilizada de designar a geometria de centros urbanos é o 'cânion urbano', que remete à combinação geométrica de superfícies horizontais e verticais intraurbanas. O cânion urbano é, geralmente, medido pela relação  $H/W$  (*height/width* do inglês, ou altura/largura), considerando a altura das edificações e a largura da via em relação a um ponto.

Nesse contexto, alguns dos estudos publicados mais relevantes são do pesquisador Timothy R. Oke. Esse pesquisador desenvolveu um modelo empírico simplificado de previsão de intensidade de ilhas de calor noturnas (OKE, 1981), baseando-se em levantamentos de campo e em experimentos com modelos físicos em escala reduzida. Nesse estudo, foi verificado que existe uma tendência de menor taxa de resfriamento do ambiente

urbano em relação ao rural, conforme aumenta a relação H/W do cânion. Esse modelo se tornou referência na área por sua importância em estudos de análise de relação entre a geometria urbana e a formação de ilhas de calor.

A adaptação do modelo de Oke em uma ferramenta computacional pode ampliar as possibilidades de análises e facilitar a aplicação do mesmo por diferentes pesquisadores. Dentre as ferramentas computacionais, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se destacam por possibilitar uma série de interações espaciais e numéricas de objetos geográficos, além de possuírem habilidade de armazenamento, busca e representação de dados tabulares, e possibilitar a incorporação de novas técnicas e métodos de planejamento territorial.

Considerando esses fatos, o programa ArcGIS apresenta potencial para o desenvolvimento dessa ferramenta. O ArcGIS se configura em um SIG que vem sendo continuamente atualizado, possuindo diversas ferramentas de representação e análise espacial. A versão ArcGIS 10 apresenta diversas vantagens e atualizações, principalmente para os desenvolvedores de software, pois possuem a possibilidade de incorporação de *add-ins* (complementos).

Associando a questão da ilha de calor urbana e as possibilidades de gerenciamento propiciadas por um SIG, objetivo desta tese é verificar a influência da geometria urbana na intensidade de ilhas de calor noturnas com uso de uma ferramenta computacional, desenvolvida como extensão de um SIG. Para isso foram adotadas etapas de: estudo da base teórico-numérica (modelo de Oke), desenvolvimento de um algoritmo de cálculo e sua incorporação à plataforma SIG, ajuste (validação) e simulação. O ajuste do algoritmo foi realizado com base em levantamento de dados reais, calibrando-se o modelo com os dados medidos.

## 1.1. Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é verificar o papel da geometria urbana na formação de ilhas de calor noturna, a partir da adaptação de um modelo simplificado.

Os objetivos específicos são:

- a) Estudar a interação 'geometria urbana x ilha de calor';
- b) Adaptar o modelo de Oke a uma linguagem mais contemporânea de simulação por computador;

- c) Elaborar uma sub-rotina de cálculo em um SIG, aproveitando as potencialidades de suas ferramentas de tratamento e gerenciamento de base de dados;

## **1.2. Hipótese**

O modelo proposto por Oke (1981) é reconhecido por sua relevância na área de estudo, sendo uma das pesquisas precursoras que analisam o fenômeno da influência das características da urbanização na alteração do balanço energético das cidades. Dessa forma, acredita-se na importância do modelo de Oke para o desenvolvimento de estudos climáticos, entretanto necessitando que ajustes nesse devam ser realizados, tanto para a interpretação e cálculo da geometria urbana (parâmetro de entrada principal da equação) em um ambiente SIG, quanto à sua adaptabilidade às condições climáticas de outras cidades que não sejam as que basearam seu desenvolvimento.

## **1.3. Estrutura da tese**

A tese encontra-se dividida em sete capítulos, conforme descritos a seguir.

O Capítulo 1 aborda de uma maneira geral as principais temáticas abordadas no trabalho todo, a justificativa e o objetivo desta pesquisa.

No Capítulo 2 são abordadas as questões relacionadas ao fenômeno da ilha de calor e de sua relação com a geometria urbana. No Capítulo 3 é realizado um embasamento teórico sobre modelos para simulação de clima urbano.

O Capítulo 4 traz a descrição dos materiais e métodos envolvidos na pesquisa, e está estruturada em três partes: desenvolvimento da ferramenta, monitoramento de dados para calibração do modelo e simulação.

O Capítulo 5 apresenta os resultados, discussões e contribuições da tese. E, por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 6.

## 2. ILHA DE CALOR E GEOMETRIA URBANA

O contínuo aumento da população em áreas urbanas impulsiona estudos de clima urbano por dois importantes motivos: para garantir um ambiente agradável e saudável para a população urbana; e para verificar os efeitos da urbanização no clima.

A cidade representa um organismo que interage com a atmosfera e, juntas, formam um sistema complexo, que envolve trocas de radiação através de reflexão, absorção e armazenamento térmico. Além disso, existem diversas outras variáveis (ventilação, umidade e propriedades dos materiais) que participam desse sistema. Todos esses mecanismos agem simultaneamente e ininterruptamente, podendo ser analisados de forma separada, para facilitar o seu estudo.

Esse sistema complexo é chamado ‘clima urbano’, termo que inclui o estudo de processos meteorológicos, fenômenos atmosféricos, relacionando-os a áreas que sofreram desenvolvimento urbano. Trata-se simplesmente de um termo que resume a expressão ‘meteorologia e climatologia urbanas’ (OKE, 2006).

Para auxiliar a compreensão da complexa organização do sistema do clima urbano, Mendonça e Monteiro (2003) fizeram uma divisão em três canais de percepção, o do conforto térmico, o da qualidade do ar e o de impacto meteórico (Quadro 2.1).

Quadro 2.1: Sistema Clima Urbano. Articulação dos sistemas segundo os canais de percepção.

<b>Subsistemas</b> Canais Caracterização	<b>I</b> <b>Termodinâmico</b> Conforto Térmico	<b>II</b> <b>Físico-Químico</b> Qualidade do ar	<b>III</b> <b>Hidrometeórico</b> Impacto meteórico
Fonte	Atmosfera Radiação circulação horizontal	Atividade urbana Veículos auto-motores Indústrias obras- Limpas	Atmosfera estados especiais (desvios rítmicos)
Trânsito no Sistema	Intercâmbio de operador e operando	De operando ao operador	De operador ao operando
Mecanismo de ação	Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção	Interação Núcleo Ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento	Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódio (eventual)
Observação	Meteorológica espacial (T. de campo)	Sanitária e meteorológica espacial	Meteorológica hidrológica (T. de campo)
Correlações disciplinares tecnológicas	Bioclimatologia Arquitetura Urbanismo	Engenharia Sanitária	Engenharia sanitária e infraestrutura urbana

Produtos	“Ilha de Calor” Ventilação Aumento de precipitação	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos diretos	Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários, doenças respiratórias, oftalmológicas, etc.	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa	Controle do uso do solo Tecnologia de conforto habitacional	Vigilância e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infra-estrutura urbana e regularização fluvial. Uso do solo
Responsabilidade	Natureza e Homem	Homem	Natureza

Fonte: Mendonça e Monteiro (2003)

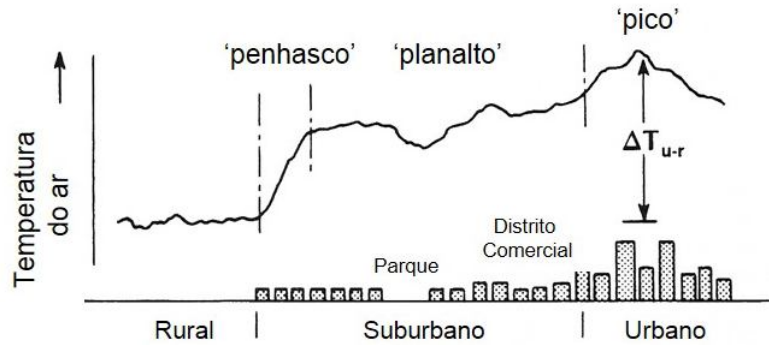
A capacidade das cidades em alterar o clima local foi inicialmente identificada por Luke Howard, em 1833, em seus estudos para a cidade de Londres (HOWARD, 1833). Ao longo do tempo, vários estudos identificaram estas alterações, que implicavam no fenômeno conhecido como ‘ilha de calor urbana’ – ICU (ou UHI, em inglês *Urban Heat Island*).

Esse fenômeno é definido pelo aumento de temperatura nos centros adensados das cidades em relação à área rural adjacente. As temperaturas do ar e superfícies em áreas urbanas tendem a ser mais elevadas do que em áreas rurais circundantes, devido às suas propriedades, caracterizando a formação de ilha de calor. Segundo Oke (1981) as maiores intensidades de ilha de calor verificadas ocorrem algumas horas após o pôr do sol.

Oke (1987) demonstra a analogia morfológica desse fenômeno com uma ilha (Figura 2.1), uma vez que o calor relativo da cidade se projeta distintamente do entorno circundante. Nela, a área do ‘penhasco’ pode ter um gradiente horizontal tão grande como 4°C/km. A maior parte da área urbana é designada como um ‘planalto’ de ar quente de gradiente horizontal constante, podendo ter sua uniformidade interrompida, tanto pela influência de áreas mais frias (parques, lagos e áreas abertas) quanto áreas mais quentes (áreas comerciais, industriais ou densamente edificadas). Em algumas cidades, o núcleo urbano pode ter o ‘pico’ da ilha de calor, onde é encontrada a temperatura máxima urbana, cujo valor, quando subtraído da temperatura no meio rural, define a ‘intensidade da ilha de calor urbana’ ( $\Delta T_{u-r}$ ).



Figura 2.1: Seção transversal generalizada de uma típica ilha de calor urbana.



Fonte: adaptado de OKE, 1976a, apud OKE, 1987, p. 288.

A esse respeito, alguns dos principais estudos publicados são de autoria do pesquisador Timmothy R. Oke nas décadas de 70 e 80. Oke (1982) trata a cidade como um sistema termodinâmico fechado que pode ser avaliado a partir de cálculo de balanço energético. A Eq. 2.1 ilustra a relação entre o fluxo de energia e o clima.

$$\text{Entrada de energia} = \text{Saída de energia} + \text{Mudança de armazenamento de energia} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Considerando que existem quatro formas de energia diferentes na atmosfera (radiante, térmica, cinética e potencial), a combinação das formas de energia de saída não precisa ser necessariamente a mesma como era na entrada.

Para analisar o impacto causado pela urbanização, seria ideal que um conjunto de medições 'pré-urbanas' fosse comparado com medições do presente. No entanto, devido à dificuldade em se conseguir isso, costuma-se realizar uma análise comparativa entre medições realizadas no centro de áreas urbanas e medições realizadas em área rural, como forma de prever as alterações causadas pelas modificações urbanas. Ilhas de calor são formadas em áreas urbanas e suburbanas, porque muitos materiais de construção comuns absorvem e retêm mais calor do sol do que materiais naturais em áreas rurais menos urbanizadas.

As cidades e áreas urbanas modificam o clima de forma a criarem diversos microclimas urbanos. Isso acontece devido a um número de fatores complexos, como a perda de resfriamento das superfícies de vegetação, o aumento de atividade antropogênica e o armazenamento de calor em ambientes construídos urbanos, assim como o efeito do cânion (LEVERMORE e CHEUNG, 2012).

Diversos são os estudos brasileiros atuais sobre impacto da urbanização no microclima das cidades, sendo alguns deles: Brandão e Alucci (2011) e Duarte e Serra (2003), que analisaram a forma de ocupação urbana e sua relação com a ambiência térmica; Gonçalves *et al.* (2011), Krüger (2008) e Souza (2010), que analisaram o desempenho ambiental da forma urbana.

O aumento das temperaturas nos centros urbanos é, geralmente, associado ao aumento da porcentagem de edificação e diminuição da porcentagem de vegetação (FONTES e MATTOS, 1999), sendo muitas vezes sugerido que ocorra um equilíbrio entre a maior densidade construída com os elementos naturais, como o aumento também da proporção de corpos d'água e de vegetação (DUARTE e SERRA, 2003).

A orientação das vias, uma das características da geometria urbana, também influencia na formação de ilhas de calor e de frescor, podendo representar uma diferença de cerca de 40% no consumo energético médio mensal em uma área residencial (SOUZA, 2010). Em condições de clima desértico, por exemplo, para regiões destinadas a prédios baixos, mais espaçados, recomenda-se a adoção de ruas cujos eixos seguem o alinhamento leste-oeste, pois nestas o impacto do adensamento é baixo no período de verão e, no inverno, não haverá impedimento a ganhos solares diretos; e para áreas destinadas a prédios de pavimentos, mais adensadas, ruas com orientação de eixo norte-sul são mais recomendáveis (KRÜGER, 2008).

Nesses estudos, que estabelecem relações entre as condições climatológicas e os parâmetros de ocupação, aconselha-se a seleção de áreas de estudo com características de ocupação diversas, aumentando-se a base de dados para o cálculo das equações de regressões e expandindo-se, assim, a capacidade de generalização e previsão de modelos (BRANDÃO e ALUCCI, 2011).

Os progressos na abordagem descritiva permitiram estabelecer relações entre o clima e as variáveis do ambiente urbano em várias cidades, porém a maior parte desses estudos é empírica. Poucos começaram a lidar com o conceito de balanço de energia através de modelos numéricos ou computacionais (ASSIS, 2006).

Segundo Barbirato (2010), as cidades são uma das poucas superfícies que permanecem sem análise satisfatória de balanço de energia, devido ao grande número de fenômenos envolvidos em cada termo da equação do balanço e à dificuldade de sua precisa quantificação.

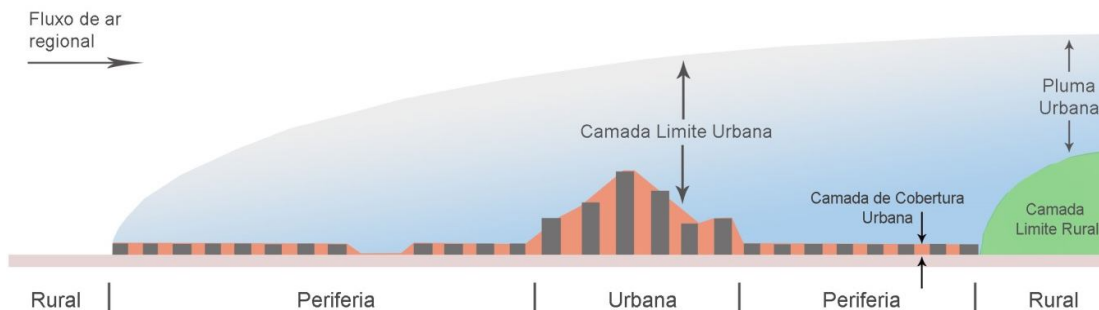
## 2.1. Camadas atmosféricas

Em todo estudo que aborda as interações do clima urbano, é imprescindível o conhecimento das escalas de abordagem (ou camadas atmosféricas). Torna-se, por isso, necessária uma visão geográfica e meteorológica dessas escalas, para a compreensão da extensão do efeito da urbanização no clima.

Alguns autores, como Mendonça e Monteiro (2003), Stull (1988) e Oke (1987), apresentam diferentes classificações para as camadas atmosféricas. Dentre essas, e pelo objetivo desta tese, destaca-se aquela proposta pelo último citado, que divide a atmosfera em quatro escalas: microescala, escala local, mesoescala e macroescala. A microescala é definida pelas dimensões dos elementos individuais, a escala local inclui efeitos climáticos de características da paisagem (exemplo: clima do bairro) e a mesoescala representa o clima na escala de toda a cidade (OKE, 2004).

Além dessa, existe uma outra divisão da atmosfera em duas camadas térmicas: a camada de cobertura urbana (ou camada intraurbana) e a camada limite urbana. A primeira corresponde ao conceito de microclima, determinado pelas superfícies da estrutura urbana, abrangendo desde o solo até, aproximadamente, o nível das coberturas das edificações. A segunda equivale à escala mesoclimática e situa-se imediatamente acima da camada intraurbana e, por isso, recebe toda sua influência térmica (Figura 2.2).

Figura 2.2: Representação da atmosfera urbana em duas camadas térmicas.



Fonte: adaptado de Oke (1976b).

A camada limite urbana é desenvolvida no encontro dos fluxos de ar do campo com a cidade, caracterizando-se no local para fenômenos de mesoescala regidas pela natureza da superfície urbana geral. Abaixo do nível do telhado, localiza-se a camada intraurbana, produzida por processos de microescala nas ruas (cânions) entre os edifícios.

Mirzaei e Haghghat (2010) defendem que, devido às complexidades no fornecimento de um banco de dados abrangente para uma cidade e também devido à fraqueza das teorias existentes em descrever o fenômeno correspondente para cada escala, um número de hipóteses simplificadoras são feitas no desenvolvimento das abordagens existentes. Isso é visto como a principal causa das discrepâncias nos resultados de estudos de ICU. A sugestão desses autores em diminuir tais discrepâncias é enfatizar os termos significativos na equação de balanço de energia urbana (Eq. 2.2), baseado na escala de estudo. Exemplificando, reações atmosféricas (exemplo: força Coriolis) são importantes em estudos de mesoescala, mas negligenciáveis nos problemas de microescala; o calor antropogênico do corpo humano é um importante parâmetro em estudos de microescala, mas poderia ser um parâmetro insignificante nos estudos de mesoescala.

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Onde:

$Q^*$  é a radiação líquida;

$Q_H$  e  $Q_E$  são os fluxos de calor sensível e latente, respectivamente;

$Q_F$  representa a liberação de calor antropogênico dentro do volume de controle;

$\Delta Q_A$  é a advecção líquida através das laterais do volume de controle;

$\Delta Q_S$  é o armazenamento de fluxo de calor e representa todos os mecanismos de armazenamento de energia dentro de elementos do volume de controle, incluindo o ar, árvores, tecidos de construção e solo.

Masiero e Souza (2014) chamam a atenção para a importância da investigação do grau de estabilidade atmosférica para a detecção de microclimas urbanos e estabelecimento de períodos mais representativos do clima urbano. Naquele estudo foi constatado que a diferença entre o comportamento de temperatura em diferentes pontos de monitoramento em uma cidade foi menor que 2°C e, sob condições atmosféricas estáveis, a diferença foi maior e evidenciou a influência das características ambientais no clima urbano.

Os estudos em climatologia urbana envolvem diversos parâmetros que são difíceis de serem analisados de forma separada. Nos estudos em que a geometria urbana é o parâmetro a ser isolado, esses dependem de uma análise mais criteriosa dos dados climáticos. Os dados selecionados para cálculo de intensidade de ilha de calor devem pertencer a dias

estáveis de pouco vento e condições de céu claro, pois a ocorrência de chuva, ou o aumento da umidade no ar, influenciam na amplitude térmica.

Além disso, os movimentos das massas de ar devem ser analisados, através de imagens de satélite, identificando-se o período adequado para a seleção e análise dos dados climáticos. É durante os períodos mais quentes, secos e estáveis que os efeitos do clima urbano podem ser sentidos (GARTLAND, 2010; OKE, 1987; WEBER e KUTTLER, 2007). Os períodos que oferecem as melhores condições para as medições ocorrem no prenúncio e na fase de tropicalização da massa de ar (MASIERO, 2014).

O período de prenúncio (primeiro período da fase Pré-frontal, quando ocorre a aproximação de uma massa de ar proveniente da região polar) apresenta nuvens altas, aumento de temperatura, diminuição da umidade relativa do ar e diminuição da pressão atmosférica. A fase de tropicalização (último período da fase Pós-frontal, quando essa massa de ar se torna predominante na região) caracteriza um período em que a massa de ar polar perde gradualmente sua intensidade, a temperatura se eleva e, por fim, a massa de ar adquire características climáticas locais.

## **2.2. Causas e efeitos da ilha de calor**

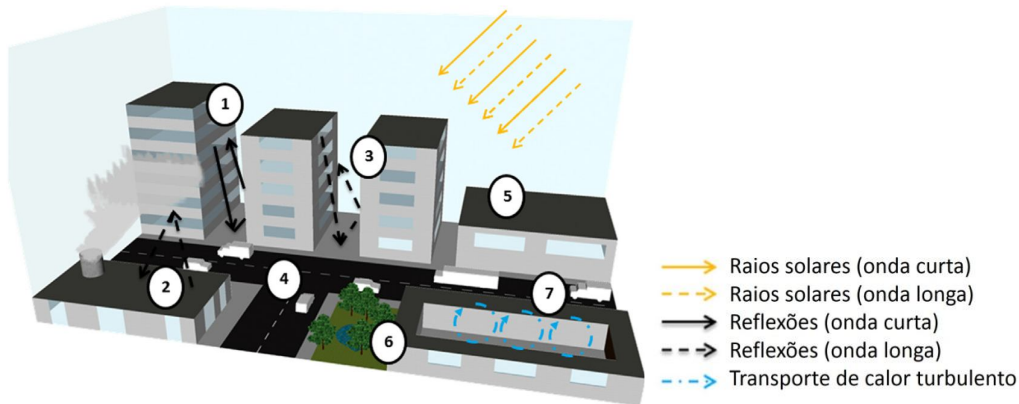
Oke (1981) listou as características da urbanização que levam a alterações de trocas de energia e condições térmicas:

- Poluição do ar: aumenta a radiação de ondas-longas emitidas pela atmosfera, devido a maior absorção da radiação de ondas-curtas que chegam e saída de ondas-longas pelos poluentes;
- Calor antropogênico: calor liberado no processo de combustão;
- Superfícies ‘impermeáveis’: diminuição do fluxo de calor latente, favorecendo, assim, o calor sensível;
- Propriedades térmicas dos materiais: o aumento da admitância térmica da superfície e materiais favorecem à absorção diurna e emissão do calor armazenado no período noturno.
- Geometria da superfície: aumento de absorção de ondas curtas devido à interceptação dentro dos cânions; diminuição da perda de calor pela turbulência devido à estagnação em cânions profundos; diminuição da perda de radiação de ondas longas de cânions, devido à redução do fator de visão do céu.

Em outras palavras, as possíveis causas da ICU podem ser assim enumeradas (e representadas na Figura 2.3):

1. Aumento de ganho de radiação de ondas curtas;
2. Aumento de ganho de radiação de onda longa do céu;
3. Diminuição da perda de radiação de onda longa;
4. Fontes de calor antropogênicas dentro de áreas urbanas;
5. Armazenamento de calor aumentado;
6. Menor evapotranspiração;
7. Diminuição do transporte de calor turbulento.

Figura 2.3: Representação das causas possíveis da ICU.



Fonte: adaptado de Toparlak et al. (2014).

Existem diversas outras razões que contribuem para a formação do fenômeno das ilhas de calor, como o calor urbano gerado a partir do aquecimento, arrefecimento, transporte e processos industriais. Os edifícios também diminuem a velocidade média dos ventos, o que atrasa a transferência do calor das superfícies para o ar. A poluição do ar urbano é outro fator de influência, pois as partículas no ar absorvem e emitem calor para as superfícies da cidade. E a falta de vegetação e a utilização difundida de superfícies impermeáveis reduzem a evaporação, contribuindo também para a formação de ilhas de calor.

Apesar dos efeitos da ilha de calor poderem oferecer benefícios em algumas cidades mais frias, geralmente no verão são vistos como um problema. Além do desconforto causado nas pessoas, podem contribuir também para problemas de saúde, maior consumo energético e aumento de poluição.

A ICU tem um impacto significativo no consumo de energia das edificações e qualidade do ar exterior. No entanto, apesar das várias abordagens propostas para entender

as causas da formação da ICU e para encontrar estratégias de mitigação correspondentes, incluindo observações e técnicas de simulações, as causas da ICU não são as mesmas em diferentes climas ou características da cidade. Assim, uma conclusão geral não pode ser feita com base em dados de monitoramento limitados (MIRZAEI e HAGHIGHAT, 2010).

Arnfield (2003) resumiu as várias observações gerais realizadas nos últimos anos em estudos de ilha de calor no âmbito geográfico: a intensidade da ICU decresce com o aumento da velocidade dos ventos e da nebulosidade, e tende a aumentar com o aumento do tamanho da cidade e população, sendo que sua intensidade é maior à noite.

No entanto, as conclusões acima apresentadas não são unânimes em todos os estudos encontrados na área. Faz-se importante, dessa forma, um maior aprofundamento nos estudos que relacionam a intensidade das ICU com suas causas, de forma a mitigar seus efeitos negativos no ambiente urbano.

### **2.3. Geometria urbana**

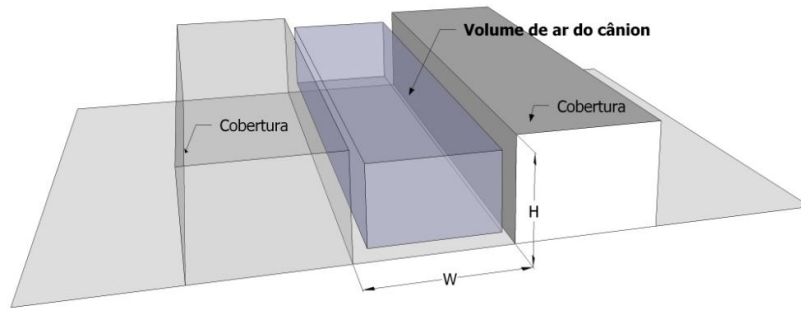
Em estudos de microescala, a geometria de espaços abertos pode ser o parâmetro mais relevante responsável pela variação do microclima (OKE, 1988; ALI-TOUDERT e MAYER, 2006; BOURBIA e BOUCHERIBA, 2010).

A geometria urbana é um dos fatores geralmente relacionado com a formação de ilhas de calor urbanas. Sua variação nos ambientes urbanos pode influenciar no aumento ou diminuição de valores de temperatura do ar em relação à dados medidos nos arredores da cidade, na velocidade e direção dos ventos, na forma de recebimento de radiação por ondas curtas e liberação de calor através de ondas longas.

Na escala de estudo da camada intraurbana é encontrada uma considerável complexidade, devido às diversas formas de arranjo de superfícies. Para caracterizar esses arranjos, pode ser adotada uma unidade de superfícies ativas, o cânion urbano, que é constituído por paredes e chão (normalmente uma rua) entre dois edifícios adjacentes. Este arranjo reconhece a natureza tridimensional da cobertura urbana e permite a interação entre edifícios, ao invés de tratá-los como objetos isolados.

O termo ‘cânion urbano’, conforme mencionado anteriormente, caracteriza o conjunto de ruas que cortam blocos densos de edificações, especialmente arranha-céus, assemelhando-se ao cânion natural (Figura 2.4).

Figura 2.4: Representação esquemática do ‘cânion urbano’.



Fonte: adaptado de Nunez e Oke (1977).

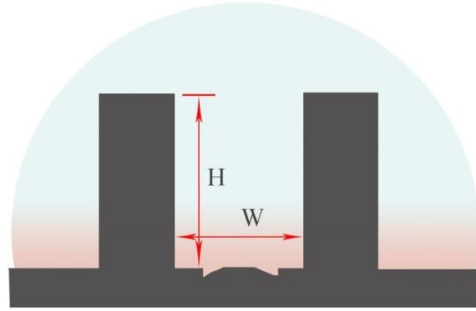
Em uma cidade, existem ruas de diferentes orientações e geometrias, acarretando em cânions de diferentes microclimas, como resultado das diferenças no ângulo de incidência solar e de recebimento do vento. Os estudos que investigam os efeitos térmicos das diferentes configurações urbanas nos centros das cidades, geralmente, realizam levantamentos de dados climáticos, e uso de modelos numéricos e ferramentas computacionais para simulações. Ao se utilizar a geometria urbana como parâmetro de entrada, é preciso fazer a escolha de um método de cálculo.

Para representar a geometria urbana, as formas mais comumente utilizadas são a relação entre a altura das edificações e a largura da via (relação  $H/W$ , do inglês *height/width*) e do fator de visão do céu (FVC, ou SVF – *Sky View Factor*). A relação  $H/W$  pode variar desde o valor 0 (zero), caracterizando um ambiente rural, até valores mais altos que podem caracterizar bairros de baixa densidade (0,25, 0,5) ou alta densidade (1, 2, 3, ...). O FVC varia de valores próximos ao 0 (zero), que representam pontos com grandes áreas de obstrução do céu, até 1,00, que representa o ambiente rural.

Teoricamente, quanto maior for a relação  $H/W$  do recinto urbano considerado (Figuras 2.4 e 2.5), menor é a área de céu visível e de dissipação da radiação de ondas longas, reduzindo, assim, a taxa de resfriamento das áreas urbanas, através da redução do transporte turbulento, devido ao abrigo do vento e da quantidade de calor antropogênico liberado (OKE, 1987).



Figura 2.5: Perfil de via e relação H/W.

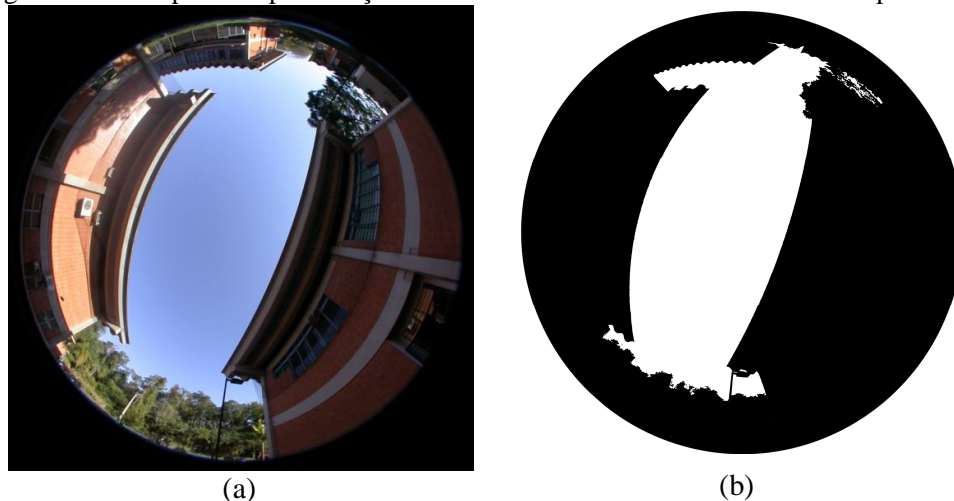


A relação H/W foi utilizada por Oliveira Panão, Gonçalves e Ferrão (2009) para analisar a condutância térmica do cânion, que quantifica o calor emitido para fora da rua, e para melhorar a compreensão dessa integração. Trata-se de um parâmetro prático e aplicável ao planejamento urbano.

A associação da geometria urbana com a formação de ilhas de calor também se baseia no Fator de Visão do Céu (FVC), que consiste em uma unidade que considera a contribuição do papel da abóbada celeste no balanço da energia. Trata-se de uma relação geométrica, que indica a proporção da área de céu visível disponível na troca de calor entre o meio urbano e o espaço.

Uma das formas utilizadas para o cálculo de FVC é através de fotografia realizada com lente olho-de-peixe (Figura 2.6), que demonstra a projeção da abóbada celeste com base em um ponto. Com base nessa fotografia (Figura 2.6a), pode-se utilizar um filtro de imagem (Figura 2.6b) de forma a delimitar a área do céu visível da área obstruída pelas edificações, vegetação e outros elementos urbanos.

Figura 2.6: Exemplo de representação de FVC através de foto com lente olho-de-peixe



Considerando a geometria urbana, Souza, Rodrigues e Mendes (2003) desenvolveram uma sub-rotina para cálculo, visualização e quantificação do FVC. Foi criado um algoritmo denominado 3DSkyView, que é uma sub-rotina de cálculo desenvolvida na plataforma ArcViewGIS 3.2.

A própria forma urbana se encarrega de aprisionar a radiação de onda curta e se comportar como um obstáculo para a saída de radiação de onda longa. A radiação de onda curta incidente, sendo refletida (difusa) pelo seu encontro com algumas superfícies antes de sua saída para a atmosfera, aumenta a chance de absorção e diminui, portanto, o albedo. Pelo fato do FVC ser reduzido, a emissão de radiação de onda longa é dificultada.

Segundo Faria e Mendes (2004), a maior presença de edifícios e a ausência quase total de cobertura vegetal em uma área urbana fazem com que as trocas de calor determinantes sejam secas, aumentando a dependência da temperatura com a geometria local. Entretanto, em áreas com cobertura vegetal significativa, a influência das trocas de calor latente reduz a correlação da temperatura do ar em relação à geometria.

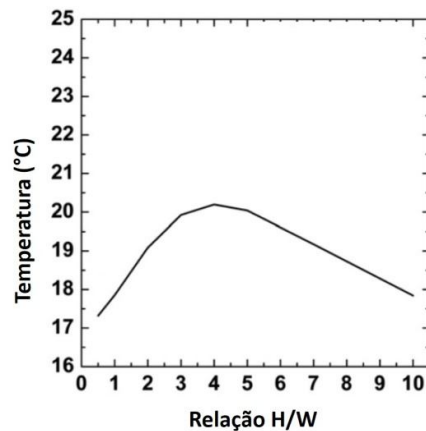
Bourbia e Boucheriba (2010) analisaram e compararam a influência da variação do cânion urbano no microclima. Aquele estudo realizou medições em sete pontos durante período de 24h no centro da cidade de Constantina (Argélia), caracterizada por ser uma estrutura urbana muito densa, de clima semiárido, localizada sob as coordenadas 36,17°N e 07,23°L. Uma comparação entre pontos medidos indicou, naquele estudo, que o ponto de maior relação H/W e menor FVC apresentou ambiente mais fresco. Os mesmos autores constataram que a variação no comportamento térmico das ruas medidas pode estar relacionada ao efeito da geometria, que cria uma certa falta de simetria em relação à exposição solar do cânion urbano durante o dia. Proteger as superfícies da radiação solar é uma das mais importantes estratégias para a redução da carga de calor em um clima quente e seco.

Segundo Memon, Leung e Liu (2010) e Marciotto, Oliveira e Hanna (2010), a relação H/W impacta na temperatura do ar e de superfície e, conseqüentemente, no fluxo de energia dos cânions urbanos. Memon, Leung e Liu (2010) encontraram uma correlação positiva para o aquecimento de superfícies no período noturno, mas uma correlação ligeiramente negativa para aquecimento direto de superfícies no período diurno.

A diferença de temperatura no cânion ocasionada pela variação na relação H/W foi verificada por Marciotto, Oliveira e Hanna (2010) com uso do Modelo de Cobertura Urbano (UCM – *Urban Canopy Model*), o qual foi calibrado usando observações de radiação solar

global e difusa, radiação de ondas longas e temperatura do ar da cidade de São Paulo, Brasil. Usando o UCM, aqueles autores verificaram uma mudança de tendência de temperatura do ar em relação ao aumento do H/W do cânion. Durante a noite (às 24h), a variação de temperatura com H/W (faixa analisada de 0 à 10) indica um efeito de aquecimento para  $H/W < 4$  com o aumento de H/W, devido à interceptação da saída de radiação de onda longa decorrente da altura dos edifícios. No entanto, para  $H/W > 4$ , há um resfriamento, conforme aumenta o H/W (Figura 2.7). Apesar dessa análise considerar apenas a temperatura do ar, ao invés da intensidade máxima de ilha de calor, é possível considerar que a partir de  $H/W = 4$ , o aumento de H/W pode contribuir para a diminuição da intensidade da ilha de calor. Entretanto, os próprios autores assumem que a maior parte dos maiores valores de H/W considerados ocorrem muito raramente nos centros das grandes cidades.

Figura 2.7: Temperatura do ar do cânion com a relação H/W simulado por UCM às 24h.



Fonte: adaptado de Marciotto, Oliveira e Hanna (2010)

A aplicação da relação H/W é encontrada também no estudo de Schrijvers et al. (2015), no qual foi realizada uma análise de identificação dos fatores dominantes envolvidos no balanço de energia da ilha de calor noturna no nível da edificação para uma geometria urbana 2D idealizada. Os autores analisaram, desta forma, a transferência radiativa, o fluxo de calor condutivo e a ventilação (em CFD model), considerando uma gama de relação H/W (0,0, 0,5, 1,0, 2,0 e 4,0) a fim de estudar a importância da geometria do edifício. Os experimentos daqueles autores demonstraram que a temperatura do ar para as relações H/W 2,0 e 4,0, devido à estratificação muito estável na parte mais baixa do cânion, apresentaram temperaturas do ar muito menores que as relações H/W 0,5 e 1,0.

