

GEOMETRIA URBANA E ILHA DE CALOR NOTURNA: ANÁLISE BASEADA EM UM MODELO NUMÉRICO

C. M. Nakata, L. C. L. Souza e D. S. Rodrigues

RESUMO

A geometria urbana é uma das causas do fenômeno da ilha de calor, pois provoca alteração do balanço energético nas cidades. Essa pesquisa visa identificar um raio de abrangência adequado para a determinação da influência térmica da geometria urbana. Para isso explora ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas, aplicando um modelo numérico (o modelo de Oke), que relaciona a geometria urbana e a intensidade da ilha de calor. Dados térmicos reais são comparados a dados simulados para diferentes raios de abrangência. Os resultados apontaram que o raio de 30 m é o que em média permite maior aproximação entre dados reais e dados simulados. Além disso, verificou-se que o modelo aplicado demonstra comportamento diferenciado, conforme o grau de homogeneidade das alturas das edificações.

1 INTRODUÇÃO

A formação de ilha de calor noturna é amplamente estudada em pesquisas de planejamento urbano. 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 são mais elevadas do que em áreas rurais circundantes, devido às diferentes propriedades dessas áreas.

Segundo Gartland (2010), 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. O efeito da ilha de calor é mais significativo em dias calmos e claros, com tendência a ficar mais intenso com a expansão das cidades.

Alguns dos principais estudos publicados nessa área são de autoria do pesquisador Timothy R. Oke, nas décadas de 70 e 80. Em seus estudos, o referido autor verificou que a ilha de calor é um fenômeno predominantemente noturno, com as maiores intensidades tendendo a ocorrer algumas horas após o pôr do sol e podendo a diferença entre as temperaturas rural e urbana se inverter durante o dia.

Oke (1982) inovou a abordagem da questão, estabelecendo correlações entre as variáveis de planejamento urbano e o clima da cidade, tratando-a como um sistema termodinâmico fechado e avaliando-a a partir do cálculo de balanço energético. A poluição do ar, o calor antropogênico, as superfícies impermeáveis, as propriedades térmicas dos materiais e a

geometria da superfície são características da urbanização que foram apontadas como responsáveis pelas alterações de trocas de energia e condições térmicas (OKE, 1981).

Ao abordar a geometria da superfície (ou geometria urbana), o termo 'cânion urbano' é utilizado para caracterizar o conjunto de ruas que cortam blocos densos de edificações, especialmente arranha-céus, em analogia ao cânion natural. Aplicando esse conceito, a geometria urbana pode causar aumento de absorção de ondas curtas, decorrente da sua interceptação dentro dos cânions; diminuição da perda de calor pela turbulência, em consequência da estagnação em cânions profundos; e, diminuição da perda de radiação de ondas longas de cânions urbanos, devido à redução do fator de visão do céu (índice que mede a fração de céu visível a partir de um ponto).

Geralmente, o cânion na geometria urbana é representado pela relação entre altura e largura da via (relação H/W, do inglês *height/width*) ou pelo fator de visão do céu (FVC). Quanto maior for a relação H/W do recinto urbano considerado, menor será a área de céu visível e menor a dissipação da radiação, reduzindo assim o resfriamento do ar em recintos urbanos. A relação H/W foi utilizada nos experimentos com modelos reduzidos de Oke (1981), para simular a influência do cânion urbano na formação de ilhas de calor noturnas.

A avaliação da influência da geometria urbana no clima das cidades é muitas vezes realizada pela aplicação de modelos ou programas computacionais, para simular cenários reais e hipotéticos, verificando-se principalmente as diferentes situações de adensamento urbano. Nesses casos, três tipos de modelos podem ser aplicados: modelos com base numérica, física e empírica (Oke, 1984; Svensson et al., 2002). A gama de modelos numéricos é ampla e eles estão sendo continuamente desenvolvidos e refinados. Eles são utilizados para simulações no campo do vento, dispersão de poluição, clima térmico e seus efeitos na demanda de energia e conforto humano (Balázs et al., 2009). Diversos são os pesquisadores que realizam simulações numéricas de verificação de balanço energético e previsão de ilhas de calor (Atkinson, 2003; Fortuniak, 2003; Kanda et al., 2005; Bruse, 1999; Han et al., 2007; Zinzi et al., 2012; Fahmy et al., 2012; Santo et al., 2012).

Muitos daqueles estudos requerem medições de campo para comparação entre dados reais e simulados e consequente validação do modelo aplicado. Nesse tipo de abordagem, normalmente, assume-se um raio de influência do recinto urbano sobre o ponto de interesse intraurbano, não havendo, no entanto, um procedimento metodológico padronizado para esse fim.

Considerando essas questões, esse artigo procura identificar o raio de abrangência mais adequado para caracterizar a geometria urbana ao redor de um ponto intraurbano, explorando ferramentas de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Naquela plataforma, aplica-se o modelo de Oke para o estudo da influência da geometria urbana (relação H/W) sobre o campo térmico intraurbano.

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO NUMÉRICO DE OKE

Oke (1981) estabeleceu uma correlação entre a geometria urbana e a máxima intensidade da ilha de calor, através de um experimento em laboratório com modelos reduzidos e considerando, por simplificação, as condições de céu claro e baixa velocidade do vento. Esse modelo tornou-se 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. O parâmetro utilizado para a geometria urbana naquele estudo foi a relação H/W, podendo ainda ser adaptado para se relacionar ao FVC. O modelo é definido pela Equação 1:

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \cdot \ln(H/W) \quad (1)$$

Onde:

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

H: altura média das edificações (m);

W: largura da via (m).

O modelo empírico de Oke (1981) foi aplicado por Souza et al. (2010), ao avaliarem o papel do fator de visão do céu na intensidade de ilhas de calor em um bairro residencial brasileiro. Os resultados daquele estudo levaram a sugerir uma equação de correção no modelo e indicaram que a temperatura urbana noturna varia de acordo com a faixa de FVC considerada. Souza et al. (2010) verificaram ainda que alguns pontos com fatores de visão do céu mais baixos não desenvolveram as ilhas térmicas mais intensas. Além disso, alguns fatores de visão do céu maiores foram associados a temperaturas mais altas do que as esperadas.

Aquelas diferenças encontradas podem estar relacionadas ao fato dos experimentos de Oke (1981) utilizarem modelos reduzidos com perfis de ruas uniformes. Como a altura de cânions urbanos reais é variável, diferente do apresentado pelo modelo de Oke, uma grande quantidade da energia solar é interceptada nas paredes acima do solo, não chegando a atingir ou atingindo em baixa proporção o nível da rua (Erell e Williamson, 2007).

Por isso, como o modelo apresenta limitações de ensaios laboratoriais, a sua aplicação a uma situação real deve ser cautelosa. A própria determinação da relação H/W é um fator a ser cuidadosamente investigado, para que distorções não sejam criadas desde a fase de inserção de dados de entrada nos modelos. Quando determinada em um cenário hipotético homogêneo, essa relação é homogênea. Porém, quando calculado para uma situação real, muitas incertezas são incorporadas pelo perfil heterogêneo dos cânions.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia empregada neste estudo inclui:

- i. O levantamento de dados urbanos, tanto de geometria urbana quanto de temperatura de ar;
- ii. Representação e cálculo de geometria urbana no SIG ArcGIS 10.2 e aplicação do modelo de Oke, com base na relação H/W;
- iii. Identificação do raio de abrangência que melhor define a relação H/W em um ambiente urbano real.

3.1 Levantamento de dados urbanos

Um levantamento de dados foi realizado na cidade de São José do Rio Preto, localizada no interior do estado de São Paulo, Brasil, sob as coordenadas 20°49'12"S, 49°22'44"O, a 443 km de distância da capital São Paulo, sendo situada em uma altitude média de 489 metros. Possui área de 421,96 km² e população de 408.258 habitantes (2010, IBGE). 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. A cidade apresenta cânions urbanos com diferentes relações H/W e o seu centro urbano possui uma concentração de edificações verticalizadas.