Entretanto, a relação  $H/W$  é um parâmetro que pode simplificar muito a interpretação da geometria urbana nas cidades, por considerar o cânion urbano como um perfil homogêneo e infinito. Um outro parâmetro de geometria urbana, o comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ), considera além da altura, a área de fachada e a área ocupada pelas edificações. A sua aplicação em estudos de clima urbano objetiva, geralmente, relacionar geometria urbana com as alterações de fluxo de vento (ZAKI et al., 2011; MILLWARD-HOPKINS et al., 2011; KANDA e MORIIZUMI, 2009; SUGAWARA e NARITA, 2009).

Considerando que os edifícios são os principais elementos de rugosidade, a Eq. 2.3 representa o cálculo de  $Z_0$  que, inicialmente, era utilizado para medir a rugosidade de uma superfície de vegetação para a análise do perfil do vento sobre essa (Oke, 1987).

$$Z_0 = 0,5h (A^*/A') \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde:

$Z_0$ : comprimento de rugosidade (m);

h: altura de rugosidade dos elementos média (m);

$A^*$ : área da face do lado do vento média ( $m^2$ );

$A'$ : área média ocupada por cada elemento ( $m^2$ ).

Oke (1987) apresentou uma forma de classificação dos terrenos urbanizados com base em valores de comprimento de rugosidade (Tabela 2.1).

Tabela 2.1: Comprimentos de rugosidade ( $Z_0$ ) representativos de terrenos urbanizados.

<b>Terreno</b>	<b><math>Z_0</math> (m)</b>
<b>Aberto</b>	
(fazendas, vilas, árvores)	0,2 – 0,6
<b>Suburbano</b>	
- residências de baixa densidade e jardins	0,4 – 1,2
- alta densidade	0,8 – 1,8
<b>Urbano</b>	
- alta densidade, <5 edifícios em bloco e andares	1,5 – 2,5
- alta densidade urbana com blocos de vários andares	2,5 – 10

Fonte: adaptado de Oke (1987).

Segundo Millward-Hopkins et al. (2011) existem dois mecanismos de parametrização de  $Z_0$  que afeta a simulação do ambiente atmosférico urbano. Um deles é o efeito dinâmico, isto é, a variação no  $Z_0$  provoca variação da força de arrasto. A outra é o efeito térmico, isto é, a variação no  $Z_0$  também pode contribuir para a variação de trocas de calor sensível e latente.

Nas últimas décadas, uma série de observações de campo, experimentos em túnel de vento e simulações numéricas foram realizadas para determinar as simples expressões que relacionam o comprimento de rugosidade ou coeficiente de arrasto para os parâmetros geométricos de superfície. A maioria das parametrizações, no entanto, usa somente os parâmetros geométricos primários, como a altura média dos edifícios, densidade ou a área frontal. Tais parâmetros são simples para representar cidades reais e, assim, podem necessitar de parâmetros adicionais, que incluem variações de altura dos edifícios e o alongamento desses, antes de poderem ser aplicados a superfícies urbanas complexas (KANDA e MORIIZUMI, 2009).

Moriwaki e Kanda (2006) apresentaram os parâmetros de comprimento de rugosidade e a disponibilidade de vapor d'água e umidade superficial, que foram derivados de um ano de medição de campo em uma área suburbana de Tokyo, Japão. Naquele estudo, entretanto, não foi encontrada qualquer significativa dependência do  $Z_0$  em relação à direção do vento.

Kanda e Moriizumi (2009) investigaram a influência da rugosidade na transferência de calor e dinâmica de fluxo para as superfícies urbanas. Suas análises mostraram que os coeficientes de transferência de calor tiveram o seu valor aumentado com as variações de altura dos blocos, mas não por alongamento desses; e que as variações de alturas dos blocos aumentaram a dinâmica de fluxo significativamente, mas causou pouca mudança no fluxo de calor sensível. A rugosidade também foi um dos doze parâmetros morfológicos utilizados no estudo de Martins, Bonhomme e Adolphe (2013) como indicadores do impacto da forma urbana na demanda de energia das edificações.

Considerando os diversos parâmetros envolvidos na caracterização do ambiente urbano, Stewart e Oke (2012) propuseram uma nova classificação da paisagem, dividindo-a de acordo com as propriedades que influenciam o plano de altura da temperatura, ou seja, a estrutura de superfície (altura e espaçamento de edifícios e árvores) e a cobertura de superfície (permeável ou impermeável). Ao todo são 17 classes que foram chamadas de “zonas de clima local” (LCZ – Local Climate Zones). Cada LCZ é classificada de acordo com os seguintes parâmetros (e dentro das respectivas faixas):

- FVC (de 0 à 1);
- relação H/W (de 0 à 3 m);
- altura média de edifícios (0 à 50 m);
- classe de rugosidade do terreno (1 à 8 m);
- fração de superfície edificada (0 à 100 %);
- fração de superfície impermeável (0 à 100 %);
- fração de superfície permeável (0 à 100 %);
- admitância da superfície (de 0 à  $2.500 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ );
- albedo da superfície (0 à 0,5);
- fluxo de calor antropogênico (0 à  $400 \text{ W m}^{-2}$ ).

A estrutura lógica do sistema LCZ é suportada por dados de modelagem numérica e observacional (Stewart e Oke, 2010; Stewart, 2011). Observações de temperatura móveis de Uppsala (Suécia), Nagano (Japão) e Vancouver (Canadá) foram usados para medir os contrastes térmicos entre as classes LCZ. A elaboração dessa classificação objetivou a sugestão de um sistema, que melhore a descrição das condições de superfícies em áreas urbanas e rurais, ou seja, que melhore a representação de ambientes térmicos, a serem comparados para a obtenção da magnitude da ilha de calor urbana.

Considerando-se, assim, toda a fundamentação anteriormente apresentada, destaca-se que nessa tese são utilizados os conceitos de microescala e de escala local, para análises de impacto da geometria urbana. São ainda utilizados os conceitos de camada intraurbana para o perfil vertical da atmosfera, para as análises de temperatura de ar medidas e de resultados de simulações. Os conceitos de relação H/W e de comprimento de rugosidade são utilizados para o cálculo da geometria urbana.

### 3. MODELOS PARA SIMULAÇÃO DE CLIMA URBANO

Para os estudos urbanos sobre ilhas de calor, a previsão associada à aplicação de modelos computacionais é uma ferramenta bastante utilizada.

Diversos estudos procuram mensurar a influência da geometria urbana no clima das cidades. Para isso, muitas vezes são utilizados modelos ou programas computacionais para simular cenários reais e hipotéticos, verificando-se principalmente as diferentes situações de adensamento urbano.

De acordo com Oke (1984) e Svensson, Eliasson e Holmer (2002), três tipos de modelos podem ser aplicados em pesquisas relacionadas ao clima em ambientes urbanos: modelos com base numérica, física e empírica.

#### 3.1. Modelos numéricos

A gama de modelos numéricos é ampla e eles estão sendo continuamente desenvolvidos e refinados. Eles são utilizados para simulações de vento, dispersão de poluição, clima térmico e seus efeitos na demanda de energia e conforto humano (BALÁZS et al., 2009). As escalas de estudo podem ser diferentes de acordo com o interesse da pesquisa. Em sua publicação, o *Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (U.S. Department of Energy, 2009)* fez uma classificação de modelos meteorológico-atmosféricos em escala de resolução.

Atkinson (2003) utilizou um modelo numérico tridimensional, não-hidrostático e de alta-resolução para analisar a intensidade de ilha de calor urbana em uma configuração idealizada, mas não realística. No modelo, a área urbana foi representada por anomalias de albedo, fluxo de calor antropogênico, emissividade, comprimento de rugosidade, fator de visão do céu, resistência da superfície para evaporação (SRE – *surface resistance to evaporation*) e inércia térmica. Os resultados mostraram uma diferença das ICU de dia e noite.

No período do dia, o comprimento da rugosidade e a SRE foram os fatores mais importantes que afetaram a intensidade de ICU; e no período da noite, o calor antropogênico foi o fator mais importante. As simulações sugeriram que o tamanho da área urbanizada teve um efeito mínimo na intensidade de ICU.

Além disso, Fortuniak (2003) comparou estatisticamente modelos de ilha de calor urbana. Foi demonstrado que a proposição de um modelo de balanço de energia numérico simples (*slab model*) é capaz de reproduzir singularidades do clima urbano. Os resultados das simulações numéricas explicam relações bem conhecidas como a dependência

logarítmica da intensidade máxima da ICU com o aumento da população, comprovando a influência do efeito do calor antropogênico no aumento de temperaturas nas cidades.

Kanda et al. (2005) testaram um modelo de balanço de energia urbana simples para simulações de mesoescala (SUMM), usando os resultados de um experimento de modelo de escala reduzida ao ar livre. O balanço energético simulado e as temperaturas de superfície concordam com os valores medidos em um modelo de escala reduzida correspondente para a geometria de um modelo numérico.

Barbirato (2010) apresenta a aplicação de um modelo climático urbano de balanço de energia, o modelo proposto em Tso et al. (1990), adaptado para as condições climáticas típicas da cidade de Maceió-AL, realizando a calibração do modelo para três pontos de estudo, com diferentes características de geometria. Após a devida calibração, o modelo apresentou boa correspondência com os dados observados em campo.

Entre muitos modelos, o ENVI-met destaca-se. Ele é configurado como um modelo tridimensional de clima urbano, que simula a relação entre a estrutura urbana e o meio ambiente. Vários são os tipos de análise ambiental urbana, usando o ENVI-met. Bruse (1999) aplicou o modelo para simular o comportamento dos ventos em uma tipologia organizada em lotes em clima temperado. Han, Mun e Huh (2007) investigaram as alterações microclimáticas, resultantes da recente restauração do rio de Cheonggye em Seul. Muitos outros demonstraram a aplicabilidade de ENVI-met (ZINZI, CARNIELO e MARINELLI, 2012; FAHMY, MOKHTAR e GIRA, 2012; SANTO et al., 2012).

### **3.2. Modelos físicos**

Embora ele não se encaixe na categoria de modelo computacional, o modelo físico é mencionado aqui pela possibilidade de ser complementado por modelos numéricos. Os modelos físicos em escala são usados principalmente nos estudos sobre a ventilação urbana e a influência de arranjos de edifícios (ASSIS, 2006), podendo ser especificamente aplicados para estudos sobre padrões de dispersão, fluxo e rugosidade de superfície, transferência radiativa e balanço de energia de superfície (BALÁZS et al., 2009).

Segundo Kanda (2006), modelagem de escala física é um método muito útil, mas deve ser complementado com modelos numéricos e observações de campo para superar a incompatibilidade entre a inércia térmica de modelos e o mundo real. Os modelos físicos tendem a contribuir para a compreensão de um processo específico ou um conjunto de condições sob as quais eles foram projetados. Isso incrementou a compreensão do clima urbano.



No entanto, a visão sobre o equilíbrio de energia durante o dia é ainda inadequada. Apesar dessas experiências ao ar livre usarem materiais reais urbanos, as radiações recebidas descendentes dependem do lugar e as temperaturas de superfície observadas não são necessariamente semelhantes, devido às influências complexas de outros processos físicos, tais como transferência de turbulência para o ar e condução de calor para obstáculos. Nesses estudos, a obtenção de similaridade de inércia térmica é a questão mais problemática. Esta é a principal razão pela qual há pouco trabalho na modelagem de escala de balanço energético (KANDA, 2006).

### 3.3. Modelos com base empírica

Modelos empíricos baseiam-se principalmente em observações de balanço de energia de superfície (SEB). Seu objetivo é reproduzir o fluxo de energia da camada intraurbana, usando relações estatísticas derivadas de observações (MASSON, 2006). Eles incluem algoritmos estatísticos, parametrizações, fórmulas de engenharia e conceituação qualitativa. Dentre os modelos empíricos, abordagens periféricas estão entre os métodos mais comuns para revelar as relações entre a intensidade de ICU e os parâmetros meteorológicos e outros físicos que influenciam a sua formação (BALÁZS et al., 2009).

Jusuf e Hien (2009) discutiram o desenvolvimento de um modelo empírico para a previsão de temperatura do ar para avaliar o impacto do desenvolvimento urbano por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG ou *GIS – Geographical Information System*). A ferramenta de triagem para avaliação de ambiente urbano (Screening Tool for Estate Environment Evaluation - STEVE) foi desenvolvida como resultado de uma lacuna identificada entre o desenvolvimento de modelos baseados no clima e sua utilização pela comunidade não-científica, devido à dificuldade e à complexidade de modelos numéricos. Os dados para o modelo STEVE foram baseados em medições de campo de longo prazo, em Singapura, entre 2005-2008. Uma limitação dos primeiros modelos foi a influência de calor antropogênico, que não foi considerada. Para o modelo STEVE, os modeladores identificaram alguns problemas com valores pré-estabelecidos para o ‘ponto fixo’ e dificuldades de alteração dos mapas de plano mestre dentro da versão atual do programa.

Balázs et al. (2009) simularam a distribuição espacial da intensidade média anual de ICU, aplicando modelos empíricos baseados em conjunto de dados de áreas urbanas de Szeged e Debrecen (Hungria). O melhor modelo foi estendido para as áreas urbanas de quatro outras cidades situadas em ambientes geográficos semelhantes à Szeged e Debrecen. Desta forma, eles superaram a restrição de modelos empíricos típicos, para um local

específico. Assim obtiveram um modelo que não é totalmente local, mas útil para a região e válido para uma área densamente povoada. Esse trabalho também apresentou uma breve revisão sobre estudos que simulam  $\Delta T$  (diferencial de temperatura), usando características de superfícies urbanas, total ou parcialmente, como variáveis independentes. Deve ser mencionado que a limitação da maioria dos estudos mencionados encontra-se na falta, ou dificuldade, de validação.

Com base no estudo de Balázs et al. (2009), Unger, Savic e Gál (2011) aplicaram um método para determinar a estrutura espacial prevista da média intensidade anual de ICU em Novi Sad (Sérvia). A principal vantagem deste método de regressão é a necessidade de alguns parâmetros de entrada, que podem ser determinados de forma simples (sensoriamento remoto), sem ter informações locais detalhadas sobre a cidade. Métodos de SIG combinados com a análise de sensoriamento remoto de imagens de satélite Landsat foram usados para determinar as características da superfície horizontal (relação de superfície de cobertura artificial e construída). O método de krigagem e o modelo linear do software Surfer 8 foram usados para interpolar os valores de temperatura por células e para o traçado espacial de isotermas.

Svensson, Thorsson e Lindqvist (2003) apresentaram um método para criar mapas bioclimáticos em larga escala com o auxílio de um SIG, a fim de gerar distribuições espaciais da temperatura equivalente fisiológica (PET). Este modelo combina um mapa de temperatura do ar e um mapa de vento para criar diferentes zonas para que o componente térmico seja calculado. A vantagem deste é a utilização de informação que é geralmente disponível sobre uso do solo, altitude e distância da costa. O software disponível comercialmente IDRISI (*Clark University*, 1999) foi usado no modelo. A temperatura média radiante ( $T_{mrt}$ ) e o PET foram calculados com o RayMan, um modelo de radiação disponível para uso geral (MATZARAKIS, 2002).

Um estudo no Japão utiliza simulações e algoritmos genéticos (GAS) para investigar melhor o ambiente ao ar livre, com foco em níveis de conforto térmico. Esses algoritmos genéticos são associados com simulações de convecção, radiação e condução. O estudo utiliza outros softwares para simular a radiação e as temperaturas (CHEN, OOKA e KATO, 2008).

Grimmond e Oke (2002) apresentaram um Esquema de Parametrização Meteorológica Urbana em Escala-Local (LUMPS – *Local-scale Urban Meteorological Parameterization Scheme*). Esse tem semelhanças com o esquema do modelo de dispersão híbrido pluma (HPDM), e requer apenas observações meteorológicas padrões e

conhecimentos básicos em cobertura de superfícies. LUMPS consiste em uma série de equações vinculadas, que permitem o armazenamento ( $\Delta Q_s$ ), turbulência sensível ( $Q_H$ ) e fluxos de calor latente ( $Q_E$ ). Os submodelos de fluxo de calor não-radiativo do LUMPS são descritos e são avaliados, usando a escala local de dados meteorológicos coletados em sete cidades Norte-Americanas. Essas observações constituem uma base de dados hidrometeorológica urbana (MUHD).

Mais tarde, Brazel et al. (2009) utilizaram LUMPS para modelarem um número de cenários – industriais, residenciais, com paisagismo irrigado e residenciais com jardins desérticos nativos. LUMPS também foi usado para testar três cenários de projeto urbano; uma cidade densa e compacta, uma cidade com muito mais vegetação, e uma cidade deserta com menos vegetação e solo não controlado. De acordo com estes autores, este é um modelo útil, pois os dados necessários para entrada são bastante simples. No entanto, acredita-se que uma ferramenta SIG permitiria uma abordagem mais abrangente da cidade.

Quan et al. (2015) desenvolveram um sistema de modelagem de energia de edifícios urbanos em um SIG, denominando-o Urban-EPC (*Energy Performance Coefficient Calculator*). O EPC baseia-se no balanço de calor por hora do edifício, usando alguns parâmetros de entrada (áreas de parede e janela, coeficientes de sombreamento, propriedades dos materiais, produção de calor interno de equipamentos, etc.). Aqueles autores defendem haver uma falta de método de modelagem de energia do edifício no contexto urbano. Destacam que isso se deve à incapacidade de construir modelos de energia para explicar o contexto urbano e à inconsistência entre os dados urbanos disponíveis e os dados dos edifícios necessários em uma ferramenta de modelagem tradicional de energia de edifícios. O desenvolvimento daquele sistema de modelagem demonstrou como vincular a modelagem de engenharia, na escala da edificação, com a meso-escala dos dados urbanos para a prática de sistemas de suporte de planejamento.

#### **3.4. Comparação das potencialidades e limitações dos modelos**

Comparando as potencialidades e limitações dos modelos mencionados anteriormente, os Quadros 3.1 e 3.2 resumem as principais características verificadas.

Quadro 3.1: Potencialidades e limitações dos tipos de modelos em clima urbano.

Modelo	Símbolo	Potencialidades	Limitações
Numérico	◆	É, geralmente, desenvolvido para trabalhar em qualquer cidade sob diferentes condições.	Tem que ser submetido a um processo de validação antes de utilizado.
Físico	●	Tende a contribuir para o entendimento de um processo específico ou um conjunto de condições que são desenvolvidos a investigar.	A maior dificuldade está na obtenção de similaridade de inércia térmica.
Empírico	▲	A previsão é muito próxima da realidade, devido à semelhança das condições dos dados que se basearam para seu desenvolvimento.	Simula, geralmente, apenas para as condições específicos para o qual foi desenvolvido, procura assim uma base em medições de campo de longo prazo.

Quadro 3.2: Potencialidades e limitações específicas de alguns modelos de clima urbano.

Modelo	Potencialidades	Limitações
◆ SUMM (Kanda et al., 2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Permite facilmente calcular o balanço energético e a temperatura da superfície em cada face da cobertura urbana sem demoradas iterações;</li> <li>▪ A última versão tem a opção de previsão de temperatura interior, incluindo o fator arquitetônico como cenário de ar condicionado, vidros e ventilação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inércia térmica e balanço de energia do modelo não são condições típicas ou reais;</li> <li>▪ O SUMM assume apenas a condução de calor vertical sem troca de calor entre as diferentes constituições de superfícies.</li> </ul>
◆ ENVI-met 3.1 beta (Bruse, 1999)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ É disponível para download;</li> <li>▪ Possibilita entrada de dados simplificada ou com configurações mais avançadas;</li> <li>▪ Fornecimento de diversas variáveis de saída;</li> <li>▪ Interpretação de dados de saída por meio de mapas;</li> <li>▪ Simular os dados para diversas alturas diferentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Redução de resolução em simulações de áreas de grande extensão;</li> <li>▪ A inserção da área de estudo exige a caracterização de pixel por pixel, tornando a tarefa um pouco exaustiva;</li> <li>▪ O software não permite retomada do processo em caso de interrupção</li> <li>▪ O modelo apresenta alguns erros quanto a importação de radiação solar e com os nesting grids;</li> <li>▪ O processo de simulação é lento chegando a demorar dias ou semanas.</li> </ul>
▲ STEVE (Jusuf e Hien, 2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Converte complexos modelos numéricos em informação útil para planejadores urbanos</li> <li>▪ Facilita a interpretação visual através de mapas de temperatura coloridos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Problemas com valores pré-estabelecidos;</li> <li>▪ Foi desenvolvido com base na condição climática de Singapura;</li> <li>▪ A liberação do calor antropogênico no ambiente não foi considerada;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modelos de previsão baseados nas condições meteorológicas de Singapura;</li> <li>▪ Plug-in para o software ArcGIS em desenvolvimento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Planejadores não são capazes de mudar o plano mestre dentro da plataforma STEVE. Alterações de projeto, e localizações dos pontos de medições são feitos em software diferente, tais como software CAD, antes de sua entrada em STEVE.</li> </ul>
▲ Balázs et al. (2009)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poucos parâmetros necessárias, que podem ser determinados de forma simples (sensoriamento remoto) sem ter informações locais detalhadas sobre a cidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Necessidade de usar o método de krigagem padrão, um modelo de variograma linear do software Surfer 8 para interpolar valores de temperaturas por célula para localizar as isotérmicas;</li> <li>▪ O tamanho do grid é muito grande (baixa resolução), porque ele funciona na escala da cidade.</li> </ul>
▲ Svensson, Thorsson e Lindqvist (2003)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Utilize informações disponíveis sobre o uso do solo, altitude e distância da costa;</li> <li>▪ O modelo usa uma aplicação SIG, que o torna não estático, fácil de usar e aplicável.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Necessidade de aplicar outro software (RayMan).</li> </ul>
▲ Chen, Ooka e Kato (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Habilitada a visualização de resultados em mapas, organizando diversos parâmetros de saída.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Usa vários métodos diferentes para obter o resultado.</li> </ul>
▲ LUMPS (Grimmond e Oke, 2002)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Capaz de prever a variabilidade espacial e temporal de 1D em fluxos de calor em áreas urbanas;</li> <li>▪ Os dados de requisitos são mínimos: radiação, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica e descrição das superfícies;</li> <li>▪ O esquema representa uma melhoria sobre os modelos anteriores, como o HPDM.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Somente é válido para a gama de condições encontradas na base observacional de parametrização</li> <li>▪ Não apresenta resultados em forma de mapas, somente em valores. No entanto, uma ferramenta SIG poderia permitir uma abordagem da cidade como um todo.</li> </ul>

Embora o acesso a muitos modelos anteriormente mencionados seja restrito, os modelos LUMPS e ENVI-met podem ser descarregados gratuitamente através dos respectivos sites. No entanto, as suas saídas de dados não são comparáveis. Além disso, LUMPS é configurado para operar em condições similares às cidades norte-americanas, que é sua base observacional de parametrização.

A revisão aqui apresentada possibilitou a verificação de limitações, potencialidades e tendências na aplicação de modelos de simulação de climas urbanos. Enquanto modelos físicos têm sua aplicação limitada pelas condições de escala, os modelos empíricos geralmente têm sua aplicabilidade restrita às condições de tempo sob os quais foram

desenvolvidos. Por essa razão, aumentou-se amplamente a utilização de modelos numéricos, fato que contribui significativamente para o seu constante melhoramento e refinamento. Por outro lado, a sua validação se torna uma tarefa sempre necessária antes de sua aplicação em diferentes localidades. Além disso, as interfaces desses modelos não são sempre amigáveis (quando a experiência produzida pelo sistema é de fácil manuseio e aprendizado ao usuário). Os modelos numéricos, pela sua maior complexidade, são geralmente melhorados quanto à sua interface, gerando novas versões (atualizações).

### 3.5. *Modelo de Oke*

Oke (1981) apresentou uma comparação entre resultados de um experimento com um modelo físico em escala e dados observados em campo, para analisar a formação de ilhas de calor urbana. O modelo em escala foi usado para simular taxas de resfriamento noturno para ambientes rurais e urbanos sob condições calmas e sem nuvens. Uma comparação com observações de campo levantadas em condições semelhantes mostrou que o modelo é capaz de reproduzir muitas das características do desenvolvimento temporal das ilhas de calor urbanas e das trocas radiativas de onda longa em cânions urbanos.

Os resultados obtidos desse experimento mostraram que a geometria do cânion na porção central da cidade (medida pelo FVC) é uma variável relevante na produção de ilhas de calor urbanas noturnas, devido ao seu papel na regulação da perda de calor por radiação de onda longa.

Naquele estudo, através de uma série de deduções matemáticas, Oke (1981) desenvolveu um modelo numérico de base empírica, que se tornou uma das referências na literatura de clima urbano, pois conseguiu isolar o papel específico de uma das causas da ilha de calor, a geometria urbana. Este capítulo procura descrever aquele modelo desenvolvido, uma vez que representa o objeto de estudo desta tese.

Com base no fato de que a ilha de calor urbana noturna é resultado da diferença de arrefecimento urbano/rural, Oke utilizou em seus experimentos modelos físicos em escala representando superfícies urbanas e rurais para simular o arrefecimento passivo radiativo desses ambientes. Aqueles experimentos foram realizados com base nos seguintes critérios:

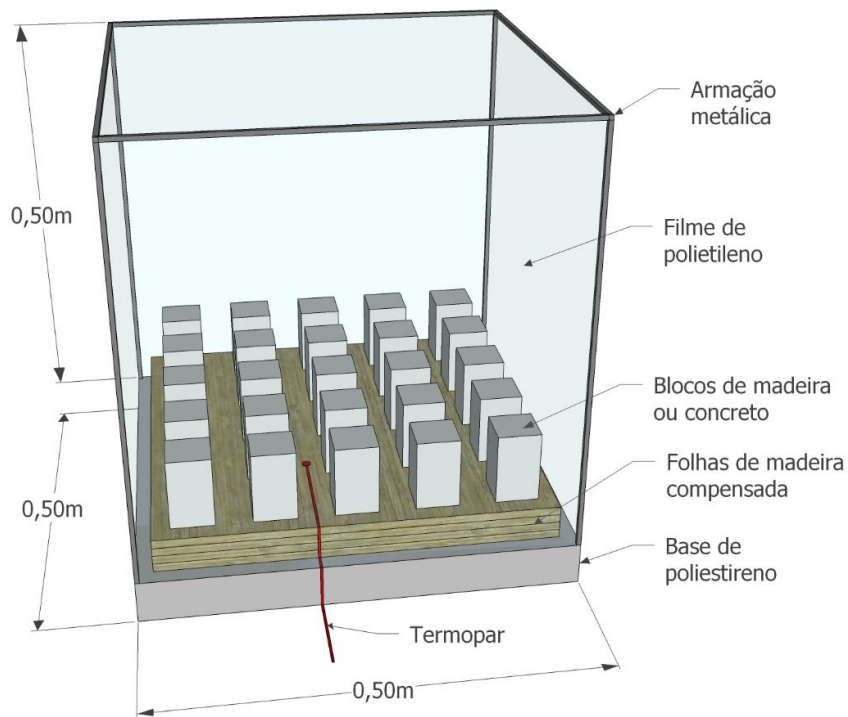
- cálculo específico para as condições noturnas (primeiros 180 minutos após pôr do sol);
- consideração unicamente das condições meteorológicas calmas e sem nuvens;
- o calor antropogênico produzido pelas cidades foi desprezado no balanço energético;

- delimitação das condições de camada intraurbana;
- simulação dos efeitos da geometria urbana e diferenças de admissão térmica.

O modelo que foi empregado é extremamente simples e, portanto, não pode suportar toda a gama de condições encontradas em cidades. Não foi levada em consideração a influência do vento, da água, da vegetação ou de outros materiais diferentes dos simulados. O modelo enfatiza e isola especificamente a verificação da influência da geometria urbana na formação das ilhas de calor noturna.

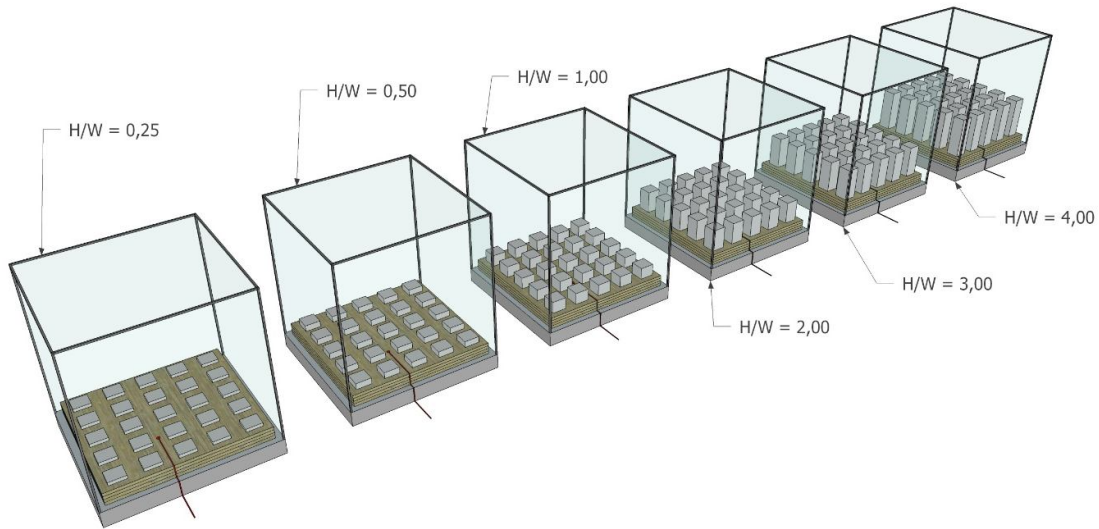
O modelo de Oke (1981) baseou-se, portanto, em fórmulas físicas e equações resultantes dos experimentos, as quais encontram-se esquematizadas e explicadas no Anexo 1. As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram o modelo físico em escala e as relações H/W consideradas nos experimentos.

Figura 3.1: O modelo 'urbano' com sua base suporte de isolamento e proteção de polietileno. Um termopar é situado no piso no centro do canyon do modelo.



Fonte: adaptado de Oke (1981).

Figura 3.2: Relações H/W consideradas nos experimentos de Oke (1981).



Os resultados desses experimentos foram comparados com dados de ilha de calor obtidos de 31 pontos de estudo (Tabela A.3 do Anexo 1) de diferentes cidades, que estão localizadas na Australásia, Europa e América do Norte.

Como resultado do estudo, é obtido o modelo que relaciona a relação H/W com a intensidade máxima de ilha de calor (Eq. 3.1).

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \ln(H/W) \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

$\Delta T_{u-r(\max)}$  é a intensidade máxima da ilha de calor (°C);

$H$  é altura das edificações do cânion urbano;

$W$  é a largura da rua do cânion urbano.

As considerações da geometria levaram ao desenvolvimento de um simples modelo empírico, capaz de prever a intensidade máxima da ilha de calor em uma localidade.

### 3.6. Potencialidades do SIG para a inclusão de modelos

Considerando o auxílio dos programas computacionais em cálculos, simulações e representação de resultados, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) merecem destaque, pois possuem habilidade de armazenar relações topológicas entre objetos geográficos (representados, no modelo vetorial, por pontos, linhas ou áreas) e destes objetos



com dados tabulares (alfanuméricos), contendo as mais diversas características. Além de possuírem inúmeras ferramentas de análise incorporadas nos próprios pacotes comerciais, os SIG se constituem em uma plataforma sobre a qual se pode desenvolver e incorporar novas técnicas e métodos de planejamento territorial (SILVA et. al., 2004).

O ArcGIS (da empresa ESRI) se configura como uma plataforma que, por oferecer diversas ferramentas de representação e análise espacial, apresenta um potencial para o desenvolvimento de tarefas personalizadas. Ou seja, é possível automatizar o acionamento sequencial de ferramentas do ArcGIS para a execução de uma tarefa específica determinada pelo usuário.

Para isso, a personalização no ArcGIS requer os seguintes procedimentos (ArcGIS Resource Center, ArcObjects SDK 10 Microsoft .NET Framework. Disponível em: [http://help.arcgis.com/en/sdk/10.0/arcobjects\\_net/conceptualhelp/index.html](http://help.arcgis.com/en/sdk/10.0/arcobjects_net/conceptualhelp/index.html). Acesso em: 08.05.2014):

1. Definir o problema que a tarefa de programação irá resolver – os SIG são utilizados para responder a perguntas, como: “Qual é o problema que deve ser resolvido?”;
2. Decidir que tipo de personalização deseja – o ArcGIS tem vários tipos de personalização e é importante conhecê-las, antes de se começar a personalizar;
3. Localizar o conjunto de componentes de programação (ArcObjects) necessário para a funcionalidade que a personalização exige – existem muitos ArcObjects, agrupados em áreas funcionais (plataformas) independentes;
4. Especificar a sequência de ferramentas a serem acionadas para a personalização.

Um esquema básico para muitas personalizações é composto pela seguinte sequência de ferramentas:

- a. **Criar** o projeto (como uma VBA macro ou no Visual Studio);
- b. **Localizar** os ArcObjects necessários;
- c. **Implementar** as interfaces necessárias;
- d. **Escrever o código**, disponibilizando a funcionalidade no SIG (através do ArcObjects);
- e. **Compilar** o código. No caso de uma aplicação independente (‘stand-alone’, ou seja, de funcionamento autosuficiente) deve ser compilado em um arquivo executável (.exe). No caso de ser um *add-in* (função personalizada em um único arquivo), o código deve ser compilado em um arquivo ‘.esriaddin’ e, no caso de uma extensão para

ArcObjects, deve ser compilado em uma biblioteca de vínculo dinâmico (dll);

5. Testar sua personalização – verificar se o aplicativo funciona como esperado, e certificando-se que o mesmo lida com os erros comuns do usuário de forma adequada;
6. Implantar a personalização.

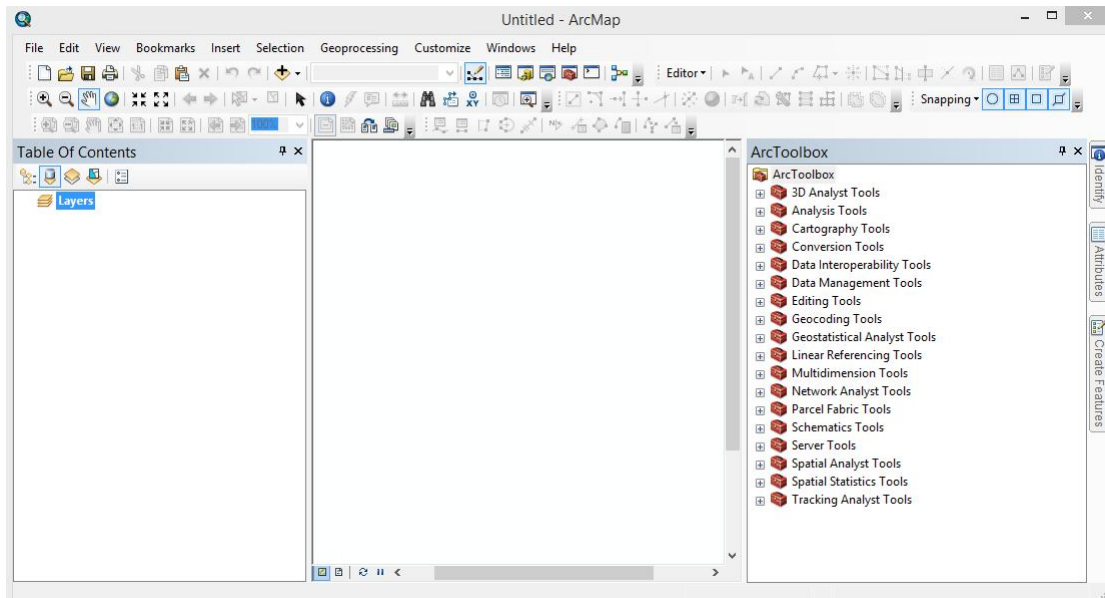
A versão ArcGIS 10 traz também a possibilidade de serem incorporadas novas funções personalizadas, os *add-ins*. Um *add-in* corresponde a um único arquivo que fornece recursos de extensão ao ArcGIS. Estas extensões são facilmente compartilhadas entre os usuários, porque não necessitam de programas de instalação ou registro de Modelo de Objeto Componente (*Component Object Model* – COM, uma plataforma da Microsoft para componentes de software lançada em 1993). Esta simplificação da inclusão de novas funcionalidades é vantajosa, tanto para o desenvolvedor quanto para o usuário, por dispensar a criação de rotinas de instalação (*setup*), de verificação de erro e de teste de instalação.

Os *add-ins* são programados em linguagem .NET ou Java, juntamente com a linguagem de marcação extensível (*Extensible Markup Language* - XML). É disponibilizado um kit de desenvolvimento de software, o *ArcObjects SDK*, que inclui um assistente de *add-ins* integrável em ambientes de desenvolvimento, tal como o Eclipse ou o *Visual Studio*. Para o desenvolvimento de um *add-in*, o algoritmo deve ser desenvolvido no *Microsoft Visual Studio* e ser incorporado como uma extensão do ArcGIS 10 (ou versão superior), utilizando-se o *ArcObjects SDK for Microsoft .NET*.

O ArcGIS 10 dispõe de funcionalidades que, em sua maioria, se encontram na janela ‘ArcToolbox’ (Figura 3.3 – área de trabalho da versão ArcGIS 10.2). Nessa janela, as ferramentas ficam organizadas em grupos por tipo de aplicação.

Para esta tese, destacam-se os grupos ‘Ferramentas de gestão de dados’ e ‘Ferramentas de análise’. O primeiro grupo possui ferramentas que realizam associações entre os objetos envolvidos no cálculo e funções básicas para a manipulação de tabelas de dados, como adicionar, excluir ou calcular um campo e associar várias tabelas. O segundo grupo possui ferramentas de análise espacial e estatística. Algumas aplicações desses dois grupos são apresentadas no Quadro 3.3. Acrescenta-se aqui que ‘objeto’ em ciência da computação trata-se de uma entidade informática, que possui identidade (que permite distingui-lo dos outros objetos), e caracteriza-se por atributos (propriedades) e métodos (ações, operações que o objeto é capaz de realizar).

Figura 3.3: Janela da área de trabalho do ArcMap do ArcGIS 10.2.



Quadro 3.3: Descrição das funções de algumas ferramentas disponíveis na janela *ArcToolbox*

Grupo	Ferramenta	Função
	Cópia de feições	Realiza cópia de camada
	Feições para linha	Transforma linhas contínuas em linhas fragmentadas pelas intersecções
	Feições para polígono	Cria polígonos através de áreas delimitadas por linhas.
	Vértices de feições para ponto	Cria pontos nos centros geométricos de objetos
	Divisão de linha nos vértices	Divide uma linha nos vértices
Ferramentas de gestão de dados	Adicionar campo	Adiciona um novo campo
	Calcular campo	Realiza cálculo de um campo
	Excluir campo	Exclui campo
	Adicionar índice de atributo	Adiciona índice de atributo em tabela
	Adicionar união	Adiciona os dados de uma tabela em outra com vínculo de uma coluna
	Juntar campo	Adiciona um (alguns) campo (s) de uma tabela para outra
	Fazer tabela de consulta	Associa duas ou mais tabelas com base em relação numérica entre suas colunas

Ferramentas de análise	Selecionar tabela	Cria uma nova tabela editável com base na tabela de origem
	Identidade	Cria relação de identidade por intersecção ou sobreposição.
	Gerar tabela de proximidade	Relaciona objetos por proximidade;
	Estatísticas resumidas	Realiza um resumo estatístico com base nas operações: soma, média, mínima, máxima, alcance, desvio padrão, contagem, primeiro e último.

Concluindo, nesse capítulo foram verificadas as potencialidades e tendências dos tipos de modelos para simulação do clima urbano, e apresentada a equação que resume o modelo de Oke (Eq. 3.1), a qual é utilizada nesta tese como base para o cálculo da intensidade máxima da ilha de calor com base na geometria urbana. Finalmente, os conhecimentos sobre o SIG ArcGIS, suas funcionalidades e suas vantagens na incorporação de novas técnicas e métodos de planejamento territorial, fizeram com que essa fosse a plataforma escolhida para a incorporação da sub-rotina de cálculo pretendida nesta tese.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

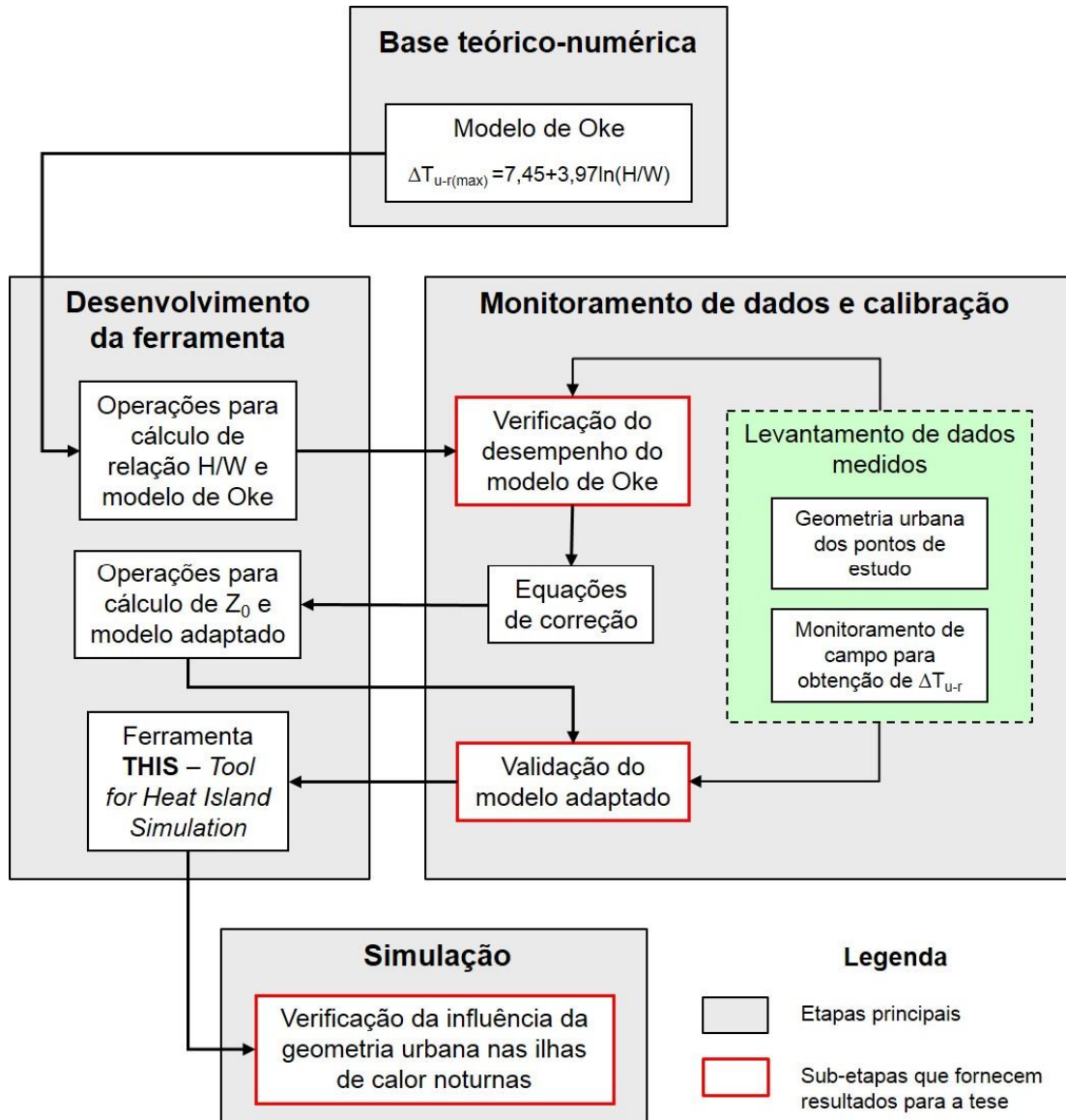
Visando facilitar análises e possibilitar a aplicação do modelo de Oke em diferentes localidades, essa tese propõe a adaptação do referido modelo a uma ferramenta computacional, incorporada a um SIG. Dessa forma, amplia-se as possibilidades de intervenções nesse modelo, de forma a validá-lo para diferentes condições climáticas, e possibilitando a simulação de vários cenários urbanos.

Para que essa adaptação pudesse ser concretizada, a maior parte do desenvolvimento da ferramenta computacional foi destinada aos cálculos necessários para a obtenção de um valor que traduzisse a geometria urbana do local. O parâmetro escolhido como entrada para a sua medida foi a relação H/W, parâmetro que representa a geometria do cânion urbano. A configuração do cânion urbano pode variar muito para diferentes bairros e cidades, tanto na microescala (variação da altura, área de fachada e ocupação das edificações), quanto na escala local (característica de homogeneidade ou heterogeneidade das edificações de um bairro, tamanho e formato das quadras, e largura das vias). Com base nesse conhecimento, é proposto nesta tese o desenvolvimento de uma sub-rotina de cálculo, que proporcione uma análise que considere todos esses critérios, através de sua parametrização.

O método adotado contempla quatro principais etapas que estão esquematizadas no fluxograma da Figura 4.1 e listadas a seguir:

- estudo da base teórico-numérica;
- desenvolvimento da ferramenta computacional;
- monitoramento de dados e calibração; e
- simulação.

Figura 4.1: Fluxograma do método da pesquisa.



Neste capítulo, são descritos os métodos e materiais aplicados na tese, divididos em três tópicos: ‘4.1. Desenvolvimento da ferramenta’; ‘4.2. Monitoramento de dados e calibração’; e, ‘4.3. Simulação’.

As etapas de ‘desenvolvimento da ferramenta’ e ‘monitoramento de dados e calibração’, apesar de terem sido desenvolvidas simultaneamente, são aqui apresentadas separadamente, para facilitar a compreensão dos processos que são envolvidos em cada uma. De uma forma geral, a ferramenta adotou como princípio a incorporação de uma equação base, cujos resultados de cálculo foram comparados com resultados obtidos em

levantamentos de campo, como forma de ajuste da ferramenta. Esse processo de comparação resultou na definição de equações de correção, que levaram à incorporação de novas operações no desenvolvimento da ferramenta e a obtenção do modelo adaptado. As equações de correção foram incorporadas com base em uma classificação de rugosidade das quadras ( $Z_0$ ), um novo parâmetro incluído na sub-rotina. Na sequência foi verificada a validação do modelo adaptado, de forma a permitir a tomada das últimas decisões relativas à interface da ferramenta com o usuário.

Dessa forma, foi obtida a ferramenta computacional nomeada THIS – *Tool for Heat Island Simulation*. Concluída a sua implementação, foi realizada uma simulação com cenários urbanos hipotéticos, para verificar qual a influência da geometria urbana nas intensidades máximas de ICU.

As sub-etapas ‘Verificação do desempenho do modelo de Oke’ e ‘Validação do modelo adaptado’, e a etapa ‘Simulação’, conforme sinalizadas no fluxograma, forneceram resultados que são apresentados no capítulo ‘5. Resultados e discussões’.

#### **4.1. Desenvolvimento da ferramenta**

O programa computacional selecionado para o desenvolvimento da sub-rotina, o SIG ArcGIS 10.2, atendeu aos seguintes critérios estabelecidos:

- Possibilitar a incorporação de uma sub-rotina de cálculo;
- Possuir ferramentas de associações espaciais e tabulares;
- Possibilitar a representação de mapas de grandes extensões, na escala do bairro ou da cidade;
- Permitir a inserção de objetos na forma vetorial;
- Disponibilizar a leitura de dados de saída em forma tabular;
- Possibilitar a leitura de dados de saída em forma de mapas de interpolação.

Para o desenvolvimento da sub-rotina, foi necessário inicialmente realizar uma verificação dos recursos e ferramentas disponibilizados pelo ArcMap do ArcGIS 10.2, para a definição das relações espaciais e tabulares necessárias.

O código foi escrito na linguagem Visual Basic e incorporado ao ArcGIS 10.2, através da inserção de ‘macros’ (sequência de tarefas já programadas e disponibilizadas pelo programa, que permite ao programador reutilizar o código ou mesmo projetar em linguagens de domínio específico). Isso agilizou os testes de verificação do código que, por sua vez,

foram decisivos na escolha dos objetos de entrada e saída, das ferramentas de relações espaciais e numéricas e da lógica de seleção e cálculo da geometria urbana.

Os dados de entrada para a simulação são duas *layers*: uma do tipo linha (que representa os eixos das vias) e outro do tipo polígono (que representa os edifícios). Numa primeira instância, a sub-rotina processa os polígonos para calcular a relação H/W, parâmetro indispensável à obtenção de valores de intensidade máxima de ICU, segundo o modelo de Oke (Eq.4.1).

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \ln(H/W) \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Onde:

$\Delta T_{u-r(\max)}$  é a intensidade máxima da ilha de calor (°C);

H é a média da altura das edificações da quadra urbana (m);

W é a largura média da via medida de face a face das edificações do cânion urbano (m).

Nesse caso, o algoritmo proposto considera que a medida de largura da via (W) é a média da largura do trecho de rua em análise, da fachada de uma edificação à outra, estando contido nesse espaço as calçadas e os recuos. O trecho de rua a que se refere esse cálculo é delimitado pelo encontro entre os eixos de via urbana, ao formarem uma quadra.

Chama-se a atenção de que o cálculo de H/W foi adaptado. Como a relação H/W do modelo de Oke é fundamentada em um cânion homogêneo infinito e a realidade das cidades na maioria das vezes não corresponde a essa configuração, adotou-se uma forma de incorporar a heterogeneidade do terreno urbanizado, através da identificação da rugosidade ( $Z_0$ ) proposta por Oke (1987). Para isso, o valor de  $Z_0$  é dado em função da Eq. 4.2 (OKE, 1987), que foi adaptado para o cálculo do valor correspondente à quadra.

$$Z_0 = 0,5h (A^*/A') \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Onde:

$Z_0$  é o comprimento da rugosidade (m);

h é a altura média das edificações da quadra urbana (m);

$A^*$  é a área média da fachada voltada ao centro/eixo do cânion urbano (m<sup>2</sup>);

$A'$  é a área média ocupada por cada edificação da quadra urbana (m<sup>2</sup>).

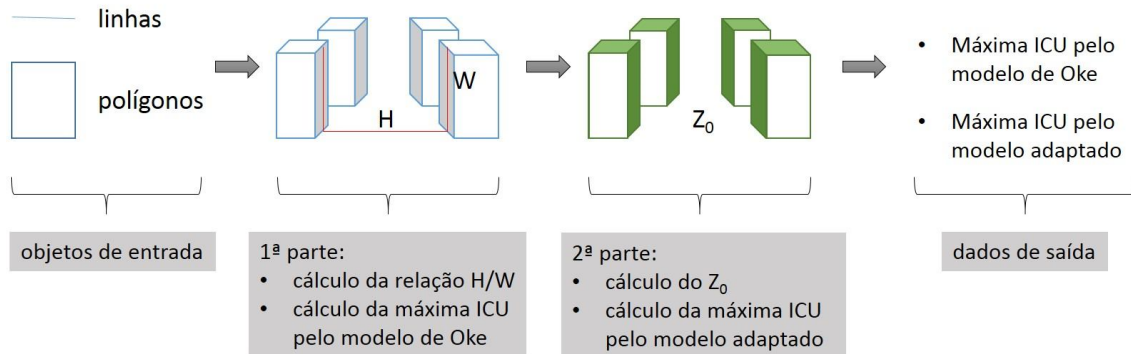


Justifica-se a introdução do parâmetro  $Z_0$ , após a fase de verificação do modelo de Oke, pela verificação de diferentes tendências de ICU máxima para diferentes faixas de  $Z_0$ . Através da classificação realizada na primeira fase de ajuste, a incorporação de equações de correção (aqui denominado modelo adaptado) foi então possível. O cálculo de  $Z_0$  foi incorporado no algoritmo, de forma a realizar a classificação das quadras e aplicar a equação de correção correspondente à cada faixa de  $Z_0$  para a qual foi identificada uma tendência diferenciada de ICU máxima resultante do cálculo pelo modelo de Oke.

Observou-se que, através das equações 4.1 e 4.2, são necessárias operações de associações espaciais para a obtenção da relação  $H/W$  para cálculo do modelo de Oke e do comprimento de rugosidade  $Z_0$  para cálculo do modelo adaptado.

Dessa forma, os dados de saída fornecidos pela sub-rotina são as máximas ICU pelo modelo de Oke e pelo modelo adaptado. A Figura 4.2 mostra um fluxograma que esquematiza a estrutura da sub-rotina.

Figura 4.2: Sequência que resume os processos envolvidos na sub-rotina e justifica sua divisão em duas partes



A Figura 4.2 mostra que sub-rotina foi dividida em duas partes principais:

1. Operações para cálculo de ICU máxima pelo modelo de Oke;
2. Operações para cálculo de ICU máxima pelo modelo adaptado.

Para facilitar o entendimento das partes que compõem o desenvolvimento da ferramenta, este tópico foi dividido em três partes: operações para cálculo de ilha de calor pelo modelo de Oke, operações para cálculo de ilha de calor pelo modelo adaptado, e interface com o usuário (forma de inserção de dados de entrada e obtenção de dados de saída).

#### 4.1.1. Operações para cálculo de ilha de calor pelo modelo de Oke

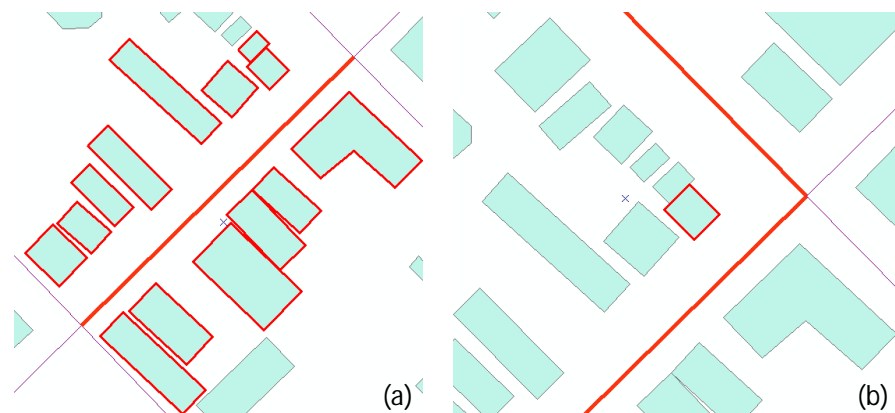
Para compreensão das associações realizadas, destaca-se que cada objeto fornecido ou gerado no projeto possui um número identificador de campo (FID), o qual é essencial para a realização das operações e para a verificação dos resultados dos testes.

Inicialmente, o programa realiza uma cópia de cada *shapefile* (arquivo que armazena os objetos em forma de representação gráfica), correspondente aos objetos de entrada (linhas para os eixos de vias e polígonos para edificações). No caso da *shapefile* representativa de edifícios, o usuário deve inserir na tabela de atributos uma coluna que contenha o valor da altura dos edifícios.

Quando a *shapefile* correspondente à geometria dos edifícios é copiada pelo programa, a tabela de atributos passa a conter, além dos valores de altura inseridos pelo usuário, os valores das áreas (calculados automaticamente pelo processo de cópia da *shapefile*). Simultaneamente, o programa trata a *shapefile* representativa das linhas de eixo da via, promovendo uma divisão de trechos de vias nas suas intersecções, para que os trechos correspondam à linhas de eixo por quadra.

Cada edifício é relacionado à, no máximo, duas linhas de eixo que sejam mais próximas, com base na medida do ‘raio de proximidade’ (valor em metros, que na janela de entrada é solicitado pelo programa ao usuário). Esse comando é importante por dois motivos: vincula, de ambos os lados, os edifícios à linha de eixo que farão parte dos cálculos da geometria urbana (Figura 4.3a); e possibilita que os edifícios localizados nas esquinas sejam vinculados no cálculo de ambas as linhas que as delimitam (Figura 4.3b).

Figura 4.3: Exemplo de relação espacial ‘edifício-linhas de eixo’



Esse comando dá origem à uma tabela de atributos chamada ‘1. Proximidade edifício-eixo’. No exemplo adotado para demonstrar as tabelas resultantes das relações espaciais

(Figura 4.4), na Tabela 4.1, o eixo de FID ‘3’ possui relação de proximidade com 11 edifícios (com valores de FID no intervalo de 985 a 995), e as distâncias do edifício à linha de eixo também são calculadas por esse comando (NEAR\_DIST). A Figura 4.5a apresenta a representação tridimensional dessa relação ‘edifício-eixo’.

Figura 4.4: Exemplo adotado para demonstrar as tabelas resultantes das relações espaciais



Tabela 4.1: Exemplo de tabela ‘1. Proximidade edifício-eixo’

OBJECTID	FID_EDIFÍCIO	FID_EIXO	NEAR_DIST
1295	985	3	11,75
1297	986	3	6,59
1299	987	3	8,92
1300	988	3	8,93
1302	989	3	7,73
1304	990	3	8,74
1305	991	3	15,73
1306	992	3	8,30
1307	993	3	11,96
1308	994	3	6,76
1310	995	3	9,57

Para a realização do cálculo de W, a ferramenta precisa identificar o lado da rua a que pertencem os edifícios incluídos no cálculo para cada ‘linha eixo’, pois serão somadas as distâncias médias desses em relação ao eixo da rua. Dessa forma, são realizadas associações espaciais de identidade dos edifícios (FID Edifício) por quadra (FID Quadra),

conforme demonstra a Figura 4.5b, e as das quadras com as linhas de eixos que as delimitam (Figura 4.5c). Nessa última relação, a tabela de atributos fornecerá os FID da quadra do ‘lado direito’ e do ‘lado esquerdo’ para cada linha de eixo. As tabelas de atributos resultantes das três relações espaciais descritas anteriormente são relacionadas entre si, para se criar um vínculo entre os três objetos: linha de eixo, quadra (lado direito e esquerdo) e edifício (Figura 4.6).

Figura 4.5: Representação tridimensional das relações espaciais que envolvem linha, quadra e edifício; e apresentação das tabelas de atributos resultantes

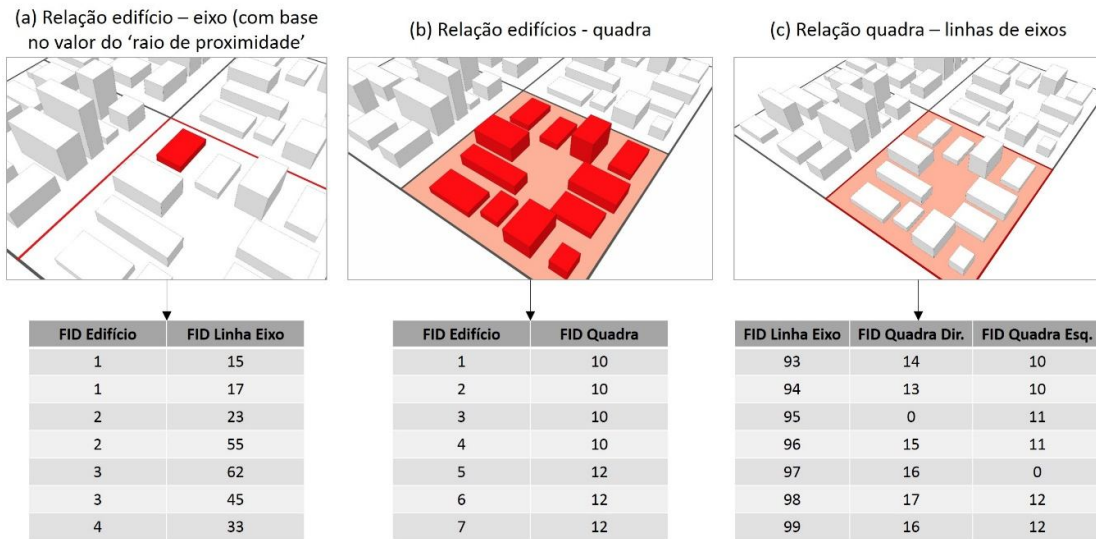
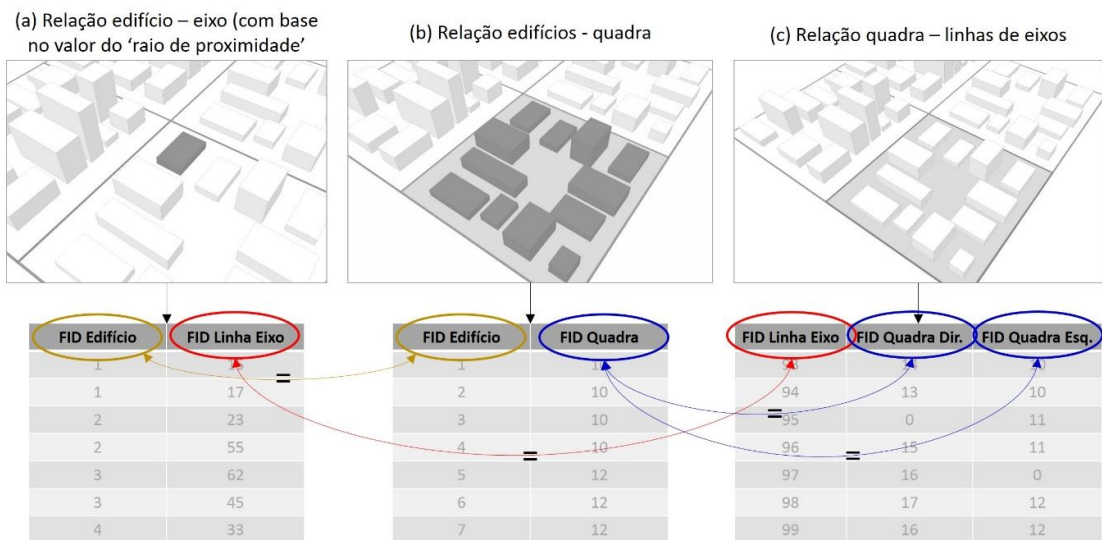


Figura 4.6: Esquema representativo das primeiras relações tabulares para o cálculo de geometria

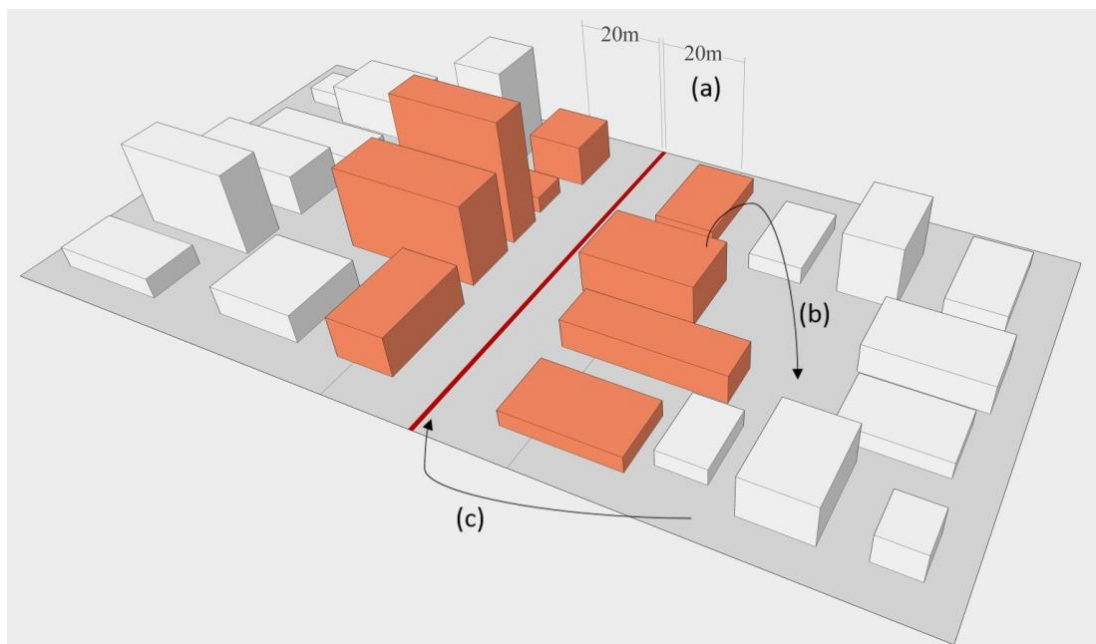


Essa operação resulta em uma tabela associativa, que unifica as informações contidas nas três tabelas de atributos:

- Linha de eixo;
- Edifícios vinculados à linha do eixo pelo raio de proximidade;
- Identificação da quadra a que pertence cada um desses edifícios;
- Altura desses edifícios.

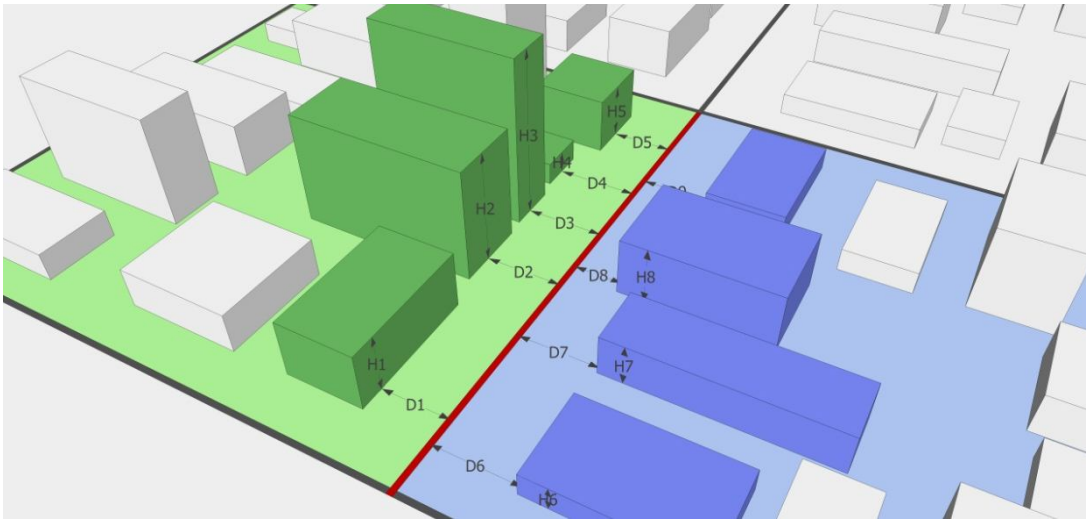
A Figura 4.7 ilustra, de forma tridimensional, o resultado dessa tabela unificada, considerando um valor de raio de proximidade de 20m.

Figura 4.7: Associações espaciais do algoritmo para cálculo da relação H/W por eixo de quadra: (a) raio de proximidade a partir da linha de eixo de, por exemplo, 20m; (b) associação dos edifícios com a quadra; (c) associação da quadra ao eixo que a delimita.



As próximas operações fornecem resumos estatísticos. O primeiro resumo estatístico trata-se de médias aritméticas das distâncias edifícios-eixo e das alturas dos edifícios para cada quadra associada à linha de eixo. Na Figura 4.8, as médias fornecidas neste exemplo são dos edifícios de cor verde (dos valores de H1 à H5 para altura, e D1 à D5 para o cálculo posterior de W) e dos edifícios de cor azul (dos valores de H6 à H9 para altura, e D6 à D9 para o cálculo posterior de W). A média das alturas denomina-se  $H_{med}$ , enquanto a média das distâncias 'D' denomina-se  $D_{med}$ .

Figura 4.8: Esquema representativo do resultado, de forma visual, da relação tabular que associa linha de eixo, edifícios e quadras (lado esquerdo em verde; lado direito em azul).



O segundo resumo estatístico é resultado da média das médias de alturas ( $H_{med}$  do lado direito e  $H_{med}$  do lado esquerdo), resultando no  $H$ ; e a soma dos valores  $D_{med}$  do lado direito e  $D_{med}$  do lado esquerdo, resultando no  $W$ .

Ao final dessas duas operações tabulares, obtém-se uma tabela ('2. Resultados da 1ª parte', Tabela 4.2) com os FID das linhas de eixo, os números de quadras que foram identificadas para cada eixo, e os valores de  $H$  e  $W$  correspondentes. Os campos  $H/W$  e  $OKE$  são inseridos e calculados posteriormente, e representam a relação  $H/W$  e a  $ICU_{máx}$  pelo modelo de Oke (Eq. 4.1 já anteriormente apresentada).

Tabela 4.2: Exemplo de tabela '2. Resultados da 1ª parte'

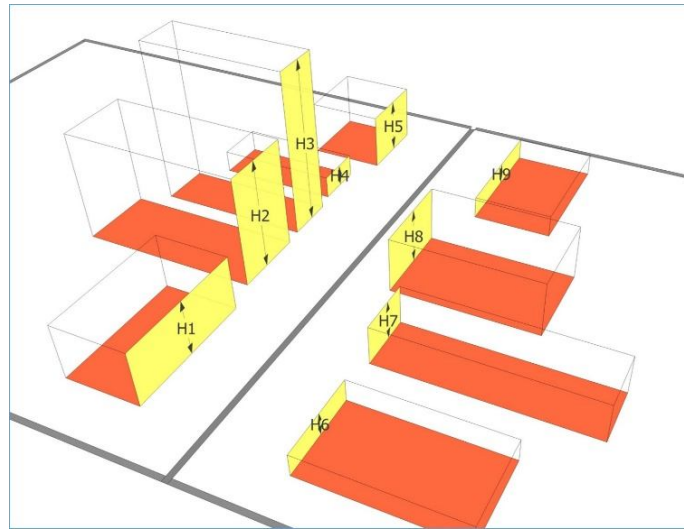
OBJECTID	FID_EIXO	Nº de quadras	W	H	H/W	OKE
1	1	1	10,84	8,00	0,74	6,24
2	2	1	14,91	6,88	0,46	4,38
3	3	2	18,83	5,61	0,30	2,64
4	4	2	26,27	5,63	0,21	1,33

#### 4.1.2. Operações para cálculo de ilha de calor pelo modelo adaptado

Conforme já visto anteriormente, para o cálculo de  $Z_0$  são necessários os valores de: altura dos edifícios, a área das fachadas e área de ocupação dos edifícios (Eq. 4.2, exemplo na Figura 4.9). Desses três valores necessários, dois já foram obtidos até essa etapa da sub-rotina: as alturas dos edifícios já constam na tabela de atributos original dos edifícios, e, as áreas de ocupação de cada edifício já foram automaticamente calculadas e fornecidas quando

a rotina gerou uma cópia da *shapefile* dos objetos ‘edifícios’ (no início do processo). Portanto, resta obter para o cálculo de  $Z_0$  o valor da área de fachada, para o qual são destinadas as operações de relação espacial descritas a seguir.

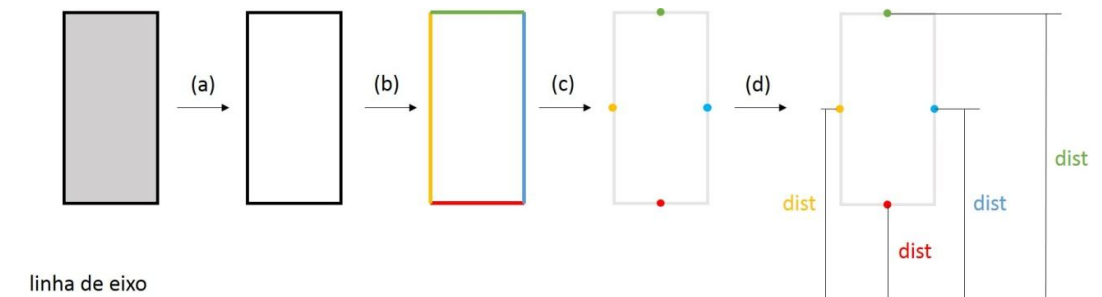
Figura 4.9: Ilustração tridimensional exemplificando os dados necessários para cálculo de  $Z_0$ : alturas dos edifícios (H1...H9), áreas de fachadas (em amarelo), e áreas ocupadas (em laranja)



A fachada dos edifícios considerada para o cálculo é aquela voltada para o eixo do cãion. A sub-rotina foi, então, programada para identificar o lado do polígono que representa essa fachada através dos comandos que seguem (Figura 4.10):

- transformar o polígono representativo do edifício em linha contínua;
- fragmentar a linha contínua nos vértices;
- criar pontos nos centros geométricos de cada linha;
- gerar uma tabela contendo as distâncias desses pontos à linha de eixo.