Para obtenção de dados de diferença de temperatura urbano-rural, foram levantados dados disponibilizados por uma estação meteorológica localizada no perímetro urbano (dados rurais) e na área central foram instalados equipamentos de medição (dados urbanos). 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 em pontos de coleta. Os equipamentos utilizados nos pontos de coleta urbana foram data-loggers HOBO Pro v2, modelo U23-001, marca ONSET, com sensores de temperatura (faixa de operação de -40 a 70°C, precisão de $\pm 0,21^\circ\text{C}$ na faixa de 0°C a 50°C) e umidade (0-100%), ambos com erro de 1%. Todos os equipamentos contaram com proteção contra radiação solar direta e chuva. Os critérios de instalação dos equipamentos consideraram: condições adequadas para o estudo, de forma afastada da influência de vegetação ou de barreiras verticais (parede/muro/platibanda); autorização do morador/comerciante para a instalação do equipamento em seu lote; e possibilidade de fixação em postes de fornecimento de energia ao lote, a 3 metros de altura, com orientação sul.

Para o levantamento de dados térmicos, foram selecionados cinco pontos na região central da cidade (Figura 1), que foram monitorados durante 15 dias (de 09.06.2013 a 23.06.2013), correspondendo a 14 períodos noturnos. Esses pontos foram locados no meio de faces frontais de quadras urbanas, para padronizar o procedimento de estimativa da relação H/W.



Fig. 1 Localização dos pontos de medição na cidade de São José do Rio Preto (adaptado de Google Earth)

3.2 Uso do SIG para representação e cálculo de geometria urbana

As áreas edificadas próximas aos pontos de estudo foram digitalizadas no SIG ArcGIS 10.2. O ArcGIS permitiu representar a geometria urbana de forma tridimensional (ArcScene, Figura 2) e relacionar informações espaciais e numérica entre diferentes feições geométricas e tabelas, através do ArcMap (Figura 3).