Figura 4.10: Ordem das relações espaciais para a identificação pelo SIG da fachada voltada à rua





Em uma operação de associação de proximidade ‘linha de eixos – pontos’ são identificados os pontos mais próximos da linha de eixo, com base no valor de raio de proximidade (o mesmo utilizado para o cálculo de relação H/W anteriormente). A tabela resultante dessa operação apresenta os valores das distâncias desses pontos em relação ao eixo, e essa tabela pode fornecer mais de um ponto por edifício (exemplo na Figura 4.11), pois esse comando engloba todos os pontos que estão dentro do raio de proximidade (tabela resultante ‘3. Proximidade eixo-pontos’). Nessa tabela (exemplo na Tabela 4.3), pode haver a identificação de um ponto por edifício (exemplo do edifício 991 para o eixo 3), de três pontos por edifício (exemplo dos edifícios 994 e 986 para o eixo 3), de cinco pontos (exemplo do edifício 988 para o eixo 3), dentre outras possibilidades.

Figura 4.11: Exemplo ilustrando pontos de cada edifício associados ao eixo pelo raio de proximidade

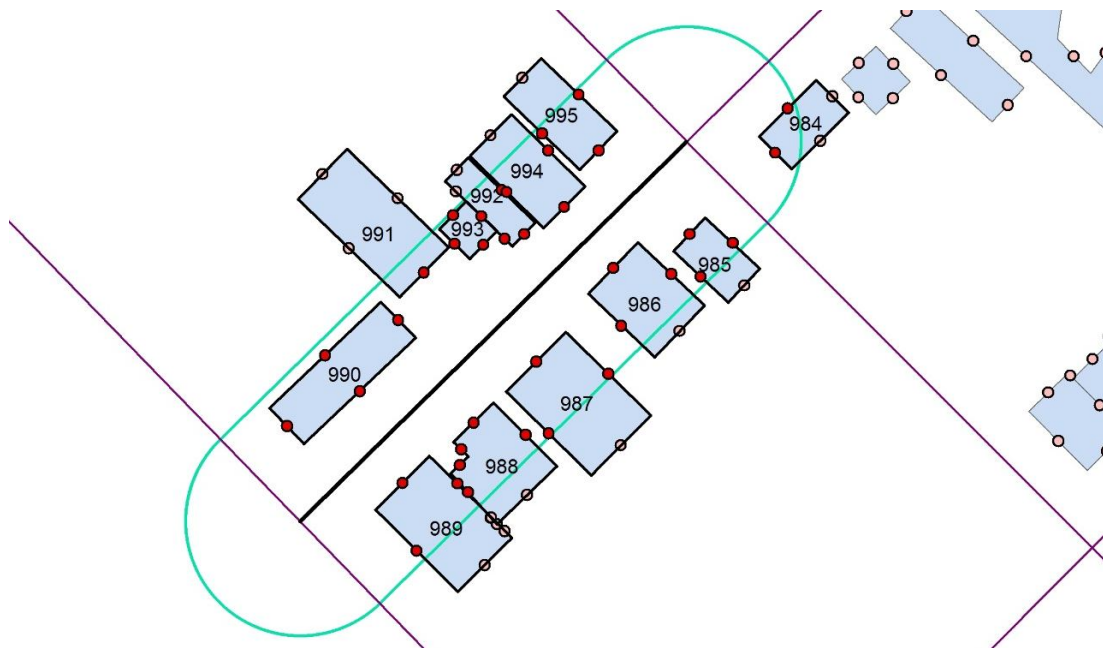


Tabela 4.3: Exemplo de tabela ‘3. Proximidade eixo-pontos’

OBJECTID	FID EIXO	FID PONTOS	NEAR DIST	FID PONTOS	FID EDIF	ALTURA	FID PONTOS	LARG FACH	ÁREA OCUP.
31	3	179	9,69	179	995	6	179	9,33	172,05
32	3	178	19,03	178	995	6	178	18,43	172,05
33	3	176	18,78	176	995	6	176	18,43	172,05
34	3	166	15,72	166	994	4	166	17,94	185,11
35	3	165	6,84	165	994	4	165	10,32	185,11
36	3	164	15,89	164	994	4	164	17,94	185,11
37	3	147	15,86	147	991	7	147	12,21	301,71
38	3	143	10,20	143	992	4	143	3,81	93,11



39	3	142	8,36	142	992	4	142	5,70	93,11
40	3	141	16,59	141	992	4	141	16,33	93,11
41	3	134	15,82	134	993	4	134	7,43	50,25
42	3	133	15,82	133	992	4	133	7,43	93,11
43	3	132	19,46	132	993	4	132	6,76	50,25
44	3	131	15,67	131	993	4	131	7,43	50,25
45	3	130	12,03	130	993	4	130	6,76	50,25
46	3	121	14,59	121	986	4	121	16,02	201,10
47	3	120	6,77	120	986	4	120	12,55	201,10
48	3	119	14,96	119	986	4	119	16,02	201,10
49	3	106	8,94	106	990	8	106	26,90	234,13
50	3	105	13,09	105	990	8	105	8,70	234,13
51	3	104	17,64	104	990	8	104	26,90	234,13
52	3	103	13,50	103	990	8	103	8,70	234,13
53	3	102	19,34	102	987	4	102	20,83	306,97
54	3	101	9,01	101	987	4	101	14,74	306,97
55	3	100	19,51	100	987	4	100	20,83	306,97
56	3	68	16,76	68	988	5	68	15,59	207,35
57	3	67	8,95	67	988	5	67	9,84	207,35
58	3	66	10,76	66	988	5	66	3,67	207,35
59	3	65	12,53	65	988	5	65	4,29	207,35
60	3	64	16,93	64	988	5	64	8,91	207,35
61	3	56	14,55	56	989	8	56	13,65	269,79
62	3	55	7,77	55	989	8	55	13,29	269,79
63	3	54	17,97	54	989	8	54	20,31	269,79
64	3	171	18,58	171	984	4	171	14,04	112,62
65	3	170	15,61	170	984	4	170	8,02	112,62
66	3	129	11,90	129	985	6	129	8,10	106,02
67	3	128	18,59	128	985	6	128	13,10	106,02
68	3	126	18,30	126	985	6	126	13,10	106,02

Através do FID dos pontos, são incorporados à essa tabela os FID dos edifícios dos pontos correspondentes e valores de altura, largura da fachada e área ocupada por cada edifício. Esses valores serão utilizados para posterior cálculo de  $Z_0$ .

Um resumo estatístico, com base no FID edifício, fornece uma tabela com dados somente dos pontos de menor distância (em NEAR\_DIST) para cada relação edifício-eixo (Figura 4.12). Essa tabela ('4. Menor distância eixo-ponto', Tabela 4.4), exibe os FID dos eixos e edifícios que estão relacionados, a frequência dos pontos associados (número de pontos que estavam associados por edifício), e a medida da menor distância, dentre esses pontos, de cada edifício em relação ao eixo correspondente (DIST. FACHADA).

Figura 4.12: Ilustração da tabela de resumo estatístico contendo somente os pontos de menor distância até o eixo de cada edifício ('Menor distância eixo-ponto')

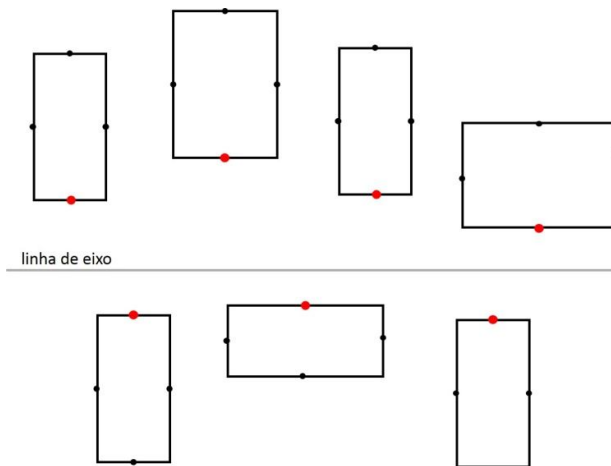


Tabela 4.4: Exemplo de tabela '4. Menor distância eixo-ponto'

OBJECTID	FID_EIXO	FID_EDIF	Nº de pontos	DIST. FACHADA
1598	3	984	2	15,61
1602	3	985	3	11,90
1606	3	986	3	6,77
1608	3	987	3	9,01
1609	3	988	5	8,95
1611	3	989	3	7,77
1614	3	990	4	8,94
1616	3	991	1	15,86
1617	3	992	4	8,36
1618	3	993	4	12,03
1619	3	994	3	6,84
1621	3	995	3	9,69

Como uma forma de validação, as tabelas de atributos de relação de proximidade, geradas no início do processo (tabela '1. Proximidade edifício-eixo') e resultante do passo anterior, envolvendo o valor de distância do ponto mais próximo de cada edifício ao eixo (tabela '4. Menor distância eixo-ponto'), foram relacionadas entre si, obtendo-se a tabela '5. Proximidade fachada-eixo' (Tabela 4.5). Essa tabela resulta da coincidência dos FID de edifícios e linhas de eixos, além de incluir a coluna das distâncias das fachadas ao eixo. Observa-se no exemplo discutido, que o edifício de FID 984, está presente na Tabela 4, mas não faz parte da Tabela 4.1 (por não fazer parte da quadra calculada) e, por isso, acaba sendo excluído na relação para a Tabela 4.5.

Observa-se que os valores das distâncias encontradas na tabela 1 e tabela 4 são diferentes. Na tabela 1 trata-se da distância do vértice do edifício mais próximo à linha do eixo e na tabela 4 trata-se da distância do centro da fachada (ponto central à linha da fachada

do edifício) à linha do eixo. Foi considerado, para o cálculo de  $Z_0$ , o valor da distância obtido na tabela 4.

Tabela 4.5: Exemplo de tabela ‘5. Proximidade fachada-eixo’

FID_EDIF	FID_EIXO	DIST. FACH.	FID_EDIF	FID_EIXO
985	3	11,90	985	3
986	3	6,77	986	3
987	3	9,01	987	3
988	3	8,95	988	3
989	3	7,77	989	3
990	3	8,94	990	3
991	3	15,86	991	3
992	3	8,36	992	3
993	3	12,03	993	3
994	3	6,84	994	3
995	3	9,69	995	3

Finalmente, são relacionadas as tabelas ‘5. Proximidade fachada-eixo’ (campos: edifício, linha de eixo e distância da fachada) e ‘3. Proximidade eixo-pontos’ (campos: edifício, linha de eixo, menor distância do ponto próximo, altura, largura da fachada e área de ocupação do edifício), para reunir os dados necessários para cálculo de  $Z_0$  na tabela ‘6. Resultados da 2ª parte’ (Tabela 4.6).

Tabela 4.6: Exemplo de tabela ‘6. Resultados da 2ª parte’

OBJECTID	FID EIXO	Nº de edif.	MÉD. ALTURAS	MÉD. ÁREA FACH.	MÉD. ÁREA OCUP.	Z	H/W	UHI OKE	UHI ADAPT
1	1	1	8,00	162,45	269,79	2,41	0,74	6,24	3,82
2	2	8	6,88	83,75	150,86	1,91	0,46	4,38	4,67
3	3	11	5,45	69,18	193,42	0,98	0,30	2,64	3,69
4	4	5	6,00	80,18	140,55	1,71	0,21	1,33	2,95

À essa tabela acrescenta-se os campos (e seus cálculos) das médias das alturas dos edifícios, das áreas de fachadas (AF) e das áreas ocupadas pelos edifícios para cada linha de eixo. Dessa forma, o campo ‘Z’ (comprimento de rugosidade) é acrescentado e calculado com base na Eq. 4.2 pelos valores médios obtidos.

Ainda nessa tabela são incluídas as colunas ‘HW’ e ‘UHI OKE’ da tabela ‘Resultados da 1ª parte’. Por fim, a sub-rotina inclui o campo ‘UHI ADAPT (que corresponde ao modelo adaptado) e realiza o cálculo do mesmo com base no valor de  $Z_0$  obtido, incorporando a equação adequada à faixa de  $Z_0$ , verificada na calibração dos resultados do modelo de Oke para a classificação de  $Z_0$ , analisada nos levantamentos de campo. A ferramenta foi concebida de forma a possibilitar que o usuário altere as equações de correção para a

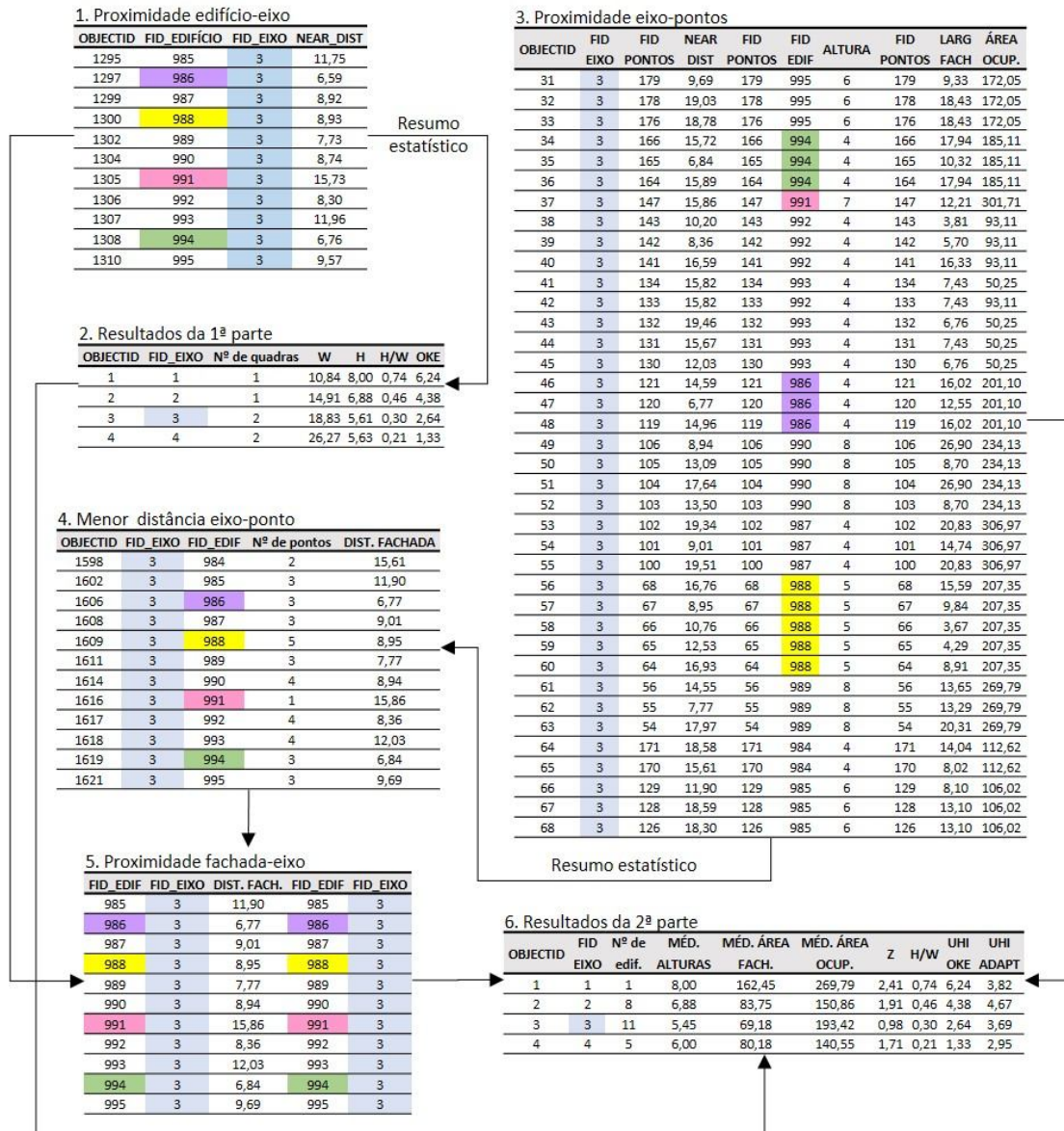
validação do modelo para outras cidades de interesse (ver tópico ‘4.1.3. Interface com o usuário’). O campo ‘UHI OKE’ é calculado com base na Equação 4.1, apresentada anteriormente, e o campo ‘UHI ADAPT’ é calculado com base nas Equações 4.3 e 4.4:

$$\text{Se } Z_0 < 2,0: \text{‘UHI ADAPT’} = 0,9921 \cdot \text{‘UHI OKE’} + 1,7187 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

$$\text{Se } Z_0 \geq 2,0: \text{‘UHI ADAPT’} = 0,5128 \cdot \text{‘UHI OKE’} + 0,6142 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

A fim de facilitar a compreensão da contribuição de cada tabela de atributos obtida das operações para a realização de todos os cálculos necessários, a Figura 4.13 ilustra um fluxograma das relações entre essas.

Figura 4.13: Fluxograma das relações entre as principais tabelas



Os resultados da 1ª e da 2ª parte (campos das colunas ‘HW’, ‘OKE’, ‘Z’ e ‘UHImax’) são transportados para a *shapefile* de linhas de eixo de cada quadra, pois representam o cálculo para esse objeto: o trecho de via que corresponde ao fragmento da linha de eixo representativo da quadra. Dessa forma, facilita-se ao usuário a busca pela informação diretamente no objeto de interesse, através da tabela de atributos, ou permite-se ao programa a representação dos resultados em forma de mapas (operação essa apenas permitida quando os valores se encontram em tabela de atributos de objetos, e não em tabela de consulta). A forma de apresentação dos dados de saída consta no próximo tópico ‘4.1.3. Interface com o usuário’.

Para a representação em forma de mapa, foi utilizado o método de krigagem (método de regressão usado em geoestatística para aproximar ou interpolar dados). Esse método, dentro do ArcMap, necessita de pontos como dados de entrada. Para isso, foi necessário transformar as linhas de eixo de quadra em pontos (distanciados a 10m entre si), para os quais foram transferidos, através de uma ferramenta associativa espacial (por intersecção), os dados dos objetos (linhas) que os originaram. E, por último, o método de krigagem é aplicado, tendo como entrada esses pontos gerados pela sub-rotina e os valores ‘UHImax’ para a interpolação de dados.

#### 4.1.3. Interface com o usuário

A interface com o usuário é o sistema pelo qual as pessoas (usuários) interagem com uma máquina. As interfaces de usuário fornecem um meio de: entrada (permitindo ao usuário manipular o sistema), e saída (permitindo ao sistema produzir as respostas das ações do utilizador).

Os dados de entrada solicitados pela ferramenta THIS são:

- *Shapefiles* dos objetos de entrada:
  - ‘linhas’ (linhas de eixo);
  - ‘polígonos’ (edifícios, com a informação da altura em metros contida na tabela de atributos);
- Preferência do usuário:
  - Raio de proximidade (medida utilizada para definir a seleção de edifícios para o cálculo para cada linha de eixo de quadra);
- Opcional:
  - Equações de correção com base na faixa de  $Z_0$  correspondente à validação encontrada pelo usuário através de levantamento de dados reais.

Esses dados de entrada são solicitados em uma janela tipo formulário, que se abre ao usuário, quando esse aciona o ícone de THIS, conforme é apresentado na Figura 4.14.

Figura 4.14: Janela-formulário para inserção de dados de entrada na ferramenta THIS

Legenda:

- |                       |                        |                         |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| 1. Nome da tarefa     | 3. Raio de proximidade | 5. Edifícios            |
| 2. Diretório de saída | 4. Linhas de eixo      | 6. Equações de correção |

Os dois primeiros campos, que se destinam à inserção das *shapefiles* dos objetos de entrada, são do tipo ‘caixa combo’ (ou seja, uma combinação de caixa texto editável e uma caixa de listagem) e apresentam uma lista das *shapefiles* presentes no arquivo aberto, para que o usuário faça a seleção. O terceiro campo trata-se do valor de preferência do usuário para o ‘raio de proximidade’, medida essa que deve ser fornecida em metros. Para o armazenamento dos dados de saída, o usuário pode selecionar em ‘*Output Directory*’ o diretório de saída.

O restante dos campos da janela-formulário destina-se aos dados de entrada opcionais. O usuário pode tanto deixar de preenchê-los (optando por manter as equações incorporadas pela validação desta tese para as simulações), quanto optar em inserir as próprias equações de correção do modelo de Oke, de acordo com uma classificação de  $Z_0$ . No espaço localizado abaixo da inserção da 1ª equação, descreve-se um exemplo de como as variáveis devem ser declaradas pelo usuário, para que o programa possa interpretar o comando sem erros.

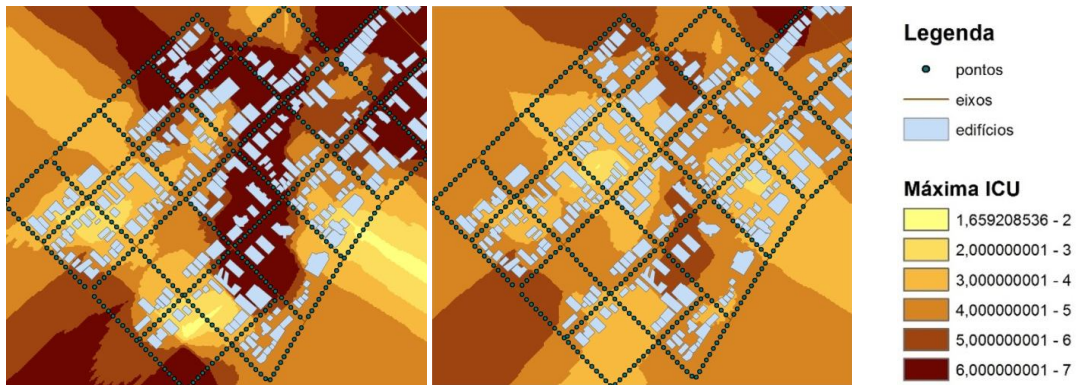
Após o preenchimento da janela-formulário e do acionamento do botão ‘OK’, o programa levará alguns instantes (tempo que depende da configuração da máquina), para efetuar as operações programadas da sub-rotina e apresentar os dados de saída. A sub-rotina apresenta os dados de saída, tanto em forma tabular (Figura 4.15) – contendo os valores de relação H/W (HW),  $Z_0$  (Z), máxima ICU pelo modelo de Oke (OKE) e máxima ICU pelo modelo adaptado (UHImax), para cada linha de eixo (FID\_Eixos) – quanto na forma de mapas de interpolação de dados, pelo método de krigagem, que podem ser visualizados tanto no ArcMap (Figura 4.16) quanto no ArcScene (Figura 4.17).

Figura 4.15: Exemplo de tabela de dados de saída de simulação com a ferramenta THIS

OBJECTID*	FID Eixos	FREQUENCY	MEAN NePtEix S Edif3 pt Altura	MEAN AF	MEAN NePtEix S Shape Area	Z	HW	OKE	UHImax
1	1	1	162,446462	8	269,793028	2,40846	0,73799	6,243812	3,816027
2	2	8	6,875	83,749854	150,860776	1,908317	0,461035	4,376104	4,688984
3	3	11	5,454545	69,18392	193,417689	0,975523	0,297801	2,641015	3,691955
4	4	5		80,176944	140,552884	1,711319	0,214151	1,33194	2,954815
5	5	11	8,272727	88,55411	233,515836	1,568596	0,420929	4,014797	4,465532
6	6	4	9,75	104,091292	117,425029	4,321439	0,427608	4,077296	2,705037
7	7	1		69,628905	234,128682	1,189584	0,808736	6,607235	5,925334
8	8	5		76,492503	222,817141	1,304529	0,493741	4,648192	4,822197
9	9	10		97,718942	239,862329	1,649954	0,411207	3,922024	4,413291
10	10	3		33	871,316237	28,337019	2,059446	10,318076	5,905309
11	11	6		5,5	67,338677	160,725186	1,152161	0,468581	4,440559
12	12	2		5	91,167706	178,581709	1,276274	0,390514	3,71704
13	13	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
14	14	7	5,285714	67,911052	155,692116	1,152783	0,588645	5,34617	5,215228
15	15	2		4	14,993912	353,237471	0,084894	0,225639	1,53939
16	16	13	5,230769	46,574192	182,003437	0,66927	0,28267	2,434009	3,57539
17	17	9	4,444444	52,445652	151,99319	0,766784	0,257344	2,081361	3,365553
18	18	8	6,25	61,857451	156,905232	1,231983	0,473773	4,484301	4,72991
19	19	5	9,4	187,206385	314,761126	2,795358	0,561672	5,159953	3,260224
20	20	7	40,571429	473,532609	383,967368	26,399584	1,624107	9,375285	5,421846
21	21	12	4,083333	36,522871	200,863809	0,371604	0,352611	3,31171	4,069624
22	22	2	5,5	150,149014	268,836683	1,535913	0,435945	4,153953	4,543891
23	23	3		8	102,015941	378,792875	1,082992	0,426637	4,068265
24	24	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>
25	25	3		7	95,514732	220,296655	1,517506	0,308151	3,692947
26	26	17	7,411765	83,215281	134,026738	2,300929	0,396334	3,775772	2,550416
27	27	9	10,333333	119,923478	231,696155	2,674212	0,529759	4,927731	3,14114
28	28	5	6,4	182,588204	458,638475	1,679382	0,425971	4,062069	4,492151
29	29	2	7,444444	160,992728	178,496475	2,174607	0,348752	3,147624	3,745284

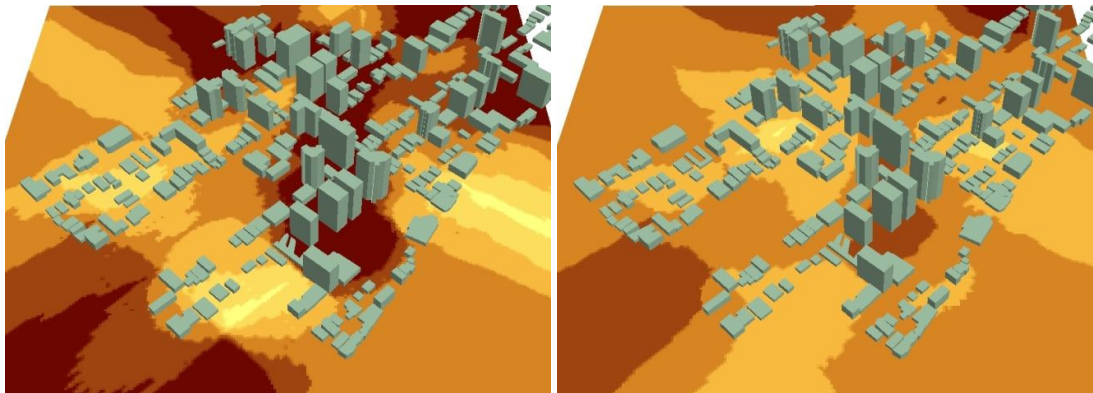


Figura 4.16: Exemplos de mapas de saída de simulação com a ferramenta THIS no ArcMap



(a) Máxima ICU do modelo de Oke (b) Máxima ICU pelo modelo adaptado

Figura 4.17: Exemplos de mapas de saída de simulação com a ferramenta THIS no ArcScene



(a) Máxima ICU do modelo de Oke (b) Máxima ICU pelo modelo adaptado

#### 4.2. Monitoramento de dados e calibração

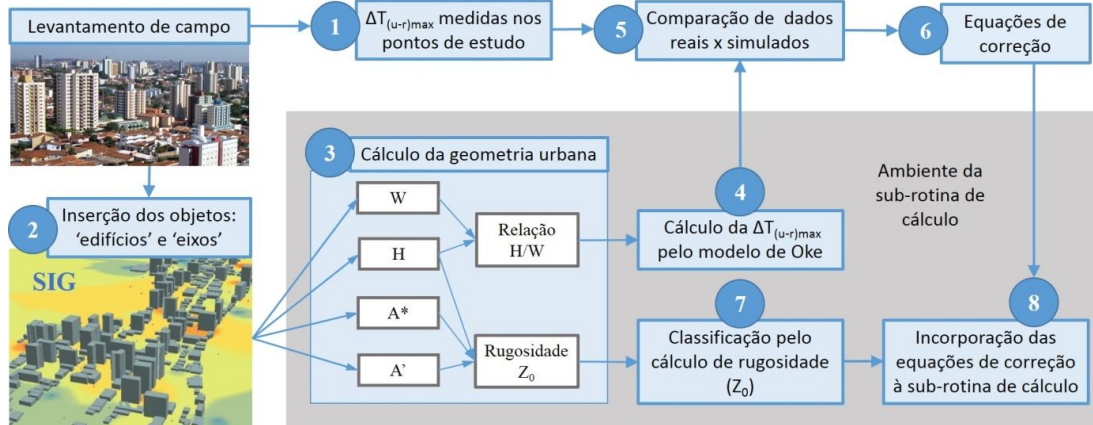
A etapa de validação do algoritmo assegura que a ferramenta desenvolvida forneça resultados de forma mais ajustada à realidade das áreas urbanas que foram selecionadas. Para isso, foram realizados levantamentos de geometria urbana e de dados climáticos de áreas urbanas. Destaca-se, no entanto, que o estudo da formação de ilha de calor em algumas cidades específicas não representa o objetivo final desta tese, mas sim um procedimento para a validação do modelo de cálculo proposto nesta tese.

A calibração do modelo foi realizada com base na comparação de dados reais levantados com os resultados do cálculo pelo modelo simplificado de Oke. Dessa forma, foi proposto uma calibração da ferramenta de simulação, a partir da realidade de duas cidades brasileiras selecionadas para o estudo. O procedimento foi realizado em 8 etapas, organizadas no fluxograma da Figura 4.18 e executadas na ordem especificada como segue.



Observa-se que as etapas 3, 4, 7 e 8 foram desenvolvidas dentro do ambiente da sub-rotina de cálculo incorporada ao SIG.

Figura 4.18: Fluxograma da validação do algoritmo para os dados levantados nas áreas de estudo.



1. Levantamento de dados meteorológicos e obtenção de valores de  $\Delta T_{(u-r)max}$  para cada ponto;
2. Representação da geometria urbana das áreas de estudo no SIG;
3. Cálculo da geometria urbana;
4. Cálculo da  $\Delta T_{(u-r)max}$  com base no modelo de Oke;
5. Comparação dos dados reais medidos com os dados simulados;
6. Obtenção das equações de correção por categoria de  $Z_0$ ;
7. Classificação das quadras urbanas pelo valor de  $Z_0$ ;
8. Incorporação das equações de correção à sub-rotina de cálculo.

#### 4.2.1. Caracterização dos pontos de estudo e instrumentação

Os pontos de coleta de dados selecionados para a validação fizeram parte de diferentes campanhas de levantamento de dados em tempo e espaço. Foi pretendido, através da diversificação das características urbanas dos pontos selecionados, ampliar a escala de valores de relação H/W e de comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ), para o ajuste da ferramenta de cálculo. As áreas urbanas selecionadas para o levantamento de dados pertencem às cidades de São José do Rio Preto e Bauru, ambas localizadas no interior do estado de São Paulo (Figura 4.19).

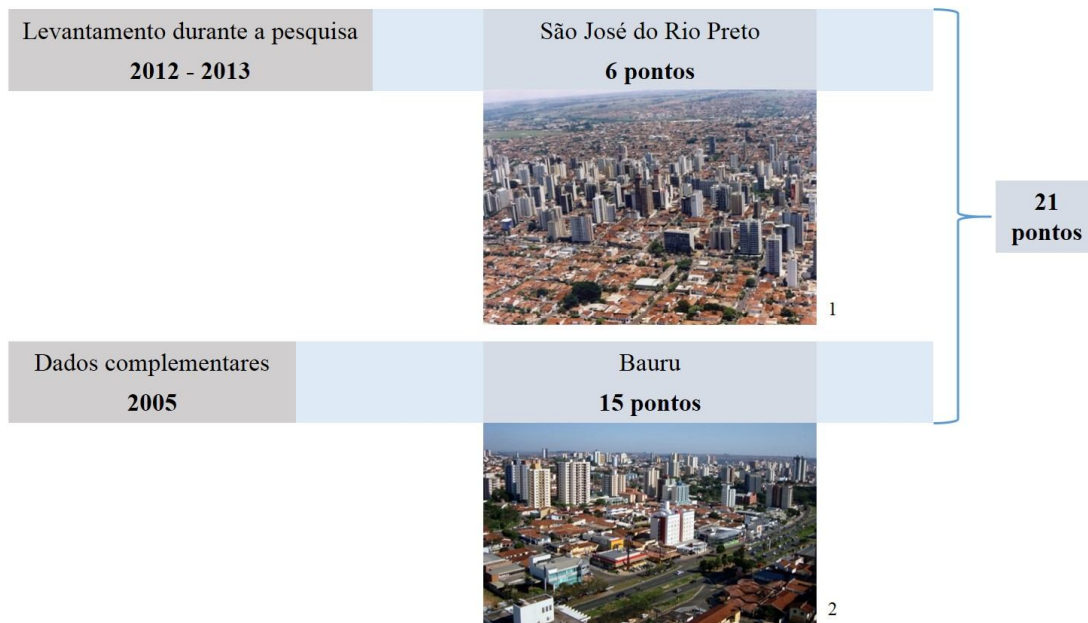
Figura 4.19: Localização das cidades de São José do Rio Preto e Bauru no estado de São Paulo



Fonte: adaptado de [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/SaoPaulo\\_MesoMicroMunicip.svg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/86/SaoPaulo_MesoMicroMunicip.svg)

Durante a pesquisa, foi realizado o levantamento na cidade de São José do Rio Preto, em outubro de 2012 e junho de 2013 (em colaboração com MASIERO, 2014). No entanto, o número total de pontos obtidos seria insuficiente para compor uma amostra para a validação do algoritmo. Como uma forma de aumentar o banco de dados, foram incorporados mais pontos de estudo da cidade de Bauru, totalizando 21 pontos (Figura 4.20). Os dados obtidos da cidade de Bauru foram levantados em junho e julho de 2005 por Leme (2005).

Figura 4.20: Áreas de estudo das quais foram selecionados os pontos de coleta de dados.



Fonte:

1. [http://farm4.static.flickr.com/3163/3064289959\\_a17ef7a748\\_o.jpg](http://farm4.static.flickr.com/3163/3064289959_a17ef7a748_o.jpg)

2. <http://www.ondepassarasferias.com/wp-content/gallery/bauru-em-sao-paulo/bauru-em-sao-paulo-07.jpg>

Foram selecionados somente dias estáveis, sem ocorrência de chuvas ou nevoeiros, de céu claro (baixa nebulosidade, menor que 50%) e baixa velocidade de vento média (menor que 2,0 m/s). Os valores de  $\Delta T_{u-r(\max)}$  dos dias medidos foram selecionados no período noturno, nas primeiras horas após o pôr do sol (entre 18h e 22h).

Todas as medições, em ambas as cidades, foram realizadas a 3 metros de altura (em postes de fornecimento de energia), com orientação a sul.

#### 4.2.1.1 São José do Rio Preto

São José do Rio Preto apresenta cânions urbanos com diferentes relações H/W e o centro urbano se configura em uma concentração de edificações verticalizadas. A cidade de São José do Rio Preto (Figura 4.21) localiza-se, sob as coordenadas 20°49'12"S, 49°22'44"O, a 443 km de distância da capital São Paulo, e está situada em uma altitude média de 489 metros. Possui área de 431,96 km<sup>2</sup> e população de 438.354 habitantes (IBGE, 2014).