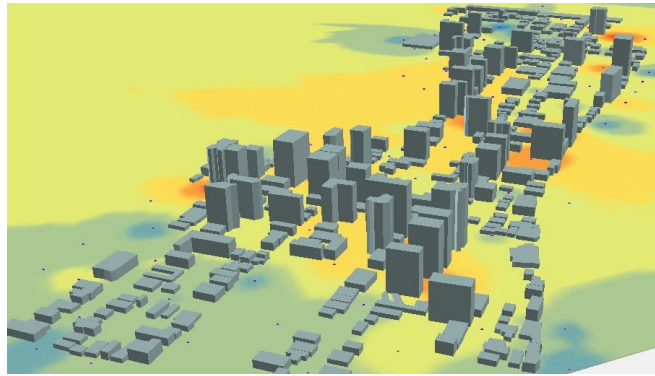


Fig. 2 Representação da geometria urbana no ArcScene

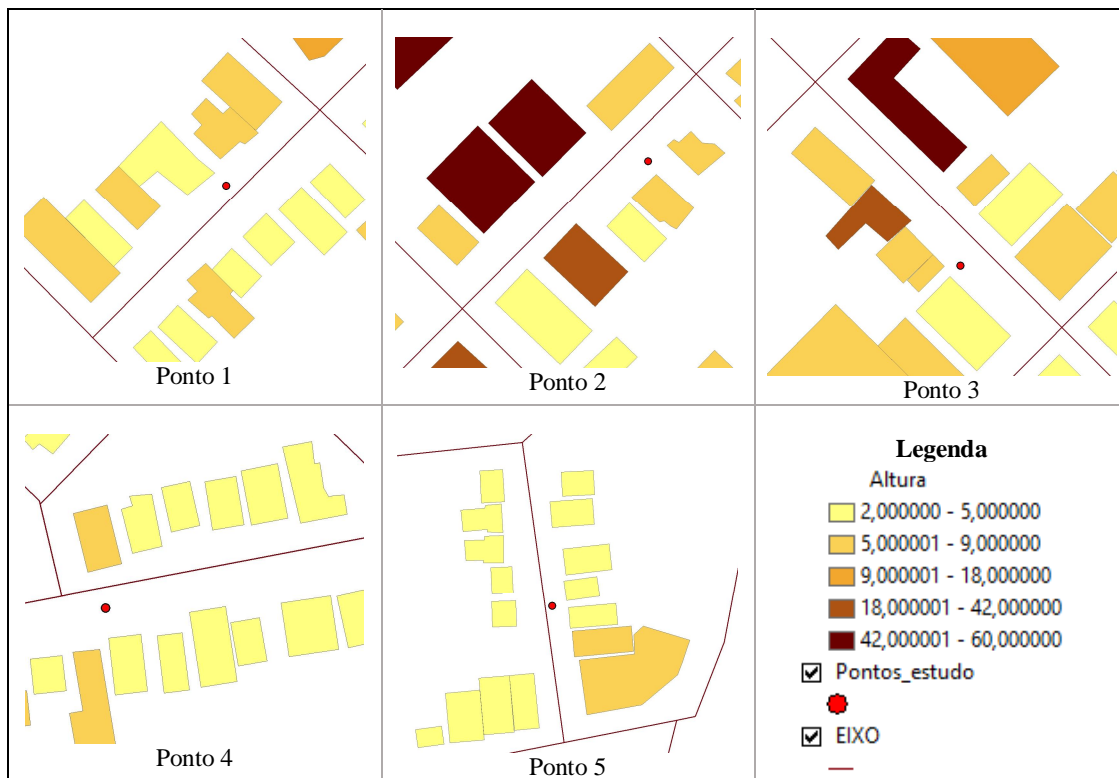


Fig. 3 Representação da geometria urbana no ArcMap

Para o cálculo de relação H/W de cada ponto foram consideradas somente as edificações mais próximas, limitando-se às edificações pertencentes à quadra. Para esse cálculo foi realizada uma média ponderada, sendo atribuídos maiores pesos para as edificações mais próximas ao ponto de estudo.

Com o auxílio dessa ferramenta SIG e intuito de verificação do melhor raio de representatividade da geometria urbana (relação H/W), foi incorporada uma sub-rotina de cálculo no SIG ArcGIS. Essa subrotina realizou o cálculo da geometria urbana e a verificação de intensidade máxima de ilha de calor, com base no modelo numérico de Oke (1981). Foram realizadas inicialmente quatro simulações com os critérios representados na Tabela 1. Para o cálculo de relação H/W, foi utilizada uma ferramenta do SIG que solicita como entrada os valores de raio e o número máximo de feições geométricas mais próximas

a considerar. Cada simulação considerou para o cálculo de cada ponto somente as edificações que atenderam simultaneamente a esses dois critérios (exemplos na Figura 4).

Tabela 1 Critérios para seleção de edificações para cálculo de relação H/W

Simulação	Raio	Número máximo de edificações para cálculo
A	50 m	15
B	30 m	10
C	25 m	5
D	20 m	5

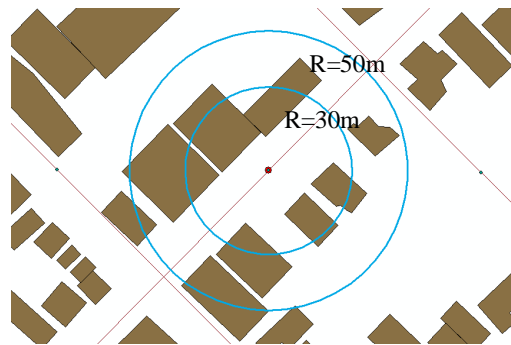


Fig. 4 Ilustração representativa de raios de abrangência para seleção de edificações no cálculo de geometria urbana

Os procedimentos de representação de cálculo de geometria urbana no SIG foram:

- i. Representação das feições geométricas: edificações, linhas de eixo das vias e pontos de estudo;
- ii. Cálculo da distância de cada edifício em relação ao eixo mais próximo ('d') para definição posterior de 'W' ($W = 2d$);
- iii. Cálculo da distância de cada edifício em relação ao ponto de estudo da quadra para definição da variável 'peso';
- iv. Relação entre tabelas para selecionar os edifícios que são considerados para o cálculo de cada ponto;
- v. Cálculo de H/W de cada ponto, através da média ponderada;
- vi. Cálculo da intensidade máxima da ilha de calor em cada ponto, aplicando o modelo de Oke, com base no valor de relação de H/W obtido.

3.3 Identificação do raio para determinação de H/W

Nessa etapa, os resultados das simulações com os diversos raios foram comparados aos dados reais, para que pudesse ser identificado o raio que melhor representasse a relação entre H/W e o campo térmico ao seu redor. O critério de escolha da melhor opção baseou-se na menor diferença gerada entre os dados simulados e os dados medidos. No caso dos dados medidos, foram consideradas as intensidades máximas das diferenças térmicas obtidas entre a área rural e urbana.

Essa etapa permitiu ainda apontar algumas tendências que podem ser esperadas na aplicação do modelo de Oke (desenvolvido para um perfil homogêneo de vias) sobre uma situação real (não homogênea em relação ao perfil da rua).

4 RESULTADOS

4.1 Tendência térmica dos pontos

Dos cinco pontos de monitoramento, todos registraram maiores valores de diferença de temperatura urbano-rural no período noturno (das 19h às 5h), conforme verificado na Figura 5. O período das 21h tende a representar o de maior acúmulo de calor por ondas longas nos pontos intraurbanos amostrados, pois para a maioria deles, a curva sofre um decaimento a partir daquele horário. Esses resultados corroboram os estudos de Oke, que verificaram que a ilha de calor é um fenômeno predominantemente noturno.

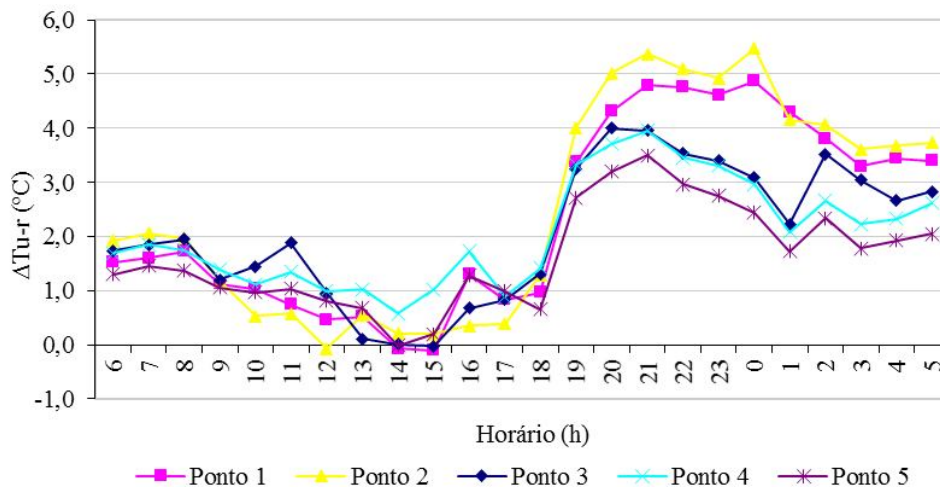


Fig. 5 Diferença de temperatura urbano-rural dos cinco pontos para um dia do período monitorado (das 6h do dia 12.06.2013 às 5h do dia 13.06.2013)

O ponto 2 comporta-se como o de maior aquecimento, podendo alcançar valores maiores do que 5°C nas diferenças térmicas noturnas entre a área urbana e rural. Esse é o ponto para o qual se observa, na visualização da Fig. 3, maior heterogeneidade de altura das edificações em relação à sua posição relativa no cânion.

O ponto 5 foi o de menores diferenças térmicas noturnas, sendo também o de maior homogeneidade de altura das edificações em relação à sua posição relativa no cânion.

4.2 Geometria urbana dos pontos

O software ArcGIS foi utilizado para a representação da geometria urbana e para o cálculo de relação H/W para cada ponto de estudo. Na Tabela 2 encontram-se os números de edificações incluídas no cálculo de cada ponto e o respectivo valor de relação H/W resultante de cada simulação.

Tabela 2 Resultados dos valores de H/W calculados conforme o raio de abrangência

	Simulação A		Simulação B		Simulação C		Simulação D	
	Nº edif.	H/W	Nº edif.	H/W	Nº edif.	H/W	Nº edif.	H/W
Ponto 1	12	0,27	9	0,27	5	0,28	5	0,29
Ponto 2	8	0,87	6	0,55	5	0,78	4	0,33
Ponto 3	9	0,65	8	0,46	5	0,30	5	0,11
Ponto 4	9	0,22	7	0,23	5	0,23	5	0,24
Ponto 5	14	0,25	10	0,27	5	0,28	5	0,29

A variação de relação H/W (desvio padrão) entre as simulações é menor nos pontos 1, 4 e 5 e maior nos pontos 2 e 3. Isso pode ser explicado também pela maior heterogeneidade de alturas de edificações próximas ao ponto, como visto na Figura 3. A medida que o raio de abrangência muda, as diferenças de alturas das edificações incluídas no cálculo são maiores para os pontos 2 e 3.