O clima de São José do Rio Preto, de acordo com o IBGE, apresenta cerca de 3 meses secos por ano, classificado como tipo Aw segundo Köppen, com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 23,6°C, ocorrendo invernos secos e frios e verões chuvosos com temperaturas altas.

Figura 4.21: Foto aérea da cidade de São José do Rio Preto.



Fonte: [http://farm4.static.flickr.com/3163/3064289959\\_a17ef7a748\\_o.jpg](http://farm4.static.flickr.com/3163/3064289959_a17ef7a748_o.jpg)



Nesse levantamento foram obtidos dados de 6 pontos de estudo (Figura 4.22), sendo que os pontos 1, 2, 3 e 4 pertencem à área central e mais verticalizada da cidade e os pontos 5 e 6 pertencem às áreas que predominam residências térreas. Observa-se que os dados dos seis pontos não foram medidos todos simultaneamente: os pontos 3 e 6 foram levantados em outubro de 2012 e os pontos 1, 2, 4 e 5 foram levantados em junho de 2013.

Figura 4.22: Pontos de estudo localizados na cidade de São José do Rio Preto



Para essa área de estudo, os dados de temperatura do ar rural foram obtidos pela Estação do CIIAGRO – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas, enquanto os de temperatura do ar urbana foram registrados nos pontos de coleta através de sensores data-logger.

A estação automática do CIIAGRO encontra-se localizada na Estrada de Segunda Ordem para Eng. Schimdt, na cidade de São José do Rio Preto, sob as coordenadas de Lat. 20°51'12.54"S e Long. 49°19'29.84"O (Figura 4.23). A altura de medição dessa estação automática é de aproximadamente 2 m acima da superfície vegetada. O sensor de temperatura e umidade utilizado é um HMP45, da Campbell, cuja faixa de medição de temperatura vai de -39,2 °C a 60 °C, com precisão de  $\pm 0,5$  °C (-40 °C),  $\pm 0,4$  °C (-20 °C),  $\pm 0,3$  °C (0°C),  $\pm 0,2$  °C (20 °C),  $\pm 0,3$  °C (40 °C) e  $\pm 0,4$  °C (60 °C) (ROCHA, SOUZA e CASTILHO, 2011).

Figura 4.23: Foto aérea da cidade de São José do Rio Preto com a indicação da localização da Estação Meteorológica da CIIAGRO (área rural) e dos pontos de medição (área urbana).



Fonte: adaptado do Google Earth.

Os equipamentos utilizados nos pontos de coleta urbana foram data-loggers da HOBO Pro v2, modelo U23-001, marca ONSET (Figura 4.24), com sensores de temperatura (precisão de -40 a 70°C) e umidade (0-100%), ambos com erro de 1%. Todos os equipamentos possuem proteção contra radiação solar direta e chuva.

Figura 4.24: Data-logger HOBO Pro v2



Os sensores de medição da temperatura do ar urbana passaram por uma calibração para que pudessem ser extraídos os dados dos mesmos com menor margem de erro entre os sensores. Para a calibração, os sensores foram instalados próximo ao sensor de temperatura da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia, São Carlos) e programados para medir por três dias. Os dados resultantes dessa medição possibilitaram a comparação e obtenção de equações de correção (Apêndice 1).

A seleção dos dias estáveis obtidos desse levantamento obedeceu à determinação de critérios que são apresentados em Apêndice 2, e de análise de massas de ar através de imagens de satélite, apresentada em Anexo 2.

#### 4.2.1.2 *Bauru*

Os dados complementares correspondem à dados de geometria urbana e diferença de temperatura do ar urbano-rural, obtidos em levantamento no bairro Vila Universitária da cidade de Bauru. A cidade se localiza sob as coordenadas 22°18'54"S e 49°03'39"W e encontra-se a 345 km da capital. A altitude média da cidade é de 526 m, possuindo área de 667,68 km<sup>2</sup> e população de 364.562 (IBGE, 2014). O clima de Bauru é classificado como tropical de altitude Aw.

O bairro Vila Universitária possui tanto quadras de edificações mais baixas quanto algumas em que há predominância ou existência pontual de prédios mais altos, como pode ser visto na Figura 4.25. Os dados desse levantamento são provenientes de 15 pontos de estudo, representados na Figura 4.26.

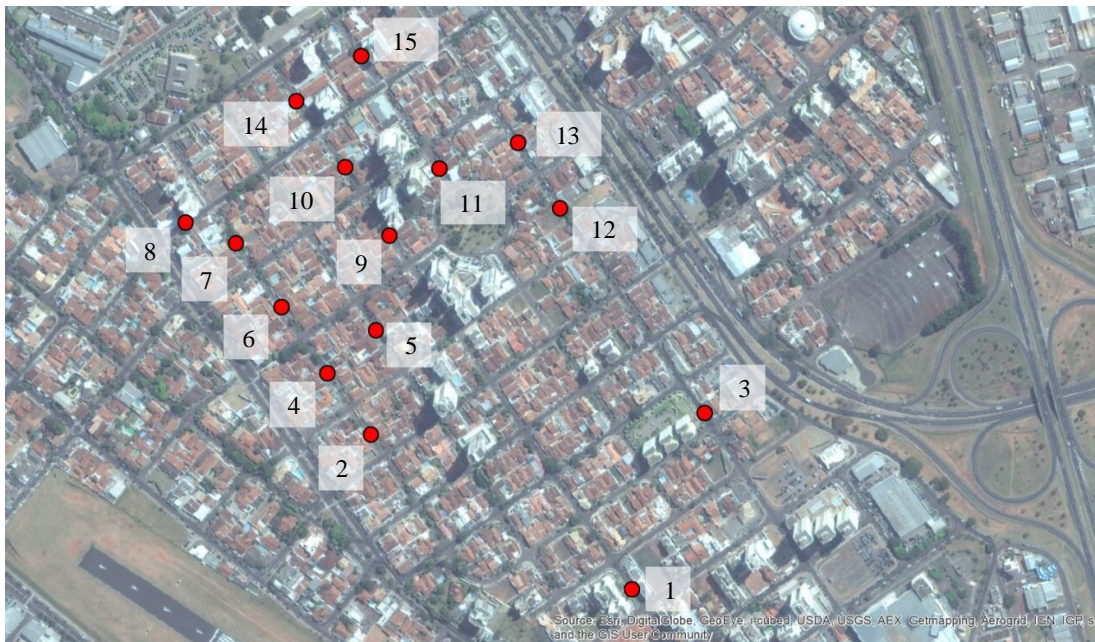
Figura 4.25: Foto aérea da cidade de Bauru.



Fonte: <http://www.ondepassarasferias.com/wp-content/gallery/bauru-em-sao-paulo/bauru-em-sao-paulo-07.jpg>



Figura 4.26: Pontos de estudo localizados na cidade de Bauru



Para essa área de estudo, os dados de temperatura do ar rural foram obtidos pela Estação do IPMET – Centro de Meteorologia de Bauru, enquanto os de temperatura do ar urbana foram registrados nos pontos de coleta através de sensores data-logger.

A estação automática do IPMET está localizada na Rua Carlos Ungaro, 668-822, sob as coordenadas de Lat. 22.35768°S e Long. 49.02799°O, e altitude de 630 m (Figura 4.27).

Figura 4.27: Foto aérea da cidade de Bauru com a indicação da localização da Estação Meteorológica do IPMET (área rural) e dos pontos de medição (área urbana).



Fonte: adaptado do Google Earth.

Em Bauru foram utilizados data-loggers HOBO H8 Pro Series Temp/External Temp H08-031-08, da marca ONSET, com sensores de temperatura do ar (de -30° a 50°C) e externa/superficial (-40° a 100°C), com resolução de 0,02°C a 21°C em modo de alta resolução (Figura 4.28). Todos os equipamentos possuem proteção contra radiação solar direta e chuva.

Figura 4.28: Data-logger HOBO H8 Pro Series



### 4.3. Simulação

Com a sub-rotina concluída, foi realizada uma simulação de 12 cenários urbanos hipotéticos. Esses correspondem a diferentes configurações de quadras urbanas, tanto no valor de H/W, quanto no comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ), uma vez que ambos os parâmetros são calculados pela própria sub-rotina. Os resultados e análises dessa simulação são apresentados no capítulo '5.3. Influência da geometria urbana nas ilhas de calor'.

A fim de abranger uma ampla gama de cenários, para a verificação da influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilhas de calor, foram determinados para a simulação os seguintes valores de relação H/W: 0,25, 0,5, 1, 2, 3 e 4. Essa escala de relação H/W foi simulada tanto para valores de  $Z_0 < 2,0$  quanto para  $Z_0 \geq 2,0$ .

A Tabela 4.7 apresenta uma classificação dos cenários simulados (quadras urbanas hipotéticas) com base nos critérios pré-definidos para a simulação e a Figura 4.29 ilustra, de forma simplificada e tridimensional, as geometrias desses cenários. O detalhamento da geometria de cada cenário simulado, com as medidas das alturas das edificações e da largura de via, é apresentado em Apêndice 3.



Tabela 4.7: Determinação dos critérios para as simulações de cenários urbanos

Faixa de $Z_0$	Quadra	H/W	H méd.	W méd.	L méd.	C méd.	A*	A'	$Z_0$
< 2,0	A1	0,25	4	16	8	8	32	64	1,00
	A2	0,5	8	16	8	20	64	160	1,60
	A3	1	16	16	30	70	480	2100	1,83
	A4	2	20	10	30	110	600	3300	1,82
	A5	3	30	10	100	250	3000	25000	1,80
	A6	4	40	10	200	420	8000	84000	1,90
$\geq 2,0$	B1	0,25	4	16	10	3	40	30	2,67
	B2	0,5	8	16	25	12	200	300	2,67
	B3	1	16	16	20	40	320	800	3,20
	B4	2	20	10	20	40	400	800	5,00
	B5	3	30	10	20	40	600	800	11,25
	B6	4	40	10	30	60	1200	1800	13,33

Legenda:

H méd. = altura média das edificações (m);

W méd. = largura média da via medida de face à face das edificações (m);

L méd. = largura média das edificações (m);

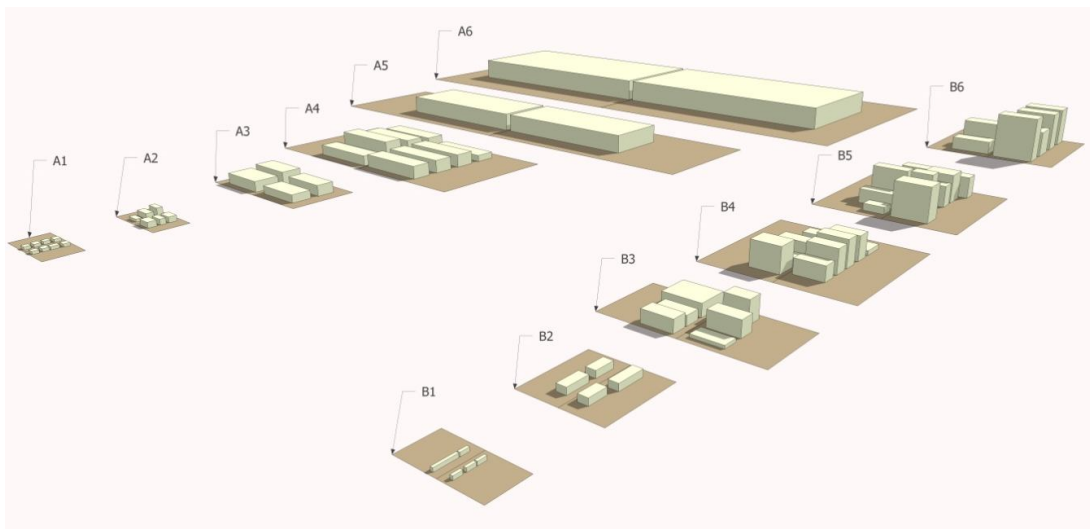
C méd. = comprimento médio das edificações (m);

A\* = área média da fachada voltada ao eixo (m<sup>2</sup>);

A' = área média ocupada das edificações (m<sup>2</sup>);

$Z_0$  = comprimento de rugosidade (m).

Figura 4.29: Representação da geometria dos 12 cenários hipotéticos simulados



Como forma de exemplificação para a compreensão da diferença entre esses cenários, pode ser associadas à essas geometrias as tipologias que constam no Quadro 4.1. Nota-se que nos cenários do grupo A (faixa de  $Z_0 < 2,0$ ), como as edificações possuem maior área média ocupada, os cenários acabam tendo menor possibilidade de variação de altura das edificações. Nos cenários do grupo B (faixa de  $Z_0 \geq 2,0$ ), os edifícios possuem maior área de fachada em relação à sua área ocupada, possibilitando uma maior variedade nas alturas dos mesmos.

Quadro 4.1: Exemplos de tipologias que caracterizam os cenários definidos para a simulação

Faixa de $Z_0$	Quadra	Tipologia
< 2,0	A1	habitação de interesse social
	A2	sobrado estreito
	A3	prédio de 4 andares e vários apartamentos
	A4	blocos de sala de aula
	A5	shopping center
	A6	indústria pesada
$\geq 2,0$	B1	edifício de lazer pequeno
	B2	sobrado largo
	B3	prédio de 4 andares compacto
	B4	prédio de 5 ou 6 andares (média)
	B5	prédio de 8 a 10 andares (média)
	B6	prédio de 10 a 13 andares (média)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos, sendo dividido em quatro partes:

1. o desempenho do modelo de Oke (com base em comparações de dados reais medidos e simulados pelo modelo de Oke);
2. o desempenho do modelo adaptado (apresentando-se a melhoria do desempenho do modelo, quanto à melhor capacidade de previsão de dados de ICU, após a validação);
3. a verificação da influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilhas de calor urbana noturna (com base em simulação de diferentes cenários urbanos hipotéticos com a ferramenta validada); e
4. apresentação das discussões finais e contribuições da tese.

### 5.1. *Desempenho do modelo de Oke*

A ferramenta THIS foi utilizada para identificar as linhas de eixo representantes dos pontos de estudo, realizar o cálculo de geometria urbana (relação H/W e  $Z_0$ ) e simular as intensidades máximas de ICU pelo modelo de Oke. Desta forma, as intensidades máximas de ICU simuladas pelo modelo de Oke e as obtidas pelos levantamentos (dados reais) puderam ser comparadas.

A Figura 5.1 e Tabela 5.1 apresentam, respectivamente, os objetos de entrada e dados obtidos de levantamentos e simulações referentes aos pontos de estudo da cidade de São José do Rio Preto. A Figura 5.2 e Tabela 5.2 apresentam os dados correspondentes à cidade de Bauru.

Figura 5.1: Objetos de entrada para cálculo pela extensão THIS e destaque (em vermelho) das linhas de eixo que representam os pontos de medição no levantamento de dados na cidade de São José do Rio Preto

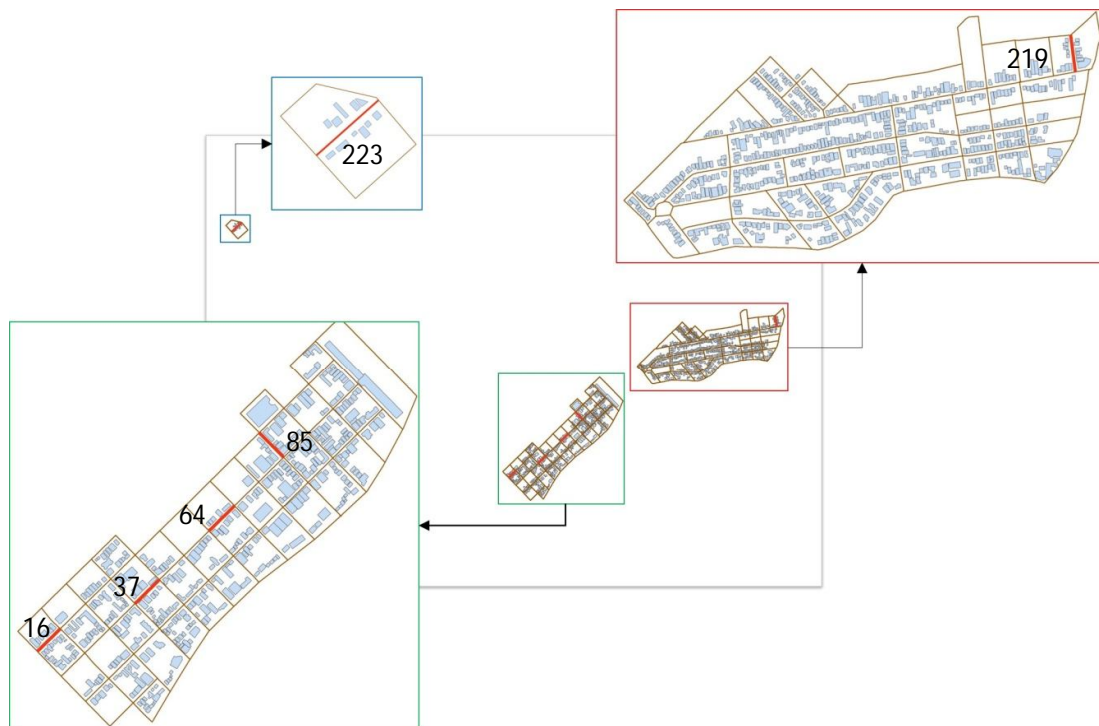


Tabela 5.1: Dados de geometria urbana e ilha de calor dos pontos da cidade de São José do Rio Preto

Ponto	Dados de referência		Dados de geometria urbana		Comparação entre dados de intensidade máxima de ICU	
	Código do eixo	Nº de edifícios	Relação H/W	Z <sub>0</sub>	$\Delta T_{(u-r)max}$ medida	$\Delta T_{(u-r)max}$ pelo modelo de Oke
1	16	13	0,28	0,66	4,11	2,43
2	37	9	1,03	10,93	4,72	7,59
3	64	11	1,25	15,99	4,70	8,34
4	85	9	0,83	9,31	3,82	6,75
5	219	14	0,23	0,72	2,79	1,67
6	223	11	0,22	1,23	4,80	1,44

Figura 5.2: Objetos de entrada para cálculo pela extensão THIS e destaque (em vermelho) das linhas de eixo que representam os pontos de medição no levantamento de dados na cidade de Bauru



Tabela 5.2: Dados de geometria urbana e ilha de calor dos pontos da cidade de Bauru

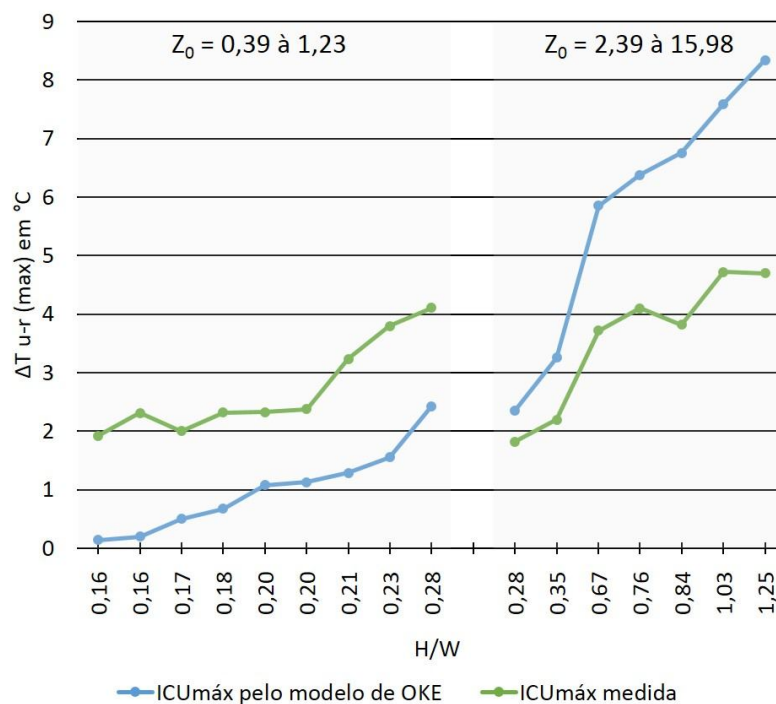
Ponto	Dados de referência		Dados de geometria urbana		Comparação entre dados de intensidade máxima de ICU	
	Código do eixo	Nº de edifícios	Relação H/W	Z <sub>0</sub>	$\Delta T_{(u-r)max}$ medida	$\Delta T_{(u-r)max}$ pelo modelo de Oke
1	25	6	0,67	3,62	3,72	5,85
2	76	11	0,21	1,14	2,71	1,17
3	72	3	0,76	7,17	4,10	6,38
4	91	15	0,18	0,69	2,32	0,68
5	97	12	0,20	0,80	2,71	1,04
6	107	16	0,20	0,64	1,56	1,08
7	124	12	0,20	0,48	2,71	1,11
8	123	9	0,15	0,60	1,94	0,01
9	122	13	0,35	2,39	2,20	3,26
10	135	11	0,16	0,39	1,90	0,28
11	132	6	0,17	0,88	1,82	0,33
12	126	11	0,16	0,48	2,58	0,11
13	139	11	0,16	0,45	2,96	0,07
14	148	12	0,21	0,62	2,20	1,27
15	154	16	0,28	2,82	1,82	2,35

Os pontos de estudo que possuíam valores de relação H/W similares e consecutivos (de 0,15 à 0,23) foram submetidos à um tratamento estatístico, de modo a serem extraídas as suas médias, para melhor representatividade de cada faixa de valor de relação H/W. Após esse tratamento de dados, os valores das médias da intensidade da ilha de calor nesses pontos foram comparados com os valores resultantes da simulação pelo modelo de Oke.

A comparação entre dados reais e simulados pelo modelo de Oke para os mesmos pontos demonstrou uma tendência crescente da  $\Delta T_{u-r(max)}$  em relação ao valor de H/W. No entanto, a correlação entre esses dados demonstrou-se baixa, com o coeficiente de determinação  $R^2$  de 0,63, desvio padrão de 2,20 (ver Figura 5.6a) e diferença média de erro de 2,05°C.

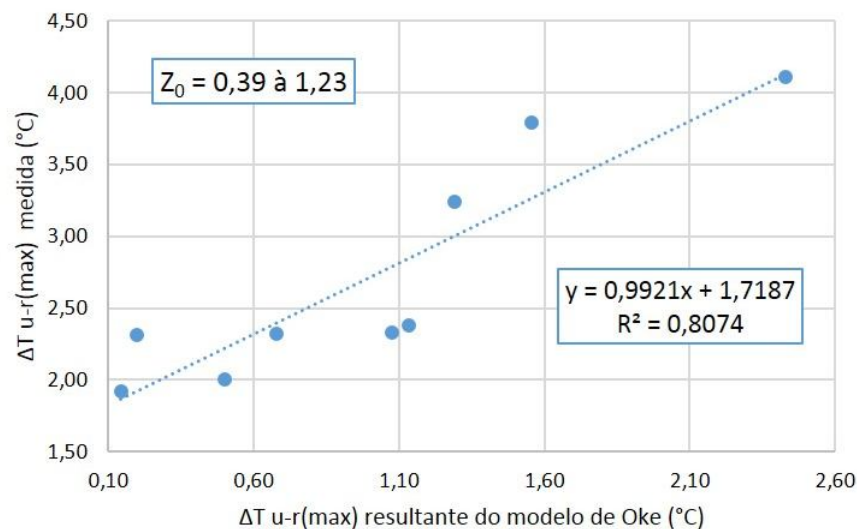
Verificou-se que essa baixa correlação deve-se aos comportamentos diferenciados para duas faixas de  $Z_0$ . Quando a análise foi então realizada por faixas de  $Z_0$ , obteve-se uma melhoria na correlação dos dados ( $R^2$  de 0,80 e 0,97 para duas diferentes faixas de  $Z_0$ ). O gráfico da Figura 5.3 apresenta as curvas de dados reais (ICUmáx medida) e dados simulados pelo modelo de Oke, com pontos classificados nessas duas faixas de  $Z_0$ .

Figura 5.3: Intensidade máxima de ICU simulada pelo modelo de Oke e obtida em medição



A faixa de ‘ $Z_0 = 0,39$  à  $1,23$ ’ apresenta a relação entre valores de intensidade máxima de ilha de calor ( $\Delta T_{u-r(\max)}$ ) para uma faixa de relação  $H/W$  entre 0,16 e 0,28. Os valores medidos encontram-se acima dos simulados pelo modelo de Oke, com diferenças de  $1,25^\circ\text{C}$  a  $2,25^\circ\text{C}$  (média de  $1,75^\circ\text{C}$ ). O coeficiente de determinação dessa relação é de  $R^2 = 0,80$ , com desvio padrão de 1,15 (Figura 5.4). Os desvios encontrados podem ser explicados pela interferência de outros parâmetros que não seja a geometria urbana (vento, calor antropogênico, propriedades dos materiais, vegetação, etc.) e que podem ser diferenciados entre a região que baseou o modelo empírico de Oke e as áreas nas cidades brasileiras levantadas.

Figura 5.4: Gráfico de comparação de dados reais e simulados pelo modelo de Oke, na faixa de  $Z_0=0,39$  à  $1,23$ , com linha de tendência, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e equação da regressão linear para dados de  $Z_0 < 2,0$ .



Dessa forma, comparando-se os dados reais medidos e os simulados pelo modelo de Oke, é obtida a equação de correção (Eq. 5.1 e 5.2) para o cálculo de intensidade máxima de ilha de calor noturna ( $\Delta T_{u-r(\max)}$ ) do modelo adaptado para  $Z_0 < 2,0$ :

Se  $Z_0 < 2,0$ :

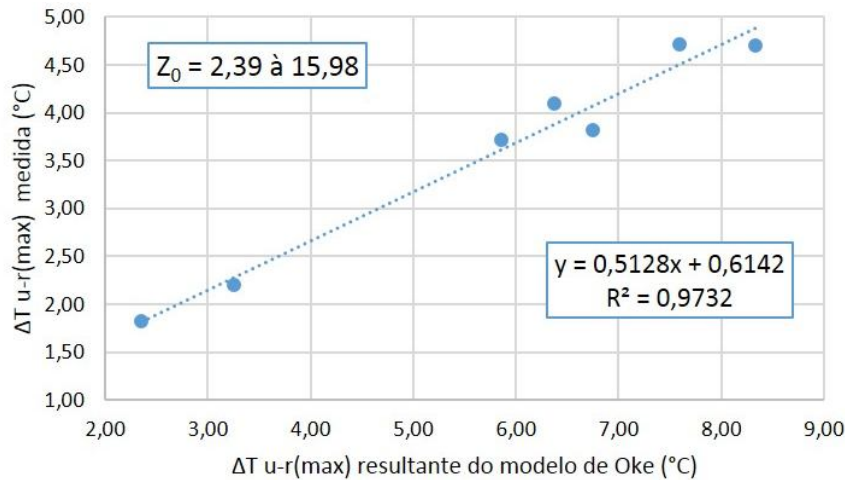
$$\Delta T_{(u-r)\max} = 0,9921 (7,45 + 3,97 \ln (H/W)) + 1,7187 \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Então:

$$\Delta T_{(u-r)\max} = 9,1098 + 3,9386 \ln (H/W) \quad (\text{Eq. 5.2})$$

A faixa de ‘ $Z_0 = 2,39$  à  $15,98$ ’ apresenta resultados para a faixa de relação H/W de 0,28 à 1,25. Existe uma maior correlação entre as curvas dos valores simulados pelo modelo de Oke e a dos dados reais, que também apresenta uma relação diretamente proporcional à relação H/W, mas de forma menos acentuada que a do modelo de Oke. A curva dos dados reais, no entanto, ficou abaixo da curva de valores do modelo de Oke, com diferenças que variam de  $0,53^\circ\text{C}$  a  $3,63^\circ\text{C}$  (média de  $2,08^\circ\text{C}$ , ver Figura 5.3). Essa relação apresentou um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0,97$ , com desvio padrão de 2,13, como pode ser visto na Figura 5.5.

Figura 5.5: Gráfico de comparação de dados reais e simulados pelo modelo de Oke, na faixa de  $Z_0=2,39$  à  $15,98$ , com linha de tendência, coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e equação da regressão linear para dados de  $Z_0 \geq 2,0$ .



Da mesma forma, obtém-se a equação de correção (Eq. 5.3 e 5.4) para o cálculo de intensidade máxima de ilha de calor noturna ( $\Delta T_{u-r(max)}$ ) do modelo adaptado para  $Z_0 \geq 2,0$ :

Se  $Z_0 \geq 2,0$ :

$$\Delta T_{(u-r)max} = 0,5128 (7,45 + 3,97 \ln (H/W)) + 0,6142 \quad (\text{Eq. 5.3})$$

Então:

$$\Delta T_{(u-r)max} = 4,4345 + 2,0358 \ln (H/W) \quad (\text{Eq. 5.4})$$

Analisando ainda o gráfico da Figura 5.3, constata-se que as configurações urbanas que estão na faixa de ‘ $Z_0 = 2,39$  à  $15,98$ ’ e H/W de 0,28 a 0,76 apresentam parte de seus resultados de ICU máxima medida na mesma faixa de valores que as configurações urbanas



que estão na faixa de ' $Z_0 = 0,39$  à  $1,23$ ' e  $H/W$  de  $0,16$  a  $0,28$ . Em outras palavras, cânions que apresentam maior rugosidade, mesmo que com valores médios de relação  $H/W$  maiores que os de cânions mais baixos e homogêneos (menor rugosidade), interferem nas máximas grandezas de ilhas de calor noturnas, amenizando-as. Isso pode ser explicado pelo seu maior efeito no sombreamento, que reduz o armazenamento de calor por radiação de onda curta e, conseqüentemente, diminui a liberação de calor no período noturno, através da radiação de ondas longas. Além disso, o sombreamento causa zonas de alta e baixa pressão, provocando a ventilação.

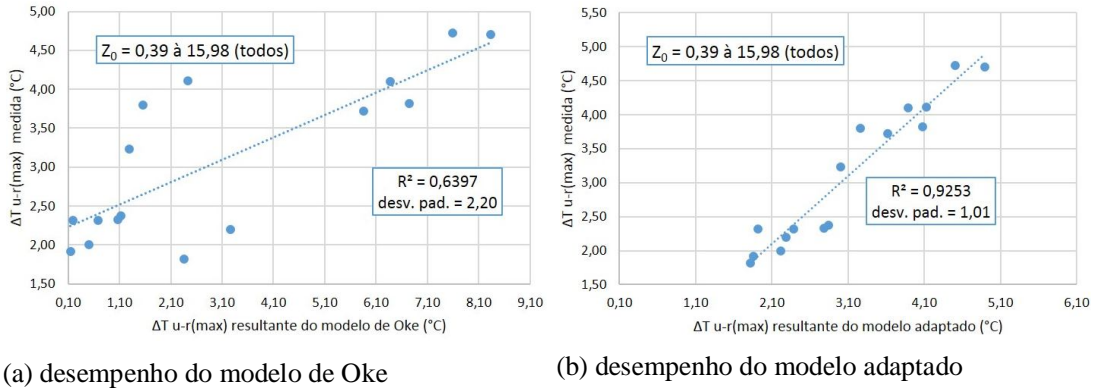
A diferença de tendência notada entre as duas faixas de  $Z_0$  apresentadas serviu como um parâmetro adicional para a calibração do modelo de Oke para as cidades analisadas neste estudo. Como os dados reais das cidades estudadas apresentam uma lacuna de valores de  $Z_0$  entre  $1,23$  e  $2,39$ , essa lacuna pode gerar problemas de faltas de valores na simulação. Para que isso fosse evitado, foram extrapolados os valores possíveis de  $Z_0$  na inserção das equações no código da ferramenta. Essa extrapolação considera valores de  $Z_0$  menores que ' $2,0$ ' para o primeiro grupo, e os maiores ou iguais à  $2,0$  para o segundo grupo.

Entretanto, deve ficar claro que os testes com o modelo para dados reais foram realizados somente para as faixas de  $Z_0$  entre  $0,39$  e  $1,23$  para o primeiro grupo e entre  $2,39$  e  $15,98$  para o segundo grupo, sendo esses os valores de rugosidade encontrados nas áreas de estudo. A ferramenta, portanto, não garante dados validados para as áreas simuladas nas faixas de  $Z_0$  abaixo de  $0,39$ , de  $1,23$  à  $2,39$ , e acima de  $15,98$ , mas apenas uma possível tendência com base na calibração do modelo.

## **5.2. Desempenho do modelo adaptado**

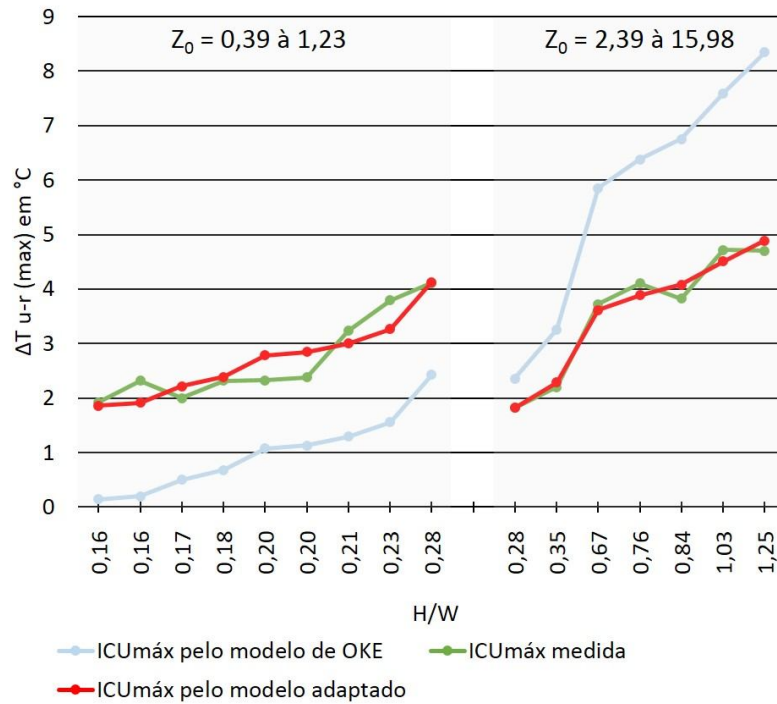
O modelo adaptado forneceu resultados de maior correlação com dados medidos do que aqueles calculados pelo modelo de Oke. Durante a validação, foi verificado que, para a totalidade dos pontos, os dados simulados pelo modelo de Oke resultaram em um  $R^2$  de  $0,63$  com desvio padrão de  $2,20$  (Figura 5.6a). Os dados simulados pelo modelo adaptado resultaram em um  $R^2$  de  $0,92$ , com desvio padrão de  $1,01$  (Figura 5.6b) e diferença média de erro de  $0,34^\circ\text{C}$ .

Figura 5.6: Correlação de dados antes e depois da validação revelando o desempenho do modelo adaptado em relação ao modelo de Oke



O ajuste dessa curva de dados simulados pode ser verificado no gráfico da Figura 5.7, em que a curva de ICUmáx pelo modelo adaptado se aproxima significativamente da curva de ICUmáx medida.

Figura 5.7: Intensidade máxima de ICU simulada pelo modelo de Oke e pelo modelo adaptado, e obtida em medição



### 5.3. Influência da geometria urbana nas ilhas de calor

Os resultados obtidos da simulação proposta (Figura 5.8 e Tabela 5.3) demonstram que todos os cenários de  $Z_0 < 2,0$  apresentaram valores de ICU máxima maiores do que os calculados pelo modelo de Oke. Em média, foram encontradas diferenças de, aproximadamente,  $1,66^\circ\text{C}$  acima dos valores calculados pelo modelo de Oke. As curvas representativas dos 2 modelos apresentam-se praticamente equidistantes entre si em toda a sua extensão. Em outras palavras, o modelo de Oke subestimou valores de máxima ICU para essa faixa de  $Z_0$ .