Este é um aspecto que merece atenção para o cálculo da influência de H/W sobre o campo térmico urbano. Dependendo do valor adotado para H/W, podem ocorrer incoerências na entrada de dados de modelos de previsão que se baseiem nesse fator.

4.3 Comparação entre os raios de abrangência e a simulação com o modelo de Oke

Os gráficos da Figura 6 mostram a comparação entre os dados reais e os resultados obtidos pelo modelo de Oke para a diferença entre a temperatura rural e urbana, quando aplicados os diferentes raios de abrangência.

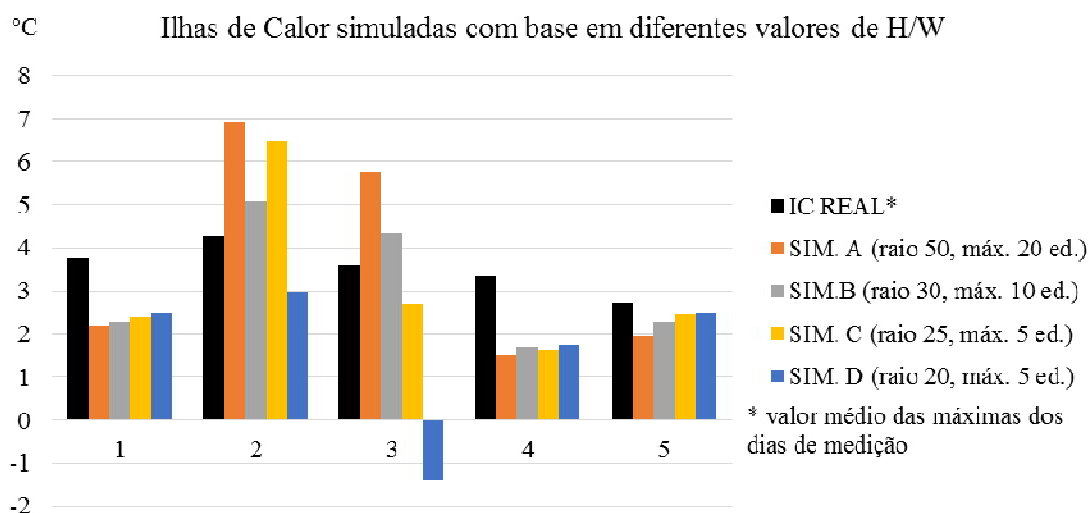


Fig. 6 Comparação entre intensidade da ilha de calor (IC) real e simuladas

O ponto 5 resultou nos menores erros, uma vez que é o de maior homogeneidade e, portanto, o que mais se encontra dentro dos limites do modelo de Oke. Naquele ponto, os valores de diferenças térmicas reais e simuladas para os raios de 20, 25 ou 30 m, não foram significativos. Apenas os resultados para o raio de 50 m se afastaram um pouco dos dados reais. Em todos os pontos, as maiores imprecisões foram geradas pelo raio de 50 m. Os

erros para 50m de raio podem ser tanto para valores maiores como menores do que os dados reais.

Pode ser esperado um erro maior do modelo de Oke, quando a extrapolação dos limites das condições em que foi desenvolvido é maior. Por isso, os pontos 2 e 3, mais heterogêneos nas alturas das edificações, tendem aos maiores erros. Porém ao se verificar o resultado específico para o raio de abrangência de 30 m (Simulação B) nesses dois pontos, o erro encontrado é menor do que 1°C. Isso pode indicar que esse raio de abrangência tem um potencial maior para a representatividade de H/W, quando considerada as condições reais urbanas. Foi um raio que gerou diferenças simuladas com maior equilíbrio entre os diversos pontos e raios.