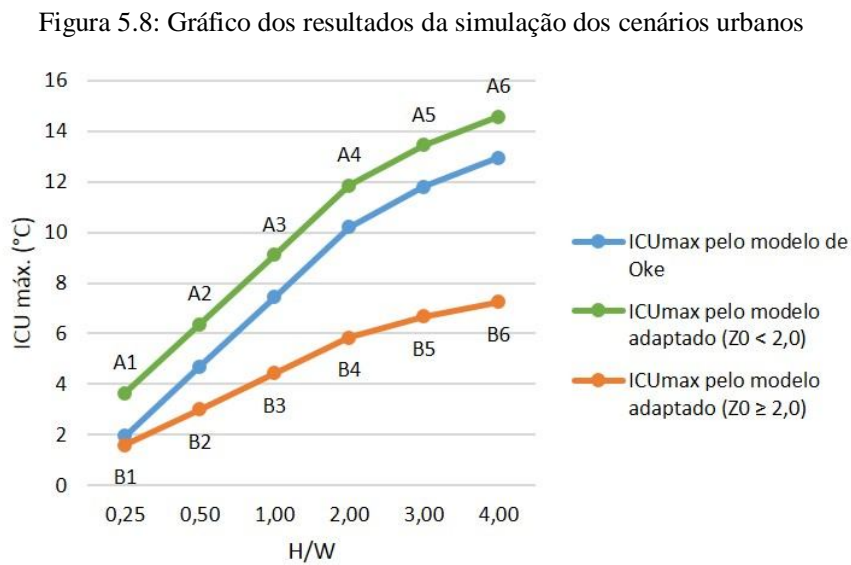


Tabela 5.3: Resultados da simulação dos cenários urbanos

Faixa de $Z_0$	Quadra	$Z_0$	H/W	ICU <sub>máx</sub> modelo Oke	ICU <sub>máx</sub> modelo adaptado
< 2,0	A1	0,89	0,25	1,95	3,65
	A2	1,57	0,50	4,70	6,38
	A3	1,83	1,00	7,45	9,11
	A4	1,82	2,00	10,20	11,84
	A5	1,80	3,00	11,81	13,44
	A6	1,90	4,00	12,95	14,57
≥ 2,0	B1	2,67	0,25	1,95	1,61
	B2	2,67	0,50	4,70	3,02
	B3	3,09	1,00	7,45	4,43
	B4	5,00	2,00	10,20	5,85
	B5	11,46	3,00	11,81	6,67
	B6	13,75	4,00	12,95	7,26

Com relação aos resultados obtidos pela simulação de cenários de  $Z_0 \geq 2,0$ , todos os valores de ICU máxima ficaram abaixo dos simulados pelo modelo de Oke, mas com diferenças que variaram de  $0,34^\circ\text{C}$  a  $5,69^\circ\text{C}$  (para os valores de H/W simulados). Houve uma tendência de maior diferença quanto maior foi a relação H/W.

Em todos os valores de relação H/W simulados, a intensidade máxima de ICU para cenários de menor rugosidade ( $Z_0 < 2,0$ ) foi maior que dos cenários de maior rugosidade ( $Z_0 \geq 2,0$ ), com diferenças que variaram de  $2,04^\circ\text{C}$  a  $7,31^\circ\text{C}$ , a medida que o valor de relação H/W aumenta. Considerando a equação de cálculo de comprimento de rugosidade (Eq. 4.2), para os mesmos valores de relação H/W, cenários urbanos em que predominam edifícios com maior área ocupada em relação à área de fachada tendem a apresentar valores de ICU máx maiores do que os estimados pelo modelo de Oke. Para os cenários urbanos em que as áreas das fachadas dos edifícios são predominantemente maiores que as áreas ocupadas pelos mesmos, para os mesmos valores de relação H/W, os valores de ICU máx tendem a ser menores que os simulados pelo modelo de Oke, com tendência a se distanciarem a medida que a relação H/W aumenta.

Realizando uma análise mais pontual, para os cenários de relação H/W = 2,0, por exemplo, verifica-se que mesmo os dois cenários simulados possuindo o mesmo valor médio de relação H/W, o cenário de  $Z_0 < 2,0$  possui ICU máx ( $\sim 12^\circ\text{C}$ ) duas vezes maior que o cenário de  $Z_0 \geq 2,0$  ( $\sim 6^\circ\text{C}$ ). Essa relação de ICU máx ser, aproximadamente, duas vezes maior de ‘cenários  $Z_0 < 2,0$ ’ para ‘cenários  $Z_0 \geq 2,0$ ’ se repete para todos os valores de H/W simulados. O modelo adaptado sugere, então, que cânions urbanos de mesma relação H/W média, mas com diferentes valores  $Z_0$ , podem apresentar ilhas de calor com diferenças até duas vezes maior para cânions com edifícios de ocupação mais densa e homogêneos do que para cânions mais heterogêneos com edifícios mais altos (de maiores áreas de fachada).

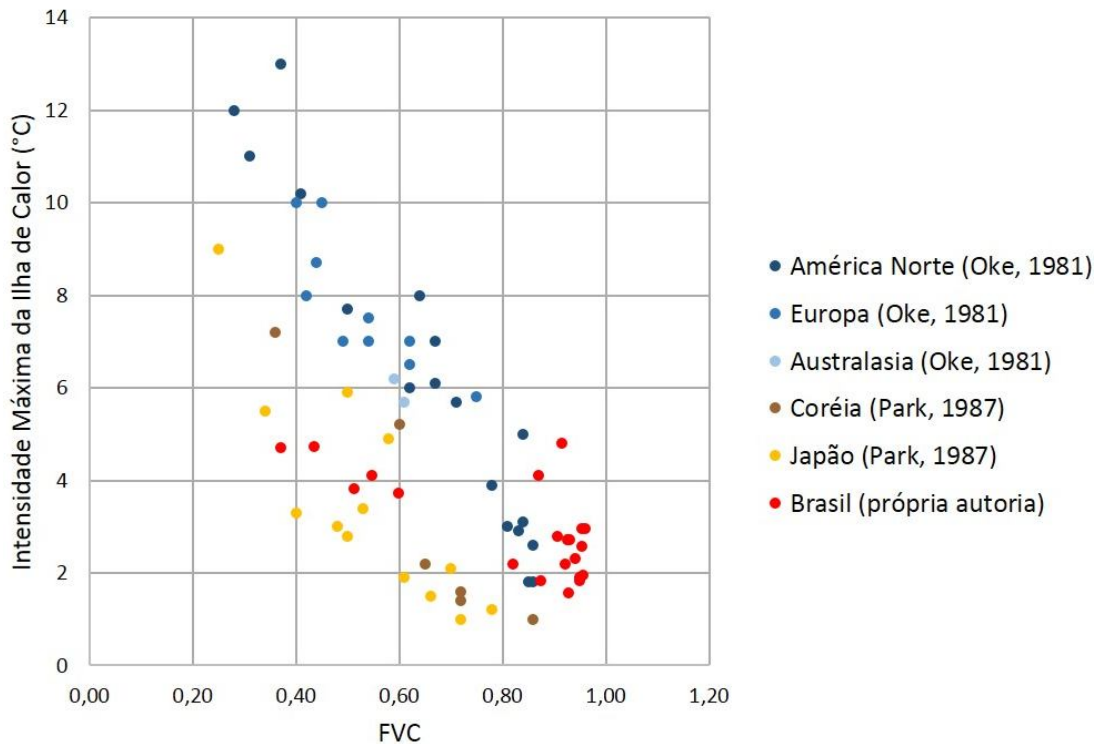
A calibração do modelo, entretanto, se baseou em dados de relação H/W de 0,15 a 1,25. Portanto, os valores obtidos da simulação para as relações H/W de 2,00, 3,00 e 4,00 são previsões com base na extrapolação da calibração do modelo realizada para os dados de geometria urbana medidos.

#### **5.4. Discussões, contribuições e desdobramentos**

Apenas para promover a reflexão sobre os resultados e compará-los com aqueles encontrados em literatura, esse tópico aponta algumas discussões, identificando em algumas referências bibliográficas questões que respaldam os resultados aqui alcançados.

Uma das contribuições dessa tese, além da adaptação do modelo de Oke para uma ferramenta computacional, é a sua validação para algumas cidades brasileiras. Nota-se no gráfico da Figura 5.9 que, em um estudo posterior ao de 1981, Oke et al. (1991) acrescentou novos dados de intensidade máxima de ilha de calor de outros países (Coréia e Japão – Park, 1987), os quais apresentaram uma tendência diferenciada em relação aos dados que serviram de base para a elaboração de seu modelo (dados da América do Norte, Europa e Australasia – Oke, 1981).

Figura 5.9: Relação entre a intensidade máxima da ilha de calor observada em levantamentos de campo e o fator de visão do céu de suas áreas. Os dados da América do Norte, Europa e Australasia são de Oke (1981). Os dados da Coréia e Japão são de Park (1987). E os dados do Brasil (cidades de São José do Rio Preto e Bauru) são provenientes desta tese.



Fonte: adaptado de Oke et al. (1991)

Para efeito de comparação dos resultados aqui alcançados, foram acrescentados nesse mesmo gráfico, os dados obtidos do levantamento para esta tese (das cidades brasileiras: São José do Rio Preto e Bauru). Esses dados apresentam uma tendência mais semelhante àqueles levantados por Park (1987). Para demonstração, os dados de geometria urbana das cidades brasileiras foram convertidos de relação H/W para FVC. Para isso utilizou-se o mesmo

método de Oke (1981), que considera, por simplificação, o FVC em um ponto central entre duas paredes como:  $\psi_{sky} = \cos \beta$ , onde  $\beta$  é o ângulo de elevação da parede ( $\beta = \tan^{-1}(H/0,5.W)$ ).

Neste caso, é notável que em algumas localidades, a tendência de aumento da intensidade máxima da ilha de calor não é tão elevada em relação à diminuição do FVC (ou ao aumento de relação H/W), como o que fora apresentado pelo modelo de Oke (1981). Assim, para valores de FVC entre 0,30 e 0,60 (correspondente a valores de relação H/W entre 0,67 e 1,60), os dados apresentados pelas cidades brasileiras se aproximam mais dos obtidos na Coreia e Japão por Park (1987).

Cabe nesse contexto acrescentar que, recentemente, Souza et al. (2010) propuseram uma adaptação do modelo de Oke (1981) para as condições encontradas em um bairro residencial na cidade de Bauru-SP, com base nas informações levantadas da área de estudo. Aqueles autores propuseram que o modelo de Oke tivesse a aplicação direta para os valores de FVC acima de 0,82. E, especificamente para a faixa entre 0,68 e 0,82, deveria ser aplicada uma equação de correção.

Souza et al. (2010) verificaram uma tendência de maiores erros de estimativa de intensidade de ilha de calor pelo modelo de Oke à medida que os FVC são menores. Uma explicação viável encontrada pelos autores para esse resultado foi a não uniformidade das edificações no meio urbano e as diferentes massas térmicas dos cânions. Essa mesma tendência pode ser também verificada no gráfico da Figura 5.9, observando que, apesar de na faixa de FVC mais alta (de 0,80 a 1,00) os dados das cidades brasileiras estarem próximos dos dados obtidos por Oke, na faixa de FVC mais baixa (de 0,30 a 0,60), os pontos dos dados das cidades brasileiras encontram-se bem afastados dos pontos de dados de Oke. Isso sugere que, imaginando-se uma linha de tendência, os dados das cidades brasileiras na faixa intermediária (de 0,60 a 0,80) também apresentariam erros de estimativa pelo modelo de Oke, o que corrobora os resultados obtidos por Souza et al. (2010).

Tendências diferenciadas da curva de intensidade da ICU em relação ao modelo de Oke (1981) podem ser encontradas também em estudos na Inglaterra, cidade de Grande Manchester (LEVERMORE e CHEUNG, 2012) e nos Países Baixos, cidade de Roterdão (THEEUWES et al., 2014). Levermore e Cheung (2012), através de um simples modelo matemático desenvolvido, verificaram uma tendência crescente, assim como no modelo de Oke, mas também com menor ângulo de inclinação. Theeuwes et al. (2014) verificaram um aumento da ICU com a relação H/W até esse assumir o valor de 2,0, se tornando constante após esse valor.

Os resultados encontrados nas simulações com cenários hipotéticos nesta tese demonstraram que o aumento de rugosidade não indica uma situação de maior ilha de calor. Os cenários urbanos com rugosidade maior que 2,0 apresentaram uma tendência de aumento da ICU máxima menos acentuada que a dos cenários com rugosidade menor, sendo, neste caso, somente avaliado o parâmetro ‘geometria urbana’. Gonçalves et al. (2011) constataram que formas urbanas associadas a altas densidades populacionais (com o limite de 2.500 pessoas por hectare) não implicam necessariamente em baixa qualidade ambiental do espaço urbano. Aqueles autores destacaram que o desempenho da forma urbana, caracterizado pelo sombreamento e a ventilação urbana, provocados pelas alturas e proximidades entre os edifícios e as irregularidades da forma, é compatível e desejável para as condições particulares do clima tropical de altitude da cidade de São Paulo.

Kakon et al. (2010) investigaram os efeitos da altura de edifícios no conforto térmico urbano durante o período diurno no verão em Dhaka, Bangladesh, que é uma cidade de alto adensamento localizada em uma zona de clima tropical. Os resultados das simulações mostraram que o aumento na altura dos edifícios do cânion (8-10 andares), em relação ao cânion existente (4-5 andares), forneceu uma condição mais confortável durante o dia.

Dessa forma, verifica-se, tanto nesta tese quanto em outros estudos, que há uma limitação na aplicação do modelo de Oke, conforme as condições climáticas. Apesar disso, em todos os estudos, parece evidente que o aumento da ICU é diretamente proporcional ao aumento da relação H/W. Como qualquer modelo desenvolvido com base empírica, é necessário sempre uma validação antes de sua aplicação em determinado local.

A ferramenta computacional desenvolvida nesta tese amplia as possibilidades de simulação em outras localidades e inserção de equações de adaptação do modelo para cada situação em que seja necessária.

Alguns estudos envolvendo o cálculo de relação H/W consideram apenas a largura da rua ou baseiam-se apenas em uma referência de foto aérea. Nesse sentido, outro potencial da ferramenta desenvolvida nesta pesquisa é a possibilidade de se calcular com mais precisão a variação das distâncias entre fachadas de edifícios. Além disso, a inclusão de mais um parâmetro de interpretação da geometria urbana (o comprimento de rugosidade) incorpora aos cálculos, os parâmetros: áreas ocupadas e áreas de fachadas dos edifícios.

No entanto, o fato dessa ferramenta de cálculo isolar o papel da geometria urbana acarreta em uma limitação de análise, pois descarta outros parâmetros que influenciam na formação da ilha de calor. Em contrapartida, a sub-rotina em si traz como vantagem, maior velocidade de simulação e a facilidade de inserção de dados de entrada. Além disso, serve

como um primeiro embrião para que pesquisas futuras possam incorporar à sub-rotina outros parâmetros de análise.

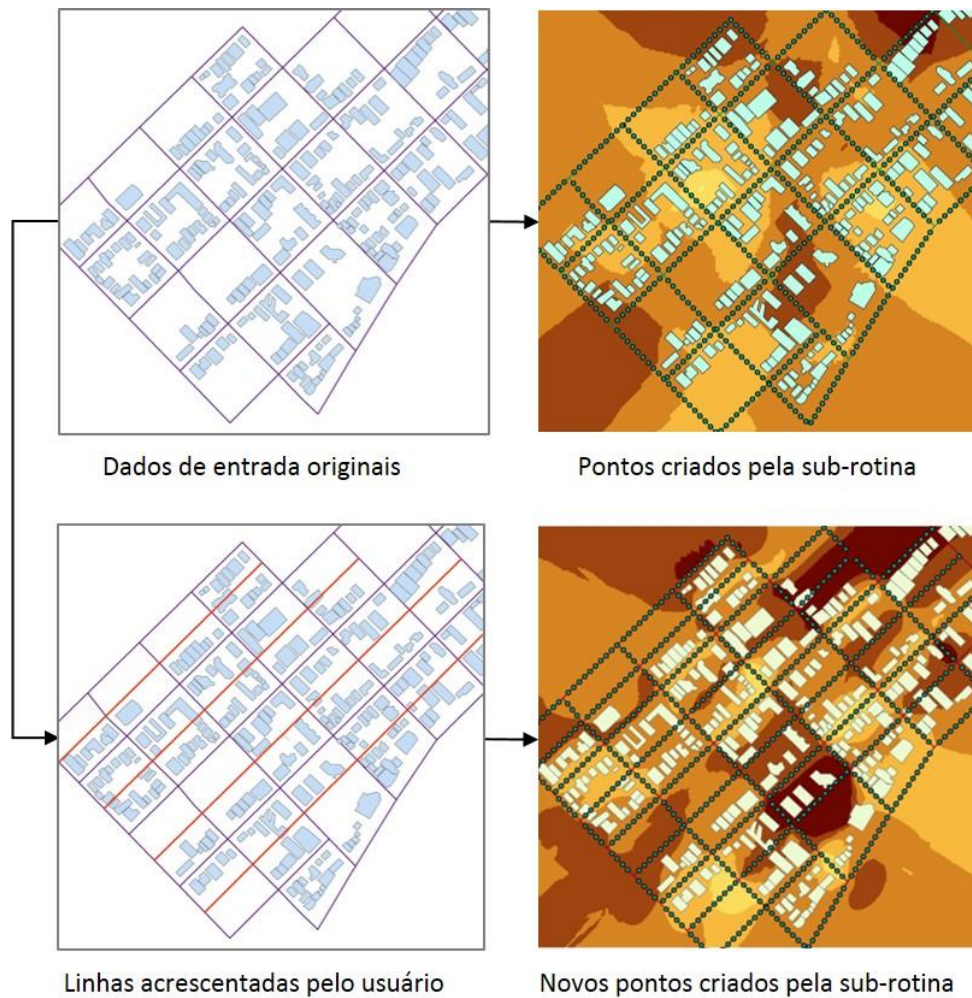
Para se obter um mapa de resultados de simulações com a THIS com um maior grau de detalhamento, é interessante que o usuário não se limite a colocar linhas de eixos sobre as vias, mas sim acrescentar linhas extras nos centros das quadras, mesmo que estas não estejam localizadas sobre ruas. Dessa forma, a sub-rotina irá realizar o cálculo para um maior número de linhas, cujos resultados serão transportados para um número maior de pontos representativos.

É importante destacar que na ferramenta THIS cada nova linha deve fazer intersecção com outras para que a sub-rotina consiga fazer a delimitação de áreas de cálculo. Ao mesmo tempo, é recomendável que essas linhas não façam intersecção com os polígonos representativos dos edifícios, pois isso pode levar a erros de cálculo para aquele trecho da linha.

No caso do usuário fazer a opção em traçar linhas extras, que interseccione os centros de quadras, a sub-rotina, além de criar pontos extras centrais às quadras, também duplicará os resultados das linhas de eixo das vias, pois cada objeto 'linha' de saída é definido pelas intersecções entre linhas no desenho (Figura 5.10).

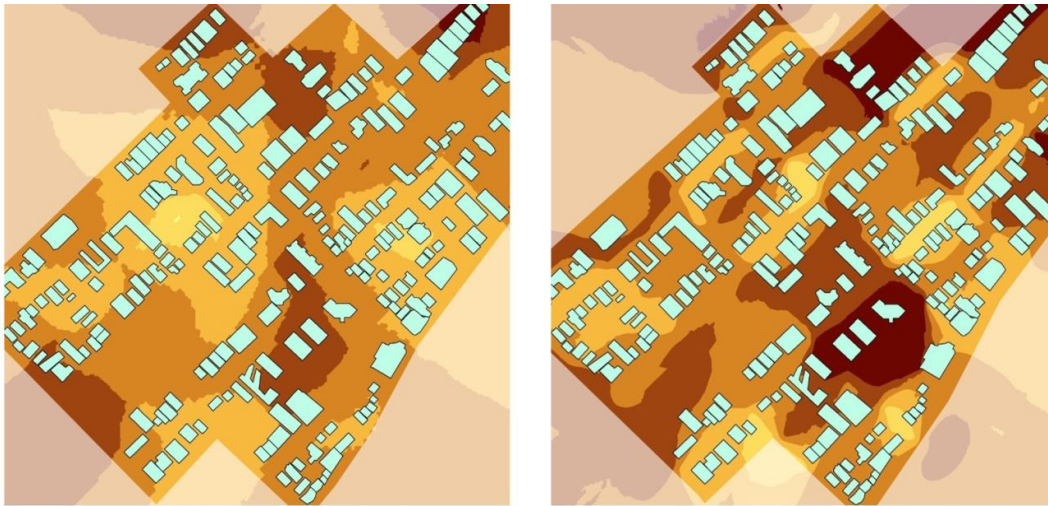


Figura 5.10: Exemplo de manipulação de dados de entrada para obtenção de mapa de resultados para um maior número de pontos pela ferramenta THIS.



Desta forma, o mapa resultante da interpolação de dados oferece a visualização, com maior precisão, da previsão de tendências de desenvolvimento de intensidades máximas da ICU alcançadas na malha urbana, inclusive, em pontos localizados nos centros de quadras (Figura 5.11). Como o método de krigagem para a geração de mapas de interpolação de dados aceita somente valores provenientes de objetos ‘pontos’, os dados de saída armazenados pelas linhas de eixos são transferidos para os seus pontos correspondentes. Esse mesmo mapa pode também, a critério do usuário, ser visualizado de forma tridimensional através do programa ArcScene (Figura 5.12).

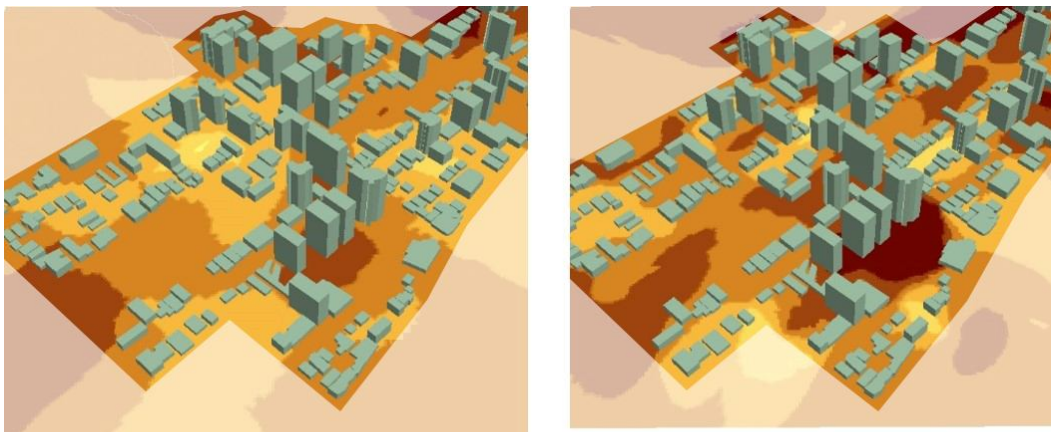
Figura 5.11: Exemplo de mapa de interpolação de resultados de simulação com o THIS no ArcMap



Resultado com linhas de eixos originais

Resultado com linhas de eixos acrescentadas nos centros das quadras

Figura 5.12: Exemplo de mapa de interpolação de resultados de simulação com o THIS no ArcScene



Resultado com linhas de eixos originais

Resultado com linhas de eixos acrescentadas nos centros das quadras

## 6. CONCLUSÕES

Esta tese propôs a verificação da influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilhas de calor noturnas com o uso de uma ferramenta computacional, desenvolvida como extensão de um SIG. O modelo simplificado de Oke (1981), incorporado à sub-rotina de cálculo, foi adaptado para fornecer resultados mais aproximados à realidade de duas cidades brasileiras, as quais serviram de base para a calibração do modelo. A comparação entre dados reais e simulados pelo modelo de Oke mostraram uma diferença no aumento da intensidade máxima da ICU em função da relação H/W e da faixa de  $Z_0$ .

O levantamento de dados, com fins de validação da ferramenta desenvolvida, demonstrou que existe uma tendência de aumento de intensidade máxima de ICU, à medida que se aumenta a relação H/W. A  $ICU_{máx}$  aumentou de  $\sim 2^\circ\text{C}$  para  $\sim 4^\circ\text{C}$  nas relações H/W de 0,16 à 0,28, para a faixa de  $Z_0 = 0,39$  à 1,23, e aumentou de  $\sim 2^\circ\text{C}$  para  $\sim 8,5^\circ\text{C}$  nas relações H/W de 0,28 à 1,25, para a faixa de  $Z_0 = 2,39$  à 15,98. Esses dados, comparados aos resultantes da simulação com o modelo de Oke para os mesmos pontos, possibilitaram a validação da ferramenta de cálculo. Além disso, demonstram que a rugosidade da geometria urbana pode amenizar as intensidades de ICU para um mesmo valor de relação H/W.

Os resultados do levantamento de campo apresentados nesta pesquisa corroboram os encontrados por outros autores, no que diz respeito à validação do modelo de Oke (1981) para cidades sob condições diferenciadas. O modelo de Oke (1981), apesar de ser um modelo numérico com base em modelo físico, também baseia-se em estudo empírico, o que acaba exercendo uma influência de caráter local/regional sobre os valores simulados. Por isso, destaca-se aqui a importância de sua validação, antes de ser utilizado em simulações para determinadas condições climáticas.

A importância do modelo de Oke para o desenvolvimento de estudos climáticos é evidente e serve de base para muitos outros estudos. No entanto, em função das suas simplificações e limitações, o modelo de Oke subestimou valores de máxima ICU para cânions urbanos de  $Z_0 < 2,0$  e superestimou valores de máxima ICU para cenários de  $Z_0 \geq 2,0$ , na comparação entre dados simulados e medidos. A ferramenta foi validada, analisando-se a relação entre dados medidos e simulados pelo modelo de Oke e incorporando equações de correção à sub-rotina de cálculo. Desta forma, foi obtido o modelo adaptado, e concluída a ferramenta THIS.

Os dados simulados pelo modelo adaptado de THIS apresentaram uma boa correlação com os dados de medição, com  $R^2$  de 0,92 e desvio padrão de 1,01, evidenciando

a importância do processo de validação da ferramenta para simulações de cenários em diferentes cidades.

Além disso, este estudo traz como contribuição, a verificação de que, para um mesmo valor de relação H/W, cânions urbanos com maiores áreas de fachadas e com alturas de edificações mais heterogêneas (maior rugosidade,  $Z_0 \geq 2,0$ ) resultam em valores de máxima ICU, aproximadamente, duas vezes menor em relação aos cânions mais homogêneos e com maiores áreas médias ocupadas pelas edificações (menor rugosidade,  $Z_0 < 2,0$ ). Essa diferença pode ser explicada pelos diferentes efeitos na turbulência do ar e nas áreas sombreadas provocados pela geometria urbana.

A geometria urbana interfere na formação de ilhas de calor de várias formas. Parâmetros como a altura, a área de fachada e a área ocupada de um edifício alteram a projeção de sua sombra, interferindo no balanço energético do microclima do cânion a que pertence, pela interceptação de recebimento da radiação de onda curta, ou barreira de liberação de calor através de radiação de onda longa. A rugosidade altera os fluxos de ventos, podendo a configuração das edificações em escala local, tanto vir a criar áreas de estagnação, quanto áreas de turbulência de ventos. Dessa forma, justifica-se a importância de um estudo mais aprofundado da geometria urbana como uma forma de mitigação das ilhas de calor.

Adotando-se a geometria urbana como único parâmetro de entrada, foi possível verificar o seu papel de forma isolada na intensidade de ilhas de calor urbana. No entanto, como vários outros parâmetros influenciam no fenômeno da ICU, a validação proposta nesta tese não pode ser aplicada indiscriminadamente em outras cidades. É recomendável que a ferramenta THIS seja antes validada para a região que se pretende simular. A tese apresentou o método de levantamento de dados e de validação, e a ferramenta foi concebida de forma a possibilitar a inserção de diferentes equações de correção. Desta forma, seu uso para simulações em outras localidades torna-se possível e abrangente.

Caso se pretenda prever a ICU para áreas urbanas que não estejam localizadas em vias, basta que o usuário represente uma linha que as atravesse, ampliando-se assim o número de objetos para os quais são calculadas as ICU e, conseqüentemente, aumentando-se a resolução do mapa de interpolação de dados de saída.

O desenvolvimento da ferramenta de cálculo amplia as possibilidades de simulações de intensidade máxima de ilha de calor baseada na geometria urbana em várias localidades, com a vantagem de ter a inserção de dados de entrada de forma simplificada. O algoritmo pode também ser ajustado de forma a possibilitar ao usuário a inserção de novas equações de correção, quando isso se fizer necessário. Além disso, a ferramenta THIS possibilita

simulações de previsão para adensamentos e alterações em formas de ocupação em um bairro, ou uma cidade.

Como a ferramenta foi desenvolvida em uma plataforma SIG, a interface com o usuário conta com as vantagens que essa possui, como: a representação dos objetos em camadas separadas e a leitura de dados de saída, tanto diretamente na tabela de atributos, quanto na forma gráfica. Os dados de saída são automaticamente armazenados em um banco de dados, o qual pode ser consultado em outro momento, após a simulação iniciada pelo usuário.

O desenvolvimento da ferramenta THIS pretende auxiliar pesquisadores e planejadores nas tendências de formação de ilhas de calor em diferentes cenários urbanos e sugere uma discussão mais aprofundada sobre a influência de diferentes configurações de geometria urbana na formação de ilhas de calor.

**REFERÊNCIAS**

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Numerical study on the effects of aspect ratio and solar orientation on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, v. 41, p. 94-108, 2006.

**ArcGIS Resource Center**. ArcObjects SDK 10 Microsoft .NET Framework. Disponível em: [http://help.arcgis.com/en/sdk/10.0/arcobjects\\_net/conceptualhelp/index.html](http://help.arcgis.com/en/sdk/10.0/arcobjects_net/conceptualhelp/index.html). Acesso em: 08.05.2014.

ARNFIELD, A. J. Review two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 23: 1-26. 2003.

ASSIS, Eleonora Sad. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista de Urbanismo e Arquitetura**, vol. 7, nº1. 2006. Disponível em: <http://www.portalseer.ufba.br/index.php/rua/article/viewArticle/3149>. Acesso em: 28.06.2015.

ATKINSON, B. W. Numerical modelling of urban heat-island intensity. **Boundary-Layer Meteorology**, 109(3): 285–310. 2003.

BALÁZS, B.; UNGER, J.; GÁL, T.; SÜMEGHY, Z.; GEIGER, J; SZEGEDI, S. Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. **Meteorological Applications**, vol. 16, nº 3, pp. 275-287. 2009.

BARBIRATO, G. M. Modelo de balanço de energia aplicado ao caso da cidade de Maceió – AL, e suas implicações para o planejamento urbano. ISSN 1982-9531. **Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG. Online)**, v. 3, p. artigo 8, 2010.

BOURBIA, F.; BOUCHERIBA, F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). **Renewable Energy**, v. 35, p. 343-347, 2010.

BRANDÃO, Rafael Silva; ALUCCI, Marcia Peinado. Impacto da ocupação urbana na ambiência térmica da cidade: estudo a partir do caso do bairro de Moema, São Paulo. **Anais...**

XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Búzios-RJ, 2011.

BRAZEL, A.; GOBER, P.; CLARKE, S. G.; MYINT, S.; QUAY, R.; MILLER, A. Q.; ROSSI, S.; GRIMMOND, S. Mitigating Urban Heat Island effects with water and energy sensitive urban designs. **Proceedings...**Joint between the Special Symposium on Aerosol-Cloud-Climate Interactions, the 11<sup>th</sup> Conference on Atmospheric Chemistry, the Fourth Symposium on Policy and Socio-Economic Research, the Eighth Symposium on the Urban Environment, and the Fourth Conference on the Meteorological Applications of Lightning Data. J7.3: 1-3. 2009.

BRUNT, D. **Physical and Dynamical Meteorology**, Cambridge University Press, London, p. 428. 1941.

BRUSE, Michael. Modelling and strategies for improved urban climate. **Proceedings...** International Conference on Urban Climatology & International Congress of Biometeorology, Sydney, 8-12. Nov, Australia, 6 pages. 1999. Disponível em: <http://envi-met.de/>

CHEN, H.; OOKA, R.; KATO, S. Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction. **Building and Environment** 43: 18-30. 2008.

**CIIAGRO**. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. Disponível em: <http://www.ciiagro.org.br/ema/>

CLARK UNIVERSITY. **IDRISI32**, Clark University Graduate School of Geography, 950 Main St. Worcester, MA 01610-1477, USA. 1999.

DUARTE, D. H. S.; SERRA, G. G. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlações e proposta de um indicador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p. 7-20, abr./jun. 2003.

**ENVI-met**. <http://www.envi-met.com/>. Acesso em: jan. 2013.

- FAHMY, M.; MOKHTAR, H.; GIRA, A. Adaptive urban form design on a climate change basis: a case study in Nuba, Egypt. **Proceedings...** ICUC8 – 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climates, 6<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> August, 2012, UCD, Dublin Ireland. 2012.
- FARIA, J. R. G.; MENDES, J. F. G. Sobre o uso e ocupação do solo urbano e a temperatura do ar. **Ambiente Construído** (São Paulo), Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 7-17, 2004.
- FONTES, M. S. G. C.; MATTOS, A. Análise da correlação entre temperatura do ar e elementos da estrutura urbana, na cidade de São Carlos – SP. In: II Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 1999, Fortaleza/CE. **Anais...** do II Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Fortaleza, 1999.
- FORTUNIAK, K. An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity. **Proceedings...** of the 5<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, K. Klyzik, T. R. Oke, K. Fortuniak et al., Eds., vol. 1, pp. 59-62, University of Lodz, Lodz, Poland. 2003.
- GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- GONÇALVES, J. C. S.; MULFARTH, R. K.; MONTEIRO, L. M.; MOURA, N. C.; PRATA, A. R.; MIANNA, A. C.; CAVALCANTE, R. Adensamento urbano e desempenho ambiental no centro da cidade de São Paulo. **Anais...** XI Encontro Nacional e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Búzios-RJ, 2011.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). **Journal of Applied Meteorology**, 41, 792-810. 2002.
- HAMDI, Rafiq. Estimating Urban Heat Island Effects on the Temperature Series of Uccle (Brussels, Belgium) Using Remote Sensing Data and a Land Surface Scheme. **Remote Sensing**. Vol. 2, p. 2773-2784, doi:10.3390/rs2122773. 2010.



HAN, Soo-Gon; MUN, Sun-Hye; HUH, Jung-Ho. Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. **Building Simulation**. 2007.

HOWARD, L. **The climate of London**. V I-III, London.1833.

**IBGE**. Mapa de climas do Brasil – IBGE (PDF). [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br).

**IPMET**. Instituto de Pesquisas Meteorológicas. <<http://www.ipmet.unesp.br/>>

JUSUF, S. K.; HIEN, W. N. Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore. **Proceedings...** Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands. September 19-23 2009.

KAKON, Anisha Noori; NOBUO, Mishima; KOJIMA, Shoichi; YOKO, Taguchi. Assessment of Thermal Comfort in Respect to Building Height in a High-Density City in the Tropics. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**. Vol 3, n. 3, p. 545-551, 2010.

KANDA, M. Progress in the scale modeling of urban climate: Review. **Theoretical and Applied Climatology** 84: 23-33. 2006.

KANDA, M.; KAWAI, T.; KANEGA, M.; MORIWAKI, R.; NARITA, K.; HAGISHIMA, A. Simple energy balance model for regular building arrays. **Boundary-Layer Meteorology** 116: 423-443. 2005.

KANDA, Manabu; MORIIZUMI, Takanobu. Momentum and Heat Transfer over Urban-like Surfaces. **Boundary-Layer Meteorology**. 131: 385-401. 2009. DOI 10.1007/s10546-009-9381-7

KRÜGER, Eduardo Leite. Impacto do adensamento e da orientação solar de cânions urbanos na demanda por condicionamento térmico de edificações sob condições de clima desértico. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 65-87, jan./mar. 2008.

LEME, F. T. **Fase B – Expansão da coleta de dados de fator de visão do céu e armazenamento**. Vinculado ao projeto “Verificação da influência da geometria urbana no consumo de energia elétrica em edificações por modelagem de redes neurais artificiais: Projeto CEU – Consumo de Energia Urbano”. Relatório de pesquisa. 2005.

LEVERMORE, G. J.; CHEUNG, H. K. W. A low-order canyon model to estimate the influence of canyon shape on the maximum urban heat island effect. **Building Services Engineering Research & Technology**, 2012, Vol. 33(4), pp. 371-385.

MARCIOTTO, Edson R.; OLIVEIRA, Amauri P.; HANNA, Steven R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, Volume 45, Issue 11, November 2010, Pages 2497-2505.

MARTINS, T. A. de L.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió, AL. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 213-233, out./dez. 2013.

MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. Classificação da estabilidade atmosférica para o planejamento microclimático do ambiente térmico urbano. In: 6º Congresso Luso-Brasileiro para Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável – PLURIS'14. 2014. Lisboa, Portugal. **Anais... PLURIS'14**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2014. p. 93 – 103.

MASIERO, Érico. Influência de corpos d'água em microclimas urbanos: estudo de caso em São José do Rio Preto – SP. **Tese** (Doutorado em Engenharia Urbana). Departamento de Engenharia Civil. Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

MASSON, V. Urban surface modeling and meso-scale impact of cities. **Theoretical and Applied Climatology** 84: 35–45. 2006.

MATZARAKIS, A. Validation of modeled mean radiant temperature within urban structures. **Proceedings...** AMS, Fourth Symposium on the Urban Environment, 20-24 May 2002, Norfolk, Virginia. Abs 7.3:72-73. 2002.

MEMON, R. A.; LEUNG, D. Y. C.; LIU, C. H. Effects of building aspect ratio and wind speed on air temperatures in urban-like street canyons. **Building and Environmet**, 2010; 45:176-188.

MILLWARD-HOPKINS, J. T.; TOMLIN, A. S.; MA, L.; INGHAM, D.; POURKASHANIAN, M. Estimating Aerodynamic Parameters of Urban-Like Surfaces with

Heterogeneous Building Heights. **Boundary-Layer Meteorology**. 141: 443-465. 2011. DOI 10.1007/s10546-011-9640-2.

MIRZAEI, Parham A.; HAGHIGHAT, Fariborz. Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations. **Building and Environment**, 45, 2192-2201. 2010.

MENDONÇA, Francisco; MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. **Clima Urbano**. São Paulo: Contexto, 2003. 192 p.

MORIWAKI, Ryo; KANDA, Manabu. Scalar Roughness Parameters for a Suburban Area. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, vol. 84, No. 6, pp. 1063-1071, 2006.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. The energy balance of an urban canyon. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 16, 11-19. 1977.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2 nd ed. London and New York: Routledge. 1987.

\_\_\_\_\_. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, vol. 1, 237-254. 1981.

\_\_\_\_\_. City size and the urban heat island. **Atmospheric Environment Pergamon Press**. Vol. 7, p. 769-779. 1973.

\_\_\_\_\_. Inadvertent modification of the city atmosphere and the prospects for planned urban climates. **Proc. Symp. Meteorol.** Related to Urban and Regional Land-Use Planning, Asheville, N.C., World Meteorol. Organiz., Geneva, 151-175. 1976a.

\_\_\_\_\_. Towards better scientific communication in urban climate. **Theoretical and Applied Climatology**, 84, 179-190. DOI 10.1007/s00704-005-0153-0. 2006.

\_\_\_\_\_. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. **Proceedings...** 27<sup>th</sup> NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Banff, 25-29 October, 2004.

\_\_\_\_\_. Street Design and Urban Canopy Layer Climate. **Energy and Buildings**. Vol. 11, p. 103-113. 1988.

\_\_\_\_\_. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, n. 4., p. 268-277. 1976b.

\_\_\_\_\_. The energetic base of urban heat island. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**. London. Elsevier Science. V. 108, p. 1-24, 1982.

\_\_\_\_\_. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. **Energy and Buildings**, vol. 7, no. 1, pp. 1-10. 1984

OKE, T. R.; JOHNSON, G. T.; STEYN, D. G.; WATSON, I. D. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night Part 2: diagnosis of causation. **Boundary-Layer Meteorology**, 56: 339-358, 1991.

OLIVEIRA PANÃO, Marta J. N.; GONÇALVES, Helder J. P.; FERRÃO, Paulo M. C. Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate. **Building and Environmet**, Volume 44, Issue 1, January 2009, Pages 177-187.

PARK, H. S. Variations in the Urban Heat Island Intensity Affected by Geographical Environments. **Environmental Research Center Papers**, Nº 11, University of Tsukuba, Ibaraki. 1987.

QUAN, Steven Jige; Li, Qi; AUGENBROE, Godfried; BROWN, Jason; YANG, Perry Pei-Ju. Urban Data and Building Energy Modeling: A GIS-Based Urban Building Energy Modeling System Using the Urban-EPC Engine. **Planning Support Systems and Smart Cities**, Chapter 24, pp 447-469. 2015.

ROCHA, Luciani Maria Vieira; SOUZA, Léa Cristina Lucas; CASTILHO, Francisco José Vigeta. Ocupação do solo e ilha de calor noturna em avenidas marginais a um córrego urbano. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 161-175, jul./set. 2011.

SANTO, M. A.; MAGGIOTTO, G.; STOCKER, J., CARRUTHERS, D.; SABATINO, S. Di. Comparison of ADMS-Temperature and Humidity model and ENVIMET and measured temperature values. **Proceedings...** ICUC8 – 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climates, 6<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> August, 2012, UCD, Dublin Ireland.2012.

SCHRIJVERS, P. J. C.; JONKER, H. J. J.; KENJERES, S.; ROODE, S. R. Breakdown of the night time urban heat Island energy budget. **Building and Environment** 83, 50-64. 2015.

SILVA, Antônio Nelson Rodrigues da; RAMOS, Rui António Rodrigues; SOUZA, Léa Cristina Lucas de; RODRIGUES, Daniel Souto; MENDES, José Fernando Gomes. **SIG -**

**Uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes.** 1. ed. São Carlos: Ed. Dos Autores. 2004. 227p.

SOUZA, L. C. L. Relações entre ilhas de calor, geometria urbana e consumo de energia elétrica. **Fórum Patrimônio: Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG. Online)**, v. 3, p. artigo 9, 2010.

SOUZA, L. C. L.; TENENTE, C. M.; GIUNTA, M. B.; NAKATA, C. M. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 155-167, out./dez. 2010.

SOUZA, Léa C. L.; RODRIGUES, Daniel S.; MENDES, José F. G. The 3dskyview extension: an urban geometry access tool in a geographical information system. **International Conference on Urban Climate**, 5, Lodz, 2003 – “Fifth International Conference on Urban Climate (ICUC-5): proceedings”. [S.I.: s.n, 2003].

**STEVE.** Tion, H., Jusuf, S. K., Wong, N. H. Air Temperature Prediction Models and Screening Tool for Estate Environment Evaluation (STEVE) Tool within Estate Level Urban Climatic Mapping Method in Singapore. NUS National University of Singapore. Disponível em: <http://ilo.technologypublisher.com/technology/4400>. Acesso em: jan. 2013.

STEWART, I. D. Redefining the urban heat island. **Ph.D. dissertation**, Department of Geography, University of British Columbia, 352 pp. (Available online at <https://circle.ubc.ca/handle/2429/38069>). 2011.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 93, 1879-1900. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. 2012.

STEWART, I. D.; OKE, T. R. Thermal differentiation of local climate zones using temperature observations from urban and rural field sites. Extended Abstracts, Ninth Symp. on Urban Environment, Keystone, CO, **American Meteorological Society**, 1.1. (Available online at <http://ams.confex.com/ams/19Ag19BLT9Urban/webprogram/Paper173127.html>). 2010.

- STEYN, D. G. The calculation of view factors from fish-eye lens photographs. **Atmosphere-Ocean**, 18:3, p. 254-258. 1980. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/07055900.1980.9649091>
- STULL, R. An Introduction to boundary layer meteorology. **Atmospheric and Oceanographic Sciences Library**, v. 13, 1988.
- SUGAWARA, Hirofumi; NARITA, Ken-ichi. Roughness length for heat over an urban canopy. **Theoretical and Applied Climatology**. 95: 291-299. 2009. DOI 10.1007/s00704-008-0007-7
- SUMM**. Disponível em: [http://www.ide.titech.ac.jp/~kandalab/SUMM/summ\\_main.html](http://www.ide.titech.ac.jp/~kandalab/SUMM/summ_main.html). Acesso em: jan. 2013.
- SUMMERS, P. W. An urban ventilation model applied to Montréal. **Tese de doutorado**, McGill University, Montréal. 1964.
- SVENSSON, M. K.; THORSSON, S.; LINDQVIST, S. A geographical information system model for creating bioclimatic maps – examples from a high, mid-latitude city. **International Journal of Biometeorology**, 47: 102-112. DOI 10.1007/s00484-002-0150-2. 2003.
- SVENSSON, M.; ELIASSON, I.; HOLMER, B. A GIS based empirical model to simulate air temperature variations in the Göteborg urban area during the night. **Climate Research**, vol. 22, no. 3, pp. 215-226. 2002.
- THEEUWES, N. E.; STEENEVELD, G. J.; RONDA, R. J.; HEUSINKVELD, B. G.; van Hove, L. W. A.; HOLTSLAG, A. A. M. Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, 140: 2197-2210, 2014.
- TOPARLAR, Y.; BLOCKEN, B.; VOS, P.; VAN HEIJST, G. J. F.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T.; MONTAZERI, H.; TIMMERMANS, H. J. P. CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergolder Zuid, Rotterdam. **Building and Environment**, 83, 1-12. 2014.

TSO, C. P.; CHAN, B. K.; HASHIN, M. A. An improvement to the basic energy balance model for urban thermal environment analysis. **Energy and Buildings**, n. 14, p. 143-152. 1990.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Assessment of International Urban Heat Island Research. Review and Critical Analysis of International UHI Studies. November 14, 2009. **Building Technologies Program**. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/>. Acesso em: jan. 2013.

UNGER, J.; SAVIC, S.; GÁL, T. Modelling or the Annual Mean Urban Heat Island Pattern for Planning of Representative Urban Climate Station Network. **Advances in Meteorology**. Volume 2011, Article ID 398613, 9 pages. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2011/398613>. Acesso em: jan.2013.

ZAKI, Sheidk Ahmad; HAGISHIMA, Aya; TANIMOTO, Jun; IKEGAYA, Naoki. Aerodynamic Parameters of Urban Building Arrays with Random Geometries. **Boundary-Layer Meteorology**, 138: 99-120. 2011. doi: 10.1007/s10546-010-9551-7.

ZINZI, M.; CARNIELO, E.; MARINELLI, E. Thermal and solar characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures. **Proceedings...** ICUC8 – 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climates, 6<sup>th</sup>-10<sup>th</sup> August, 2012, UCD, Dublin Ireland. 2012.

ANEXOS

Anexo 1 – Base teórico-numérica: o modelo de Oke (1981).

Quadro A.1: Fórmulas e equações apresentadas por Oke (1981).

	Fórmulas de base física (F) / Equações deduzidas dos experimentos (E)	Descrição das variáveis
F	$L^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \quad (1)$ $L^* = \Delta Q_S \quad (2)$	$L^*$ - densidade de fluxo radiativo líquido de ondas longas (W/m <sup>2</sup> ); $Q_H$ e $Q_E$ - densidades de fluxo de calor sensível e latente devido a turbulência (W/m <sup>2</sup> ); $\Delta Q_S$ - densidade do fluxo de calor de superfície devido às trocas líquidas de calor armazenado no solo subjacente (W/m <sup>2</sup> ).
F	$\Delta T(t) = -\frac{2}{\pi^{\frac{1}{2}}} \frac{L^*}{\mu} t^{\frac{1}{2}} \quad (3)$	$\Delta T$ - temperatura superficial total (°C); $t$ - tempo (min); $\mu$ - admitância térmica (raiz quadrada do produto da condutividade térmica do corpo e a capacidade volumétrica do calor – J.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1/2</sup> . K. <sup>-1</sup> ).
F	$\frac{\Delta T}{L^*} = -\left(\frac{2}{\pi^{\frac{1}{2}}\mu}\right) t^{\frac{1}{2}} \quad (4)$	Rearranjando (3)
F	$L^* = L\downarrow - L\uparrow = \sigma T_s^4 - \sigma T_r^4 \quad (5)$	$L\downarrow$ e $L\uparrow$ são as densidades do fluxo de radiação de onda longa recebidas do ‘céu’ e emitidas pela superfície ‘rural’ (W/m <sup>2</sup> ); $T_s$ e $T_r$ são as temperaturas de superfície absolutas correspondentes (°C); $\sigma$ é a constante de Stefan-Boltzmann (W. m <sup>-2</sup> . K <sup>-4</sup> ).
E	$\psi_w = 0,5 \cdot (\sin^2\theta + \cos\theta - 1) \cdot (\cos\theta)^{-1} \quad (6)$	$\psi_w$ - fator de visão da parede; onde $\theta = \tan^{-1}(H/0,5.W)$ .
E	$\psi_s = (1 - 2\psi_w) \quad (7)$	$\psi_s$ - fator de visão do céu.
E	$L_f^* = \psi_s (\sigma T_s^4) + 2\psi_w (\sigma T_w^4) - \sigma T_f^4 \quad (8)$	$L_f^*$ - radiação líquida de onda longa para um ponto no chão de um cânion (W/m <sup>2</sup> ); $T_w$ e $T_f$ são as temperaturas de superfície absoluta das paredes e piso (°C).
E	$\Delta T_{u-r} = AP^{\frac{1}{4}} \bar{u}^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$	$\Delta T_{u-r}$ - intensidade da ilha de calor (°C);
E	$\psi_{s(Phot)} = 0,15 + 0,87\psi_{s(H/W)} \quad (10)$	A - coeficiente empírico;
E	$\Delta T_{u-r(max)} = 1527 - 1388\psi_s \quad (11a)$	P - população da comunidade; $\bar{u}$ - velocidade de vento regional no nível 10m.



---

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \ln(H/W) \quad (11b)$$

---

Oke concluiu que o modelo ‘rural’ se comporta de maneira esperada e conforma-se bem com a situação observada no mundo real sob as condições estipuladas. Verificando as equações do Quadro A.1, para o modelo rural, na ausência de advecção, o equilíbrio de energia da superfície rural durante a noite pode ser dada por (1). No entanto, perto de condições calmas e sem nuvens, os termos turbulentos  $Q_H$  e  $Q_E$  tornam-se insignificantes (2). Dessa forma, a saída da energia radiativa é quase completamente fornecida pela remoção do calor a partir do armazenamento da superfície.

O resfriamento da superfície resultante corrobora a análise teórica de Brunt (1941), que mostra que em qualquer tempo (t) após o pôr do sol, a diminuição de temperatura superficial total ( $\Delta T$ ) é dada por (3).

Quando ambos  $L^*$  e  $\mu$  são razoavelmente constantes durante a noite, a temperatura da superfície (e o ar perto da superfície) diminui aproximadamente com a raiz quadrada do tempo. A estrutura de Brunt para condições calmas e claras (3) destaca o fato de que as diferenças de refrigeração são devido a diferenças na emissão líquida de ondas longas e/ou admitância térmica entre ambientes rurais e urbanos. O modelo em escala utilizado, e descrito a seguir, é adequado para investigar o papel desses controles.

Esse modelo físico foi construído em madeira dentro de uma câmara de polietileno, constituindo uma forma semelhante a um cubo de medidas 0,5 x 0,5 x 0,5m (Figura 3.1). O modelo ‘rural’ consistiu em uma pilha de seis folhas de madeira compensada, cada uma com dimensões de 0,5m x 0,5m x 12,5mm, colocadas no topo de uma folha de 50mm de espessura de espuma de poliestireno que atuou como isolante contra a condução de calor através da base do modelo.

Os modelos ‘urbanos’ consistiram da mesma base do modelo ‘rural’, menos o número de folhas que foram necessárias para construir a geometria do cânion. Esse processo de se equilibrar a quantidade de madeira que é removida da base e adicionada como blocos de ‘cidade’ foi importante para que todos os modelos fossem construídos com o mesmo volume do mesmo material.

Para simular a diferença no tempo de arrefecimento urbano-rural, os modelos que, inicialmente, estavam submetidos à temperatura ambiente de, aproximadamente, 20°C, foram mergulhados em uma câmara fria com temperatura de ar de, aproximadamente, 8°C. As relações H/W consideradas nos experimentos foram de 0,25, 0,5, 1, 2, 3 e 4 (Figura 3.2).

A temperatura da superfície do piso do cânion foi medida com um termopar, colocado no centro do cânion, evitando-se as intersecções. Os blocos utilizados para simular as edificações foram constituídos, em momentos diferentes do experimento, de madeira ou concreto.

Uma análise estatística mostrou semelhança entre as curvas de arrefecimento dos dados de campo e obtidos pelo modelo, pelos valores de admitância térmica (Tabela A.1), que são consistentes com os materiais semelhantes.

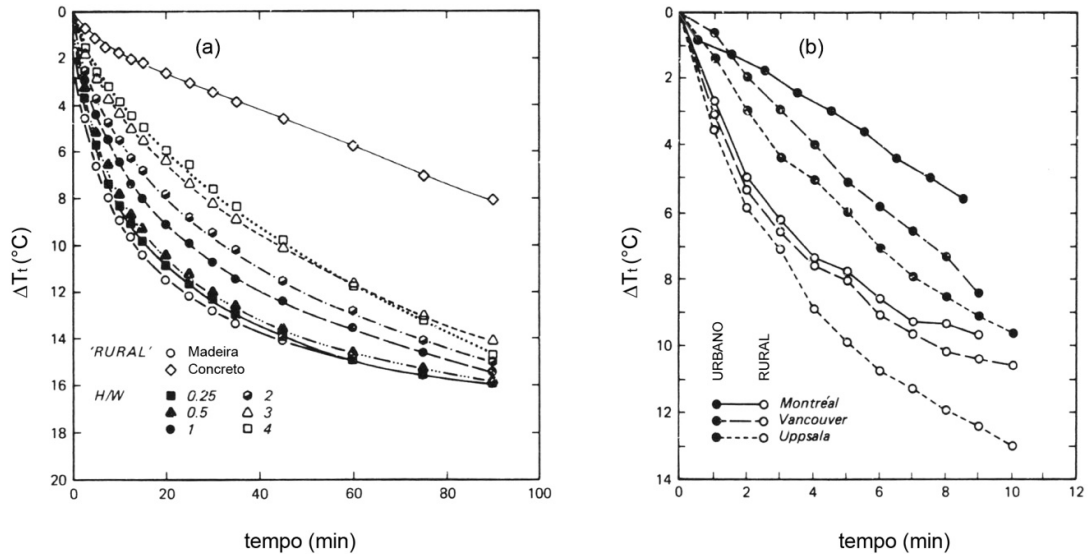
Tabela A.1 - Valores típicos de admitância térmica ( $\mu$ ) para superfícies rurais e urbanas, incluindo valores para materiais e modelos usados no experimento de Oke (1981)

Superfície	$\mu(Jm^{-2}s^{-\frac{1}{2}}K^{-1})$			$\mu(Jm^{-2}s^{-\frac{1}{2}}K^{-1})$	
	Típico	Gama		Típico	Gama
Rural			Urbano		
(a) Materiais			(a) Materiais		
Neve	240		Madeira	380	200-540*
Solo de turfa	600	300-1.300*	Tijolo	1.070	
Solo arenoso	1.600	620-2.550*	Vidro	1.110	
Solo argiloso	1.800	600-2.210*	Concreto	1.300	150-2.370*
Água (20°C)	1.580		Asfalto	1.300	1.230-1.680*
Rochas		1.700-3.400*	Sistema	1.730	
			Cânion		
			Pedra	2.220	
(b) Paisagens			(b) Paisagens		
Terras	1.600	1.000-2.000	Suburbana		800-1.700
agrícolas			Urbana		1.200-2.100
Misto – floresta, pântano, fazenda		1.600-3.000			
			Materiais do modelo		
			Madeira	195	
			Concreto	780	

\* Gama devido à variabilidade da umidade para solos, e densidade para os materiais de construção.  
 Fonte: adaptado de Oke (1981, p.241)

A curva de resfriamento do modelo ‘rural’ (Figura A.1a) tem um padrão de decaimento e concorda, pelo menos qualitativamente, com as observações de campo de resfriamento na zona rural em torno das cidades de Montréal, Vancouver e Uppsala (Figura A.1b). Dessa forma, foi verificado também que, assim como os dados de campo, os resultados do modelo se ajustam ao esquema de resfriamento noturno de Brunt.

Figura A.1: Diminuição de temperatura ( $\Delta T$ ) com o tempo do pôr do sol para localizações rurais e urbanas. (a) Resultados dos modelos, (b) observações de campo em Montreal (H/W = 3,29) e Vancouver (H/W = 1,50) e Uppsala (H/W = 0,76). Os dados do Canadá são as médias de 3-4 noites calmas e sem nuvens de verão; os dados de Uppsala são para uma única noite de setembro.

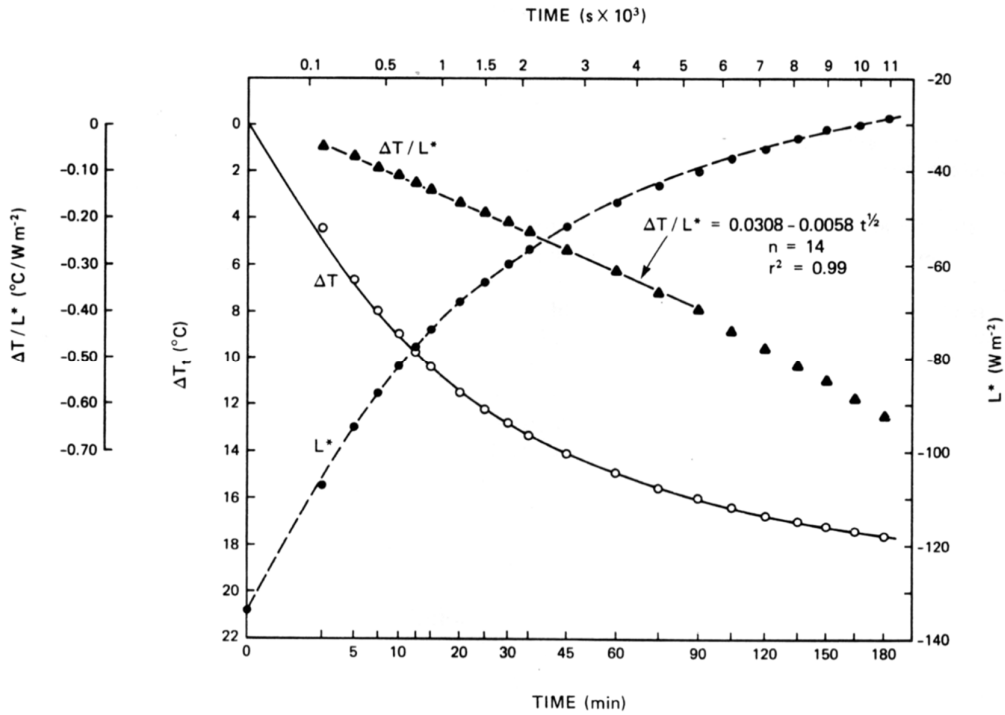


Fonte: adaptado de Oke (1981)

Em (4) foi realizado um rearranjo de (3), de modo que um gráfico que relacione  $\Delta T/L^*$  com  $t^{1/2}$  tenha uma inclinação de  $-(2/\pi^{1/2}\mu)$ , que será constante se a equação for uma boa representação da física de arrefecimento. No modelo 'rural',  $\Delta T$  e  $t$  são conhecidos e  $L^*$  é calculado por (5).

O gráfico da Figura A.2 confirma o esquema de Brunt, pelo menos para os primeiros 90 min, quando  $\Delta T / L^*$  em relação a  $t^{1/2}$  é quase exatamente linear ( $R^2 = 0,99$ ). A partir desse ponto, no gráfico, a relação muda, provavelmente porque a maior parte do diferencial de calor entre o modelo e a câmara diminui e a força motriz necessária para o arrefecimento pelo tipo Brunt se dissipa. Observando esse comportamento, todos os outros testes foram finalizados em 90 min. Resolvendo a inclinação da relação, tem-se  $\mu = 195 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-2}$ . Esse valor encontra-se no limite inferior da gama de valores de admissão térmica para a madeira (Tabela A.1), que parece razoável para folhas de compensado. É verificado, então, que o comportamento do modelo 'rural' é compatível com a situação observada no mundo real sob as condições determinadas.

Figura A.2: Variação da diminuição de temperatura ( $\Delta T$ ), radiação de onda longa na superfície ( $L^*$ ) e suas relações, versus tempo a partir do pôr do sol para o modelo 'rural'.

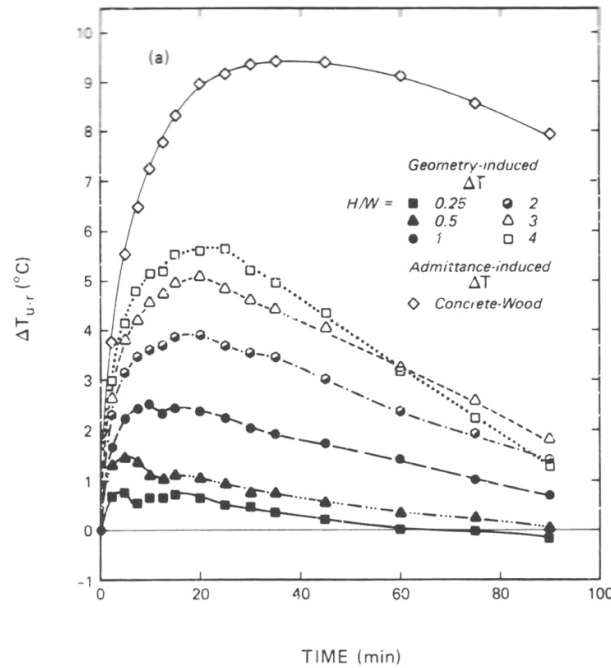


Fonte: Oke (1981).

Observando ainda a Figura A.1, que mostra a variação de efeito da geometria de superfície, através da simples alteração da configuração de madeira para estrutura de blocos de cânion, a taxa de arrefecimento é mais lenta e esse efeito aumenta conforme a escala do H/W testada. Oke também provou, através de comparações com medições de campo, que as taxas de resfriamento 'rural'/'urbana' e o padrão resultante do crescimento e declínio de ilhas de calor produzidas pelo modelo apresentam boa conformidade com aqueles do mundo real.

A Figura A.3 mostra as curvas da intensidade de ilha de calor ( $\Delta T_{u-r}$ ) em relação ao tempo. Em todas as configurações, a intensidade da ilha de calor cresce rapidamente após o pôr do sol, devido à taxa reduzida de arrefecimento urbano, atinge um valor máximo e, posteriormente, diminui à medida que a taxa 'urbana' começa a exceder a 'rural'. O modelo sugere que o tempo de intensidade máxima ocorre mais tarde, conforme o H/W se torna maior.

Figura A.3: Mudanças temporais da intensidade de ilha de calor ( $\Delta T_{u-r}$ ), (a) usando as curvas de resfriamento geradas pelo modelo 'rural' e 'urbano'. Para auxiliar a comparação, valores de  $\Delta T_{u-r}$  tem sido definido como zero ao pôr do sol (ou seja, removendo qualquer ilha de calor residual diurna) dando assim uma origem comum no início do crescimento noturno.



Fonte: Oke (1981).

Resumidamente, as taxas de resfriamento 'rural'/'urbano' e o resultado do padrão de crescimento e declínio da ilha de calor produzido pelo modelo demonstra uma grande semelhança com aqueles no mundo real, sob as condições apropriadas.

Quanto à geometria urbana e à radiação de ondas longas do cânion, Oke indica que o efeito da geometria 'urbana' em retardar o resfriamento é presumivelmente devido a uma diminuição da radiação de onda longa líquida ( $L^*$ ) no chão do cânion, decorrente da obstrução do horizonte. Considerando que a medida adequada da geometria de radiação para um determinado local é o seu fator de visão do céu ( $\psi_s$ ), ou seja, a fração do hemisfério sobrejacente ocupada pelo céu, Oke deduz da relação  $H/W$ , o fator de visão de parede ( $\psi_w$ ) em (6) e logo após fornece a relação deste último para o fator de visão do céu em (7).

Observa-se que para os modelos utilizados nos experimentos da câmara fria, Oke propõe uma correlação entre os fatores de visão do céu ( $\psi_s$ ) e valores de  $H/W$  (Tabela A.2), sendo que esses valores podem ser um pouco subestimados, porque o cânion do modelo não

é infinito e as paredes não são contínuas. Observa-se que os valores de FVC e H/W são inversamente proporcionais.

Tabela A.2: Relação entre valores de H/W e fator de visão do céu ( $\psi_s$ ).

H/W	Rural	0,25	0,5	1	2	3	4
$\psi_s$	1,00	0,89	0,71	0,45	0,24	0,16	0,12

Fonte: Oke (1981).

A radiação líquida de onda longa para um ponto no chão de um cânion ( $L_f^*$ ) é dada por (5), com a modificação de  $L \downarrow$  ser composta por dois componentes: um do céu e o outro das paredes. Assumindo-se que o fluxo radiante é isotrópico (ou seja, os fluxos são proporcionais ao fator de visão de paredes e o ponto), que o cânion é simétrico em secção transversal e infinito de comprimento e que as emissividades de superfície do céu, paredes e piso são iguais à unidade, têm-se então (8). Os cálculos do  $L_f^*$  para os cânions ‘urbanos’ foram feitos através de (8) e assumindo-se que  $T_f = T_w$  (temperaturas absolutas de superfície do chão e parede).

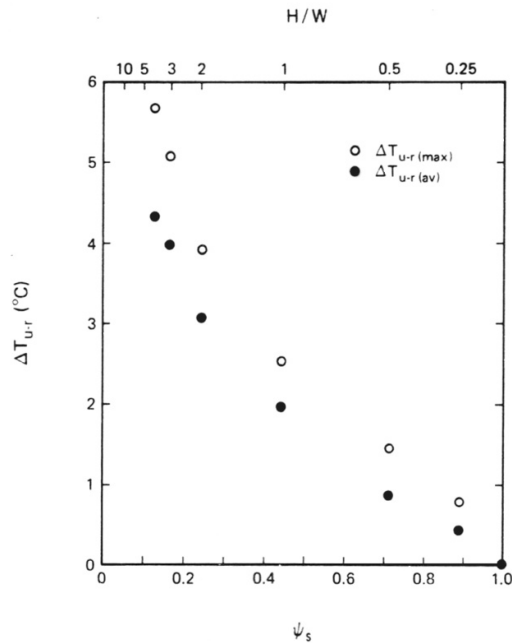
O autor verifica que a troca de radiação de onda longa no modelo está razoavelmente de acordo com a encontrada nos cânions de grande escala, e que o papel da geometria no resfriamento noturno está intimamente relacionado com o fator de visão do céu do cânion.

Para a geometria urbana e a intensidade da ilha de calor, o autor enfatiza que as condições de resfriamento de arrefecimento rural/urbana consideradas no estudo, produzem um efeito de ilha de calor puramente dirigido pela radiação. Como a troca radiativa é fortemente afetada pelo fator de visão do céu, conclui-se que a ilha de calor também deve estar relacionada com esta medida de geometria.

No caso do modelo, os fatores de visão do céu do ‘cânion’ são demonstrados em gráfico (Figura A.4) com duas medidas de intensidade de ilha de calor: a intensidade média durante o período experimental de 90 minutos ( $\Delta T_{u-r(av)}$ ) e o valor máximo alcançado durante um teste ( $\Delta T_{u-r(max)}$ ). Para valores de  $\psi_s > 0,25$ , a relação parece ser aproximadamente linear, mas para valores menores ela é provavelmente curvilínea. Isso deve ocorrer, porque com  $\psi_s$  tendendo a “0” (zero), a capacidade do cânion muito estreito para a troca de radiação diminui e, no caso do modelo, a diferença de temperatura urbana/rural é crescentemente controlada

pela diferença de temperatura inicial entre o modelo e a câmara fria, o que não é aplicável ao mundo real.

Figura A.4: Relação entre intensidade da ilha de calor ( $\Delta T_{u-r}$ ) e o fator de visão do céu do cânion ( $\psi_s$ ) usando o modelo em escala.



Fonte: Oke (1981).

As medições de campo, que foram mais apropriadas quando comparadas a resultados do modelo, foram aquelas compiladas por Oke (1973), de um estudo da relação entre o tamanho da cidade e a ilha de calor urbana. Assim, ele mostra, empiricamente, que a intensidade da ilha de calor poucas horas após o pôr do sol com céu sem nuvens pode ser dada por (9), que considera a população ( $P$ ) e a velocidade do vento regional no nível 10m ( $\bar{u}$ ).

Originalmente, Oke sugere que a forma  $P^{1/4}$  de (9) pode ser explicada em termos de um quadro advectivo desenvolvido por Summers (1964), de modo que  $P$  pode ser um substituto para a medida do tamanho da cidade. Posteriormente, foi demonstrado que a abordagem advectiva foi inferior à demonstrada por (9) na previsão de ilha de calor para Vancouver e que  $P$  pode ser um substituto para a estrutura física de áreas urbanas centrais (OKE, 1976b). Se isto estiver correto e a geometria é a medida apropriada da estrutura, então os valores de ilhas de calor do mundo real podem apresentar um comportamento semelhante ao demonstrado na Figura A.4.

Conseqüentemente, o fator de visão do céu foi calculado para as áreas centrais do maior número possível de cidades utilizadas por Oke (1973), bem como para outras cidades para as quais os dados de ilha de calor se tornaram disponíveis, totalizando 31 'pontos de estudo' em diferentes cidades (Tabela A.3).

Tabela A.3: Máxima intensidade da ilha de calor urbana ( $\Delta T_{u-r(max)}$ ) e informações de geometria urbana dos 31 pontos ordenadas de acordo com a população ( $P$ ).

Cidade	Ano	$P$ (x 10 <sup>3</sup> )	$\Delta T_{u-r(max)}$ (°C)	$\psi_s$
AUSTRALÁSIA				
1. Christchurch, N. Z.	1968	258	6,3	0,59
2. Hobart, Tasmania	1978	130	5,7	0,60
EUROPA				
3. London, U. K.	1960	8.500	10,0	0,40
4. Berlin, Germany	1936	4.200	10,0	0,45
5. Vienna, Austria	1927	1.870	8,0	0,42
6. Amsterdam, Neth	1975	870	8,7	0,44
7. Munich, Germany	1933	822	7,0	0,48
8. Sheffield, U. K.	1977	500	7,1	0,54
9. Karlsruhe, Germany	1972	260	7,5	0,54
10. Karlsruhe, Germany	1929	150	7,0	0,54
11. Uppsala, Sweden	1975	100	7,0	0,63
12. Uppsala, Sweden	1950	63	6,5	0,63
13. Lund, Sweden	1972	50	5,8	0,75
AMÉRICA DO NORTE				
14. Montréal, P. Q.	1970	2.000	12,0	0,28
15. Vancouver, B. C.	1971	1.100	10,2	0,41
16. San Francisco, Cal.	1954	784	11,1	0,31
17. Edmonton, Alta.	1965	401	11,5	0,37
18. San José, Cal.	1954	101	7,7	0,50
19. Fairbanks, Alaska	1976	65	8,0	0,64
20. Brandon, Manitoba	1979	37	5,7	0,71
21. Columbia, Md.	1974	28	7,0	0,67
22. St. Hyacinthe, P. Q.	1970	24	6,6	0,62
23. Corballis, Oregon	1967	21	6,1	0,67
24. Chambly, P. Q.	1970	12	5,1	0,84
25. Marieville, P. Q.	1970	4,3	5,2	0,81
26. St. Basile-le-Grand, P. Q.	1970	4,0	3,7	0,86
27. St. Césaire, P. Q.	1970	2,4	4,3	0,78
28. St. Pie, P. Q.	1970	1,6	3,3	0,83
29. Columbia, Md.	1970	1,6	3,0	0,84
30. Ste. Angèle de Monnoir, P. Q.	1970	1,2	2,7	0,86
31. Ste. Madeleine, P. Q.	1970	1,1	1,8	0,85

Fonte: Oke (1981).