Quanto ao potencial de extrapolação do modelo de Oke para uma situação real de alturas heterogêneas, foi verificada uma tendência diferenciada entre dois conjuntos de pontos. Para os pontos que possuem valores de H/W entre 0,22 e 0,29 o modelo estimou temperaturas mais baixas e para os pontos que possuem valores de H/W entre 0,46 e 0,78 o modelo estimou temperaturas mais altas que as esperadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os critérios de seleção de edificações para cálculo de relação H/W que apresentou melhores resultados foram quando considerados 30 metros de raio de abrangência e, no máximo, 10 edificações para o cálculo.

Nos pontos em que as alturas das edificações são mais homogêneas e a relação H/W é menor, o modelo subestimou o valor de intensidade máxima de ilha de calor. Por outro lado, nos pontos em que havia algumas edificações muito altas entre as edificações mais baixas, o modelo superestimou o valor de intensidade máxima de ilha de calor.

Isso pode ser explicado pelo fato do modelo desenvolvido por Oke ter sido baseado em experimento envolvendo cânions urbanos simulados homogêneos. Essa condição acaba não equivalendo a um ambiente urbano real, pela diversidade de formas, recuos e alturas das construções. Além disso, existem condições diferentes entre um experimento em laboratório e um levantamento de dados em condições reais externas. As diferentes características do meio urbano que influenciam nos fenômenos térmicos urbanos merecem uma maior atenção em estudos de clima urbano, pois dificilmente a geometria urbana pode ser isolada de outras variáveis, quando realizados experimentos sob condições urbanas reais.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado e à CAPES pela concessão de bolsa de doutorado sanduíche no exterior.

7 REFERÊNCIAS

Atkinson, B. W. (2003) Numerical modelling of urban heat-island intensity. **Bound-Layer Meteorol**, 109 (3): 285–310.

Balázs, B.; Unger, J.; Gál, T.; Sümeghy, Z.; Geiger, J; Szegedi, S. (2009) Simulation of the mean urban heat island using 2D surface parameters: empirical modeling, verification and extension. **Meteorological Applications**, vol. 16, n° 3, pp. 275-287.

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

Erell, E.; Williamson, T. (2007) The Spatial Variability of Air Temperature in the Urban Canopy Layer. In: PALENC CONFERENCE, 2.; AIVC CONFERENCE, 28., Ilha de Creta, 2007. **Proceedings...** Ilha de Creta: PALENC, 2007. p. 304-308.

Fahmy, M.; Mokhtar, H.; Gira, A. (2012) Adaptative urban form design on a climate change basis; A case study in Nuba, Egypt. **Proceedings...** ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, 6th-10th August, 2012, UCD, Dublin Ireland.

Fortuniak, K. (2003) An application of the urban energy balance scheme for a statistical modeling of the UHI intensity. **Proceedings** of the 5th International Conference on Urban Climate, K. Klysik, T. R. Oke, K. Fortuniak et al., Eds., vol. 1, pp. 59-62, University of Lodz, Lodz, Poland.

Gartland, L. (2010) Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. **São Paulo: Oficina de Textos**.

Han, S.; Mun, S.; Huh, J. (2007) Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. **Proceeding: Building Simulation**.

IBGE. Mapa de climas do Brasil – IBGE (PDF). IBGE.gov.br. Página visitada em 25 de fevereiro de 2011.

Kanda, M.; Kawai, T.; Kanega, M.; Moriwaki, R.; Narita, K.; Hagishima, A. (2005) Simple energy balance model for regular building arrays. **Bound-Layer Meteorology** 116: 423-443.

Oke, T. R. (1981) Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations, **Journal of Climatology**, vol. 1, 237-254.

Oke, T. R. (1984) Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. **Energy and Buildings**, vol. 7, no. 1, pp. 1-10.

Santo, M. A.; Maggiotto, G.; Stocker, J.; Carruthers, D.; Sabatino, S. Di. (2012) Comparison of ADMS-Temperature and Humidity model and ENVIMET and measured temperature values. **Proceedings...** ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, 6th-10th August, 2012, UCD, Dublin Ireland.

Souza, L. C. L., Tente, C. M., Giunta, M. B., Nakata, C. M. (2010) 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.

Svensson, M.; Eliasson, I.; Holmer, B. (2002) 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.

Zinzi, M.; Carnielo, E.; Marinelli, E. (2012) Thermal and solar characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures. **Proceedings...** ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, 6th-10th August, 2012, UCD, Dublin Ireland.