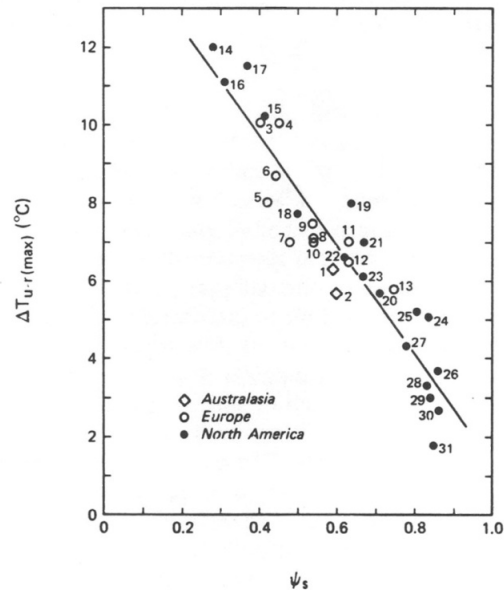


A informação de H/W foi obtida de diversas fontes, incluindo fotografias aéreas e no nível do solo, e dados de dimensões dos edifícios e ruas. Para testar os valores de H/W, esses foram comparados com os fatores de visão do céu (calculados usando as técnicas de fotografia com lentes olho-de-peixe delineadas por Steyn, 1980).

Em um exemplo usando uma fotografia de Vancouver, o fator de visão do céu foi determinado como 0,41, quando pelo método simples através do H/W foi obtido 0,32. Usando resultados de 10 comparações em diferentes áreas de Vancouver, foi obtida a Eq. (10), que compara os fatores de visão do céu obtidos dos dois métodos. Considerando que a técnica de fotografia representa o valor mais próximo ao verdadeiro de FVC, foi decidido corrigir o valor de FVC obtido pelo método simples de H/W ( $\psi_{s(H/W)}$ ) através de (10), para obter os valores de  $\psi_s$  que estão listados na Tabela 3.3.

Os resultados da relação entre a intensidade de ilha de calor máxima observada em uma localidade ( $\Delta T_{u-r(max)}$ ) e o fator de visão do céu do cânion em sua área central ( $\psi_s$ ) para aqueles 31 pontos estão representados na Figura A.5.

Figura A.5: Relação entre a intensidade de ilha de calor máxima observada em uma localidade ( $\Delta T_{u-r(max)}$ ) e o fator de visão do céu do cânion em sua área central ( $\psi_s$ ).

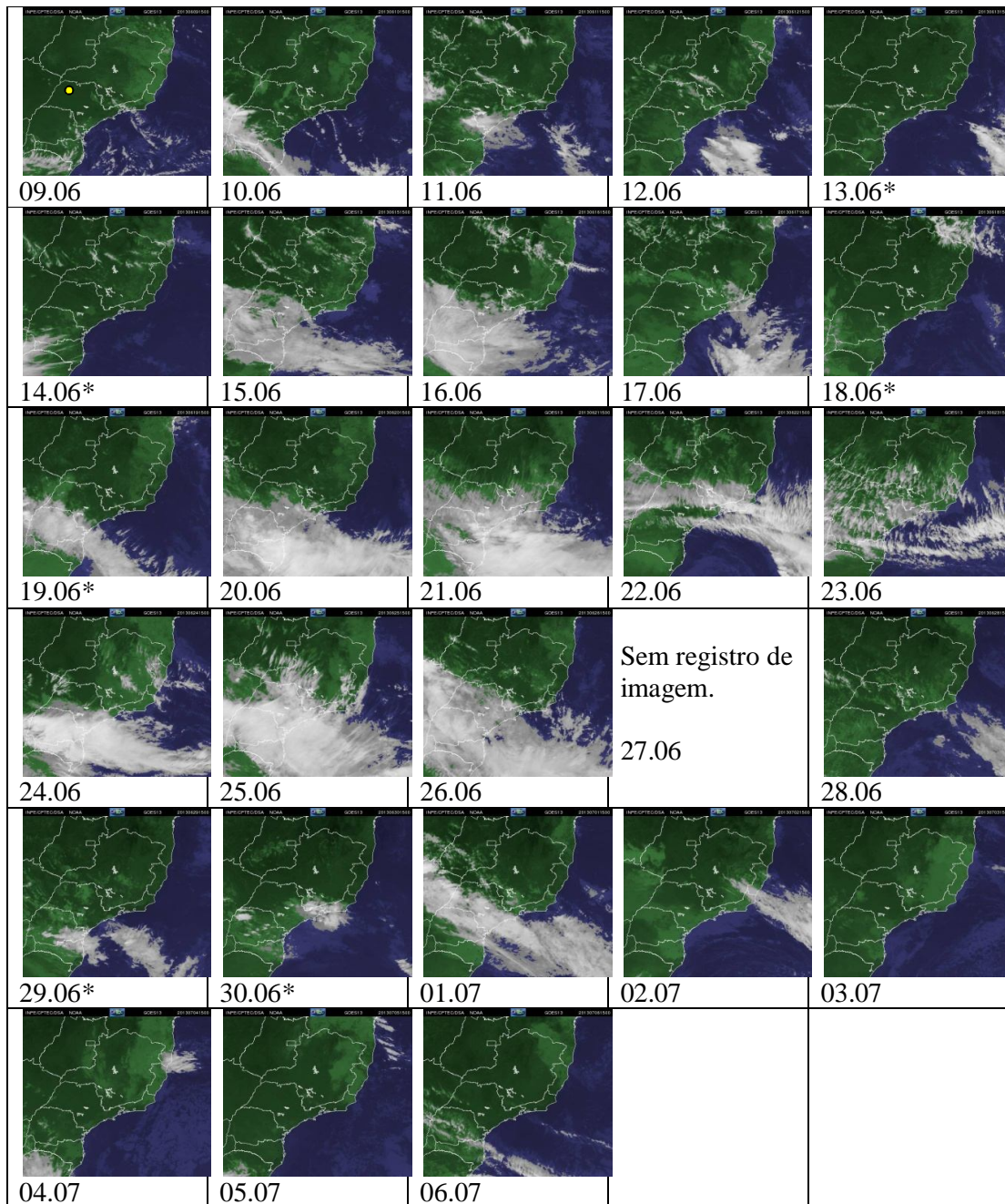


Fonte: Oke (1981).

A equação da regressão linear obtida pelos dados dos 31 pontos é a (11a) com  $R^2=0,88$  e erro padrão da estimativa de  $\Delta T_{u-r(\max)}$  com variação de  $\pm 0,92^\circ\text{C}$ . De forma alternativa, o melhor ajuste dessa equação para o uso da relação H/W como parâmetro de entrada é a (11b).

Com base nos resultados demonstrados nas Figuras A.4 e A.5, constata-se que a geometria é uma boa forma de medir a modificação estrutural urbana que produz o efeito da ilha de calor. No entanto, esses resultados também incluem outras prováveis causas das modificações térmicas urbanas, que muitas vezes estão automaticamente vinculadas às mudanças na geometria e que não podem ser isoladas, como edifícios muito altos que apresentam maior fluxo de calor antropogênico, diferentes materiais com maior admissão térmica, etc.

**Anexo 2 – Imagens de satélite Goes 13 dos dias de medição em São José do Rio Preto**  
 Período de 09.06.2013 à 06.07.2013. Registro das 15h.  
 Fonte: CPTEC/INPE



\* dias selecionados como estáveis

## APÊNDICE

### Apêndice 1 – Calibração dos sensores utilizados no levantamento em São José do Rio Preto

Gráfico dos dados originais de temperatura do ar dos 5 sensores:

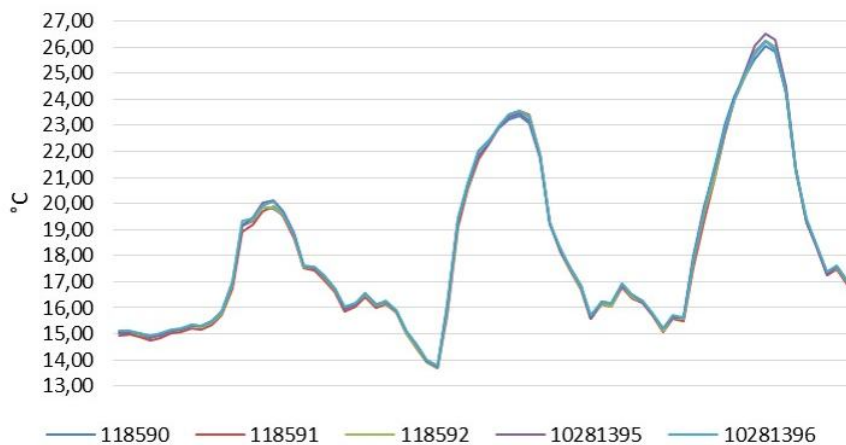
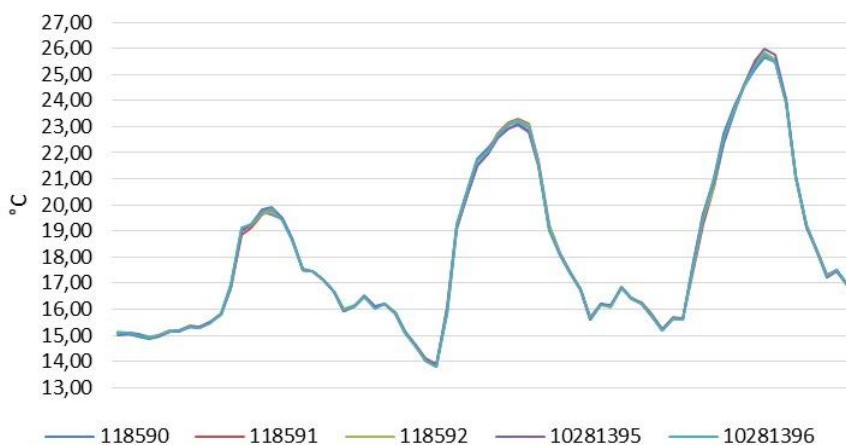


Gráfico dos dados de temperatura do ar dos 5 sensores calibrados:



Equações utilizadas para a calibração dos sensores:

Código do sensor	Equação
118590	$y = 0,9654x + 0,5334$
118591	$y = 0,9501x + 0,8964$
118592	$y = 0,9565x + 0,7086$
10281395	$y = 0,9497x + 0,783$
10281396	$y = 0,9609x + 0,5656$

## Apêndice 2 – Critérios utilizados para a seleção de dias estáveis do levantamento na cidade de São José do Rio Preto

A determinação de janela de tempo para incorporação à ferramenta computacional, e assim sua validação, é baseada na análise de períodos que se caracterizam pelo comportamento atmosférico estável, céu claro, vento fraco e irradiância global horizontal intensa.

Os critérios estabelecidos para a seleção de dados na cidade de São José do Rio Preto considerou:

- Não ocorrência de chuvas ou nevoeiro;
- Nebulosidade abaixo de 50% (5 para décimos; 4 para oitavos);
- Velocidade de vento média menor que 2,0 m/s;
- Altos valores de radiação global ( $W/m^2$ );
- Análise de passagem das massas de ar por imagens de satélite.

A análise de passagem das massas de ar foi feita através de imagens de satélites Goes 13 da região Sudeste (Produto: SE Retangular Colorida CH4 Alta res., às 15h) da página da internet <http://satelite.cptec.inpe.br/home/novoSite/index.jsp>. Foram descartados os dias sob influência de massa de ar (fase de domínio), selecionando-se somente os dias que estavam no período de prenúncio ou fase de tropicalização.

As fontes de dados meteorológicos para as cidades de São José do Rio Preto encontram-se especificadas no quadro abaixo.

Dados climáticos utilizados na determinação de janela de tempo para as simulações de pontos de estudo na cidade de São José do Rio Preto (Área 1)

Dado	Unidade	Escala	Fonte
Radiação global	$W/m^2$	hora	CETESB <sup>1</sup>
Velocidade do vento	m/s	hora e média do dia	CIIAGRO <sup>2</sup>
Cobertura de nuvens	décimos	dia	Aeroporto de São José do Rio Preto <sub>3</sub>
Eventos	-	dia	Aeroporto de São José do Rio Preto <sub>3</sub>

<sup>1</sup> CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (<http://www.cetesb.sp.gov.br/>)

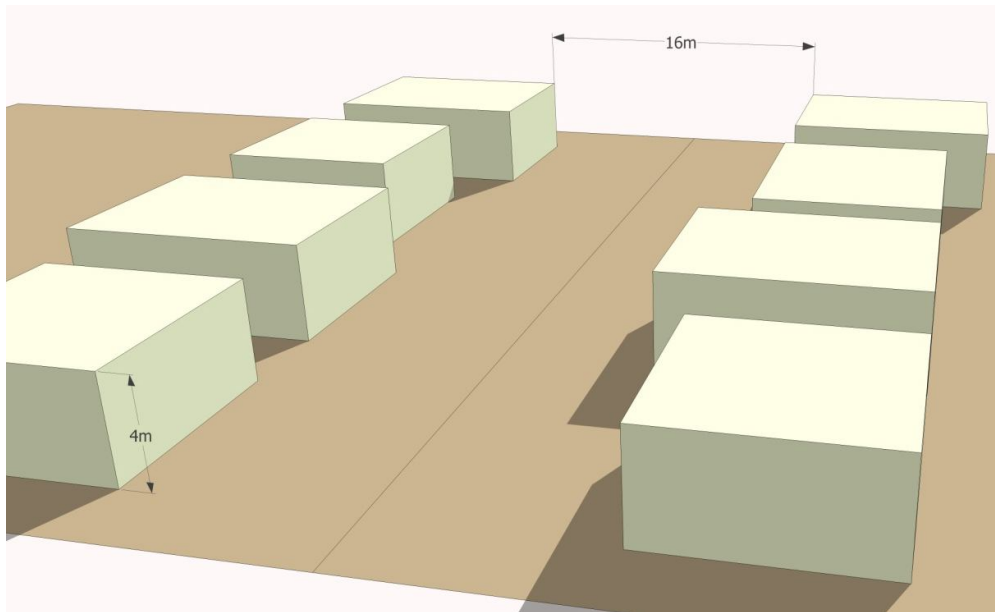
<sup>2</sup> CIIAGRO – Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas (<http://www.ciiagro.sp.gov.br/>)

<sup>3</sup> dados do aeroporto da cidade de São José do Rio Preto, importados do site Weather Underground (<http://www.wunderground.com/>)

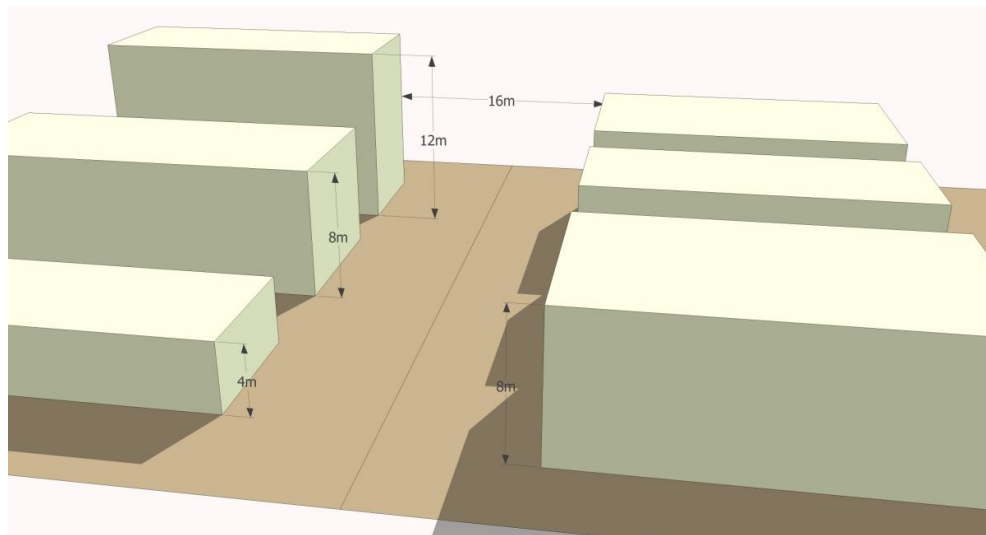


### Apêndice 3 – Detalhamento das geometrias dos cenários simulados com THIS

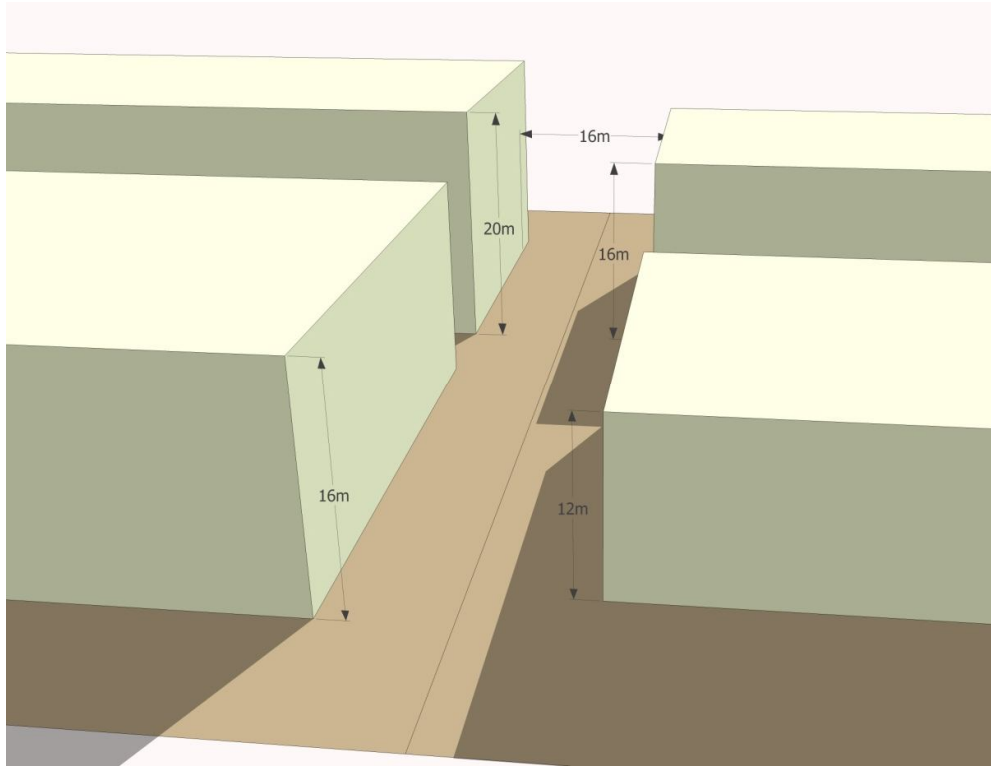
Quadra A1



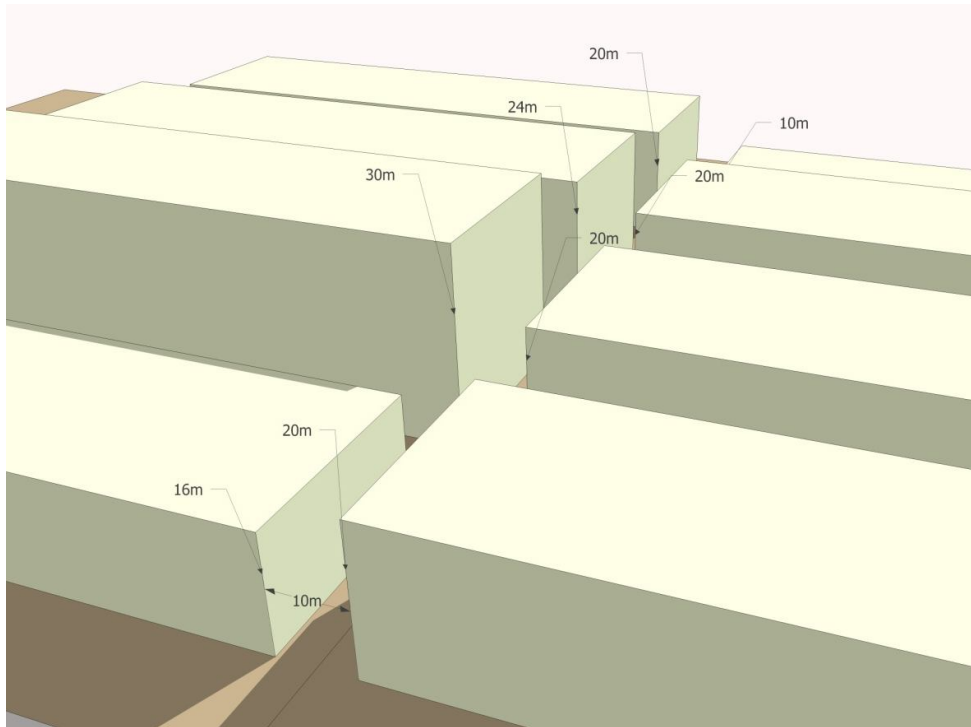
Quadra A2



Quadra A3

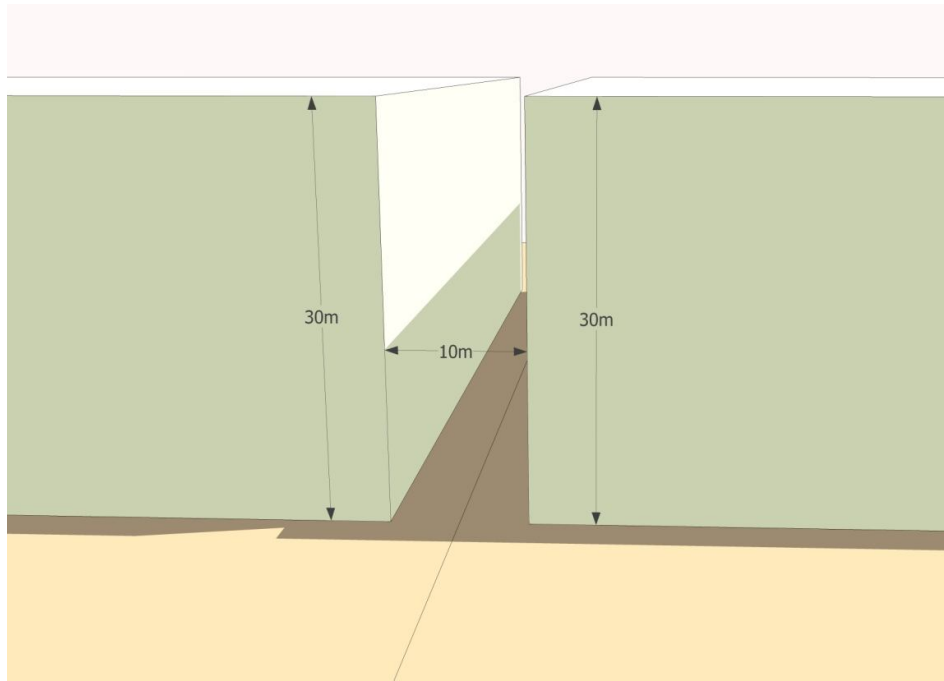


Quadra A4

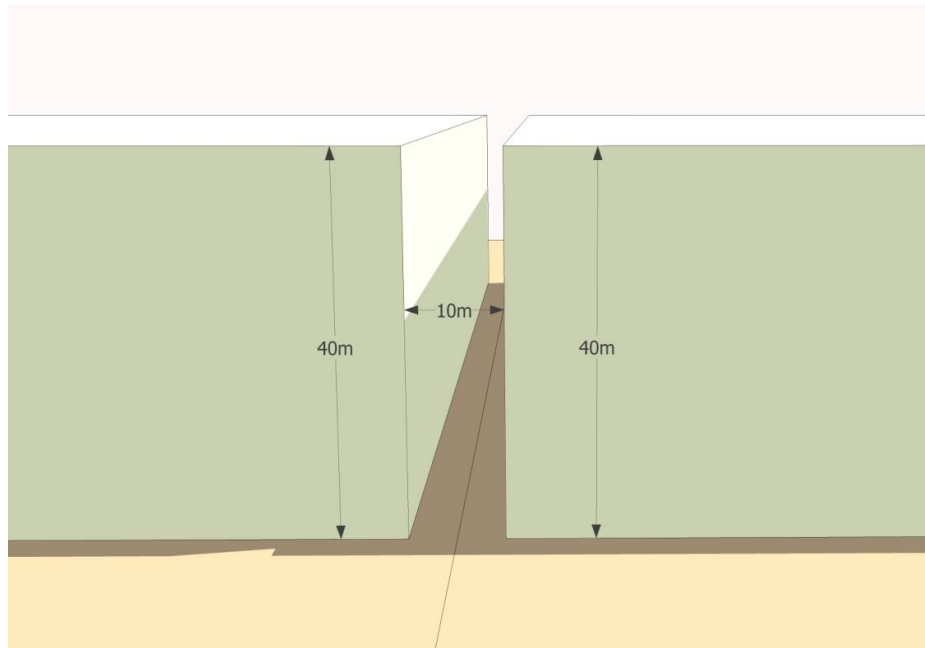




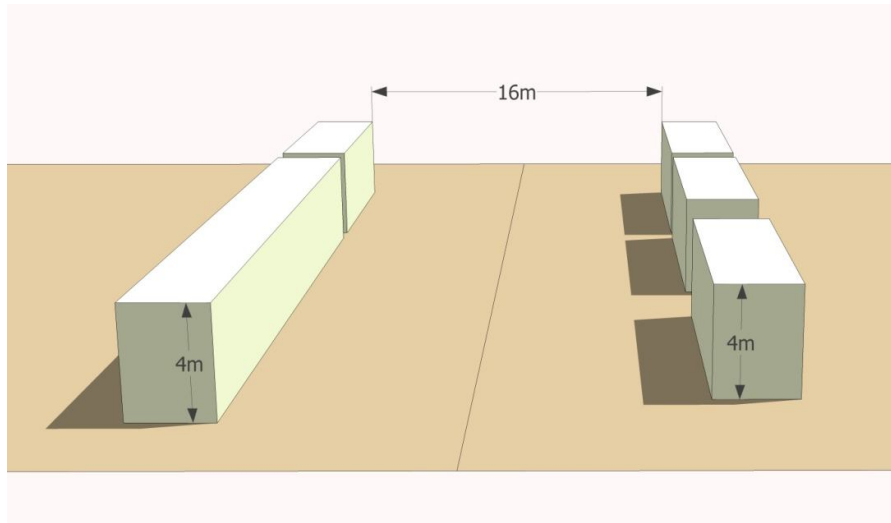
Quadra A5



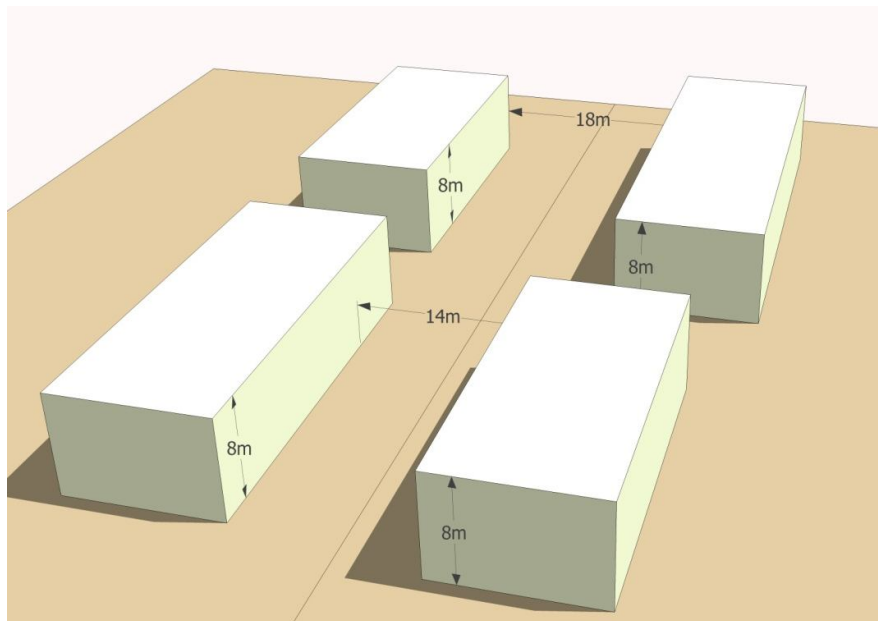
Quadra A6



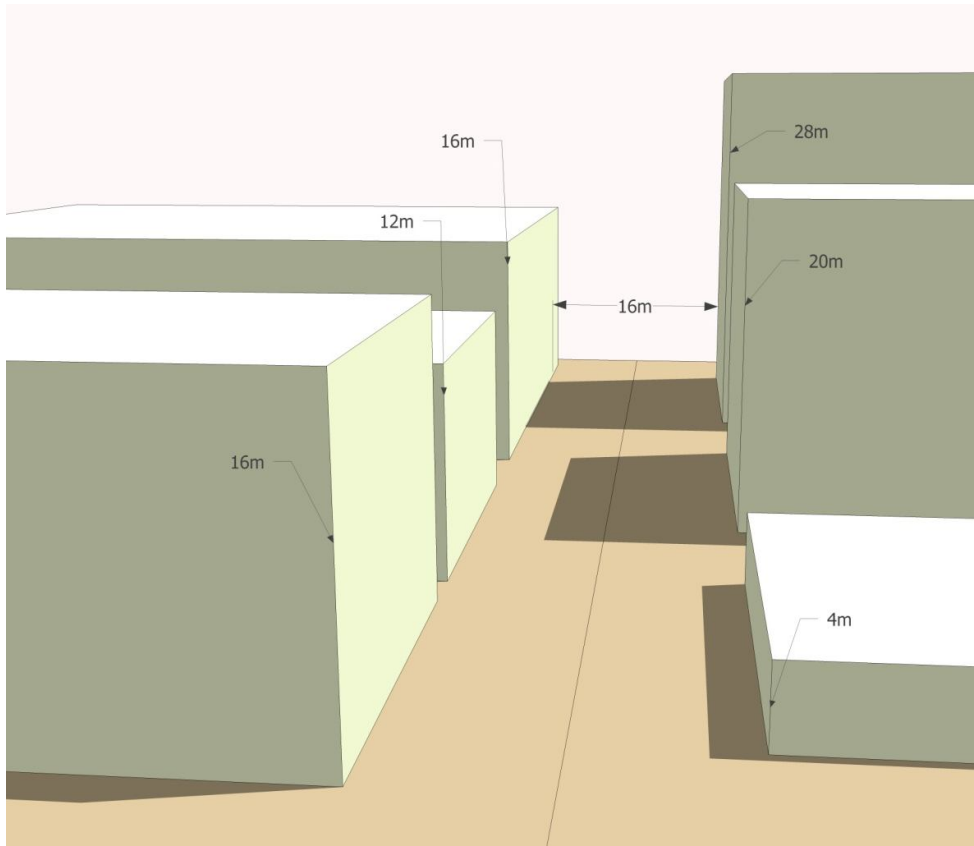
Quadra B1



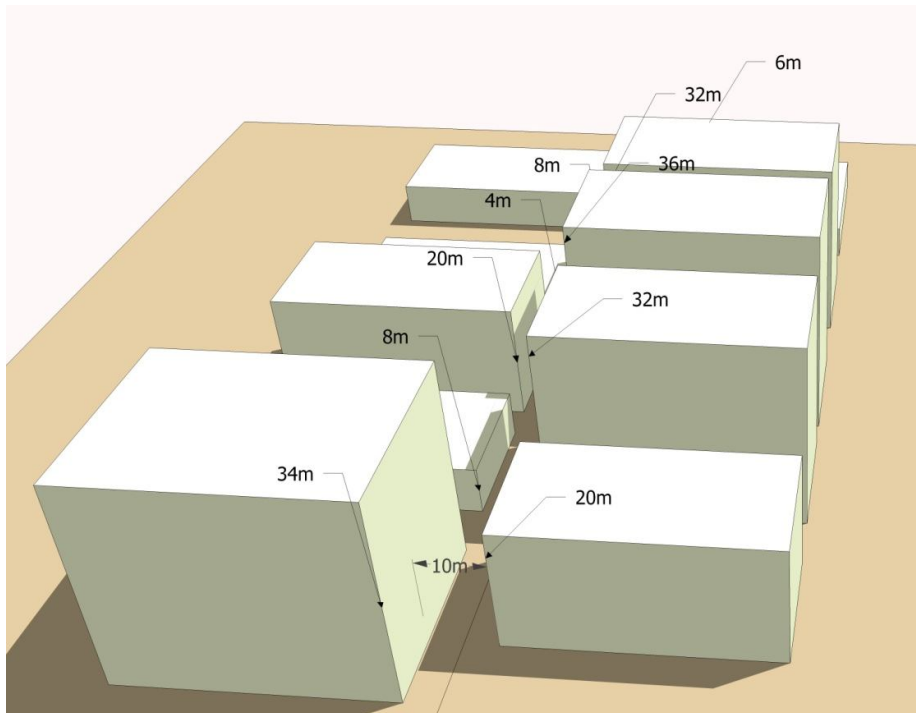
Quadra B2



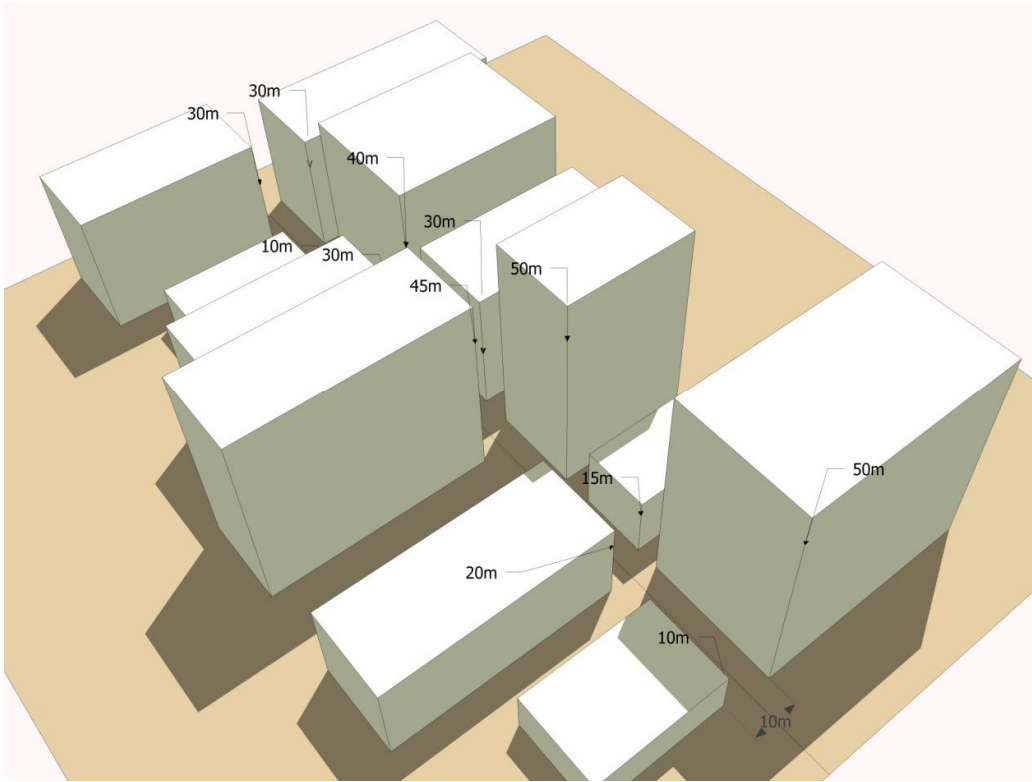
Quadra B3



Quadra B4



Quadra B5



Quadra B6

