



O USO DE IMAGENS DE SATÉLITE EM ESTIMATIVAS DE TEMPERATURAS DO AR NA CAMADA INTRA-URBANA

João Roberto Gomes de Faria

UNESP – Universidade Estadual Paulista/FAAC, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n,
17030-360 – Bauru-SP, tel +55 14 3103-6059, fax +55 14 3103-6059
e-mail: joaofari@faac.unesp.br

RESUMO

A verificação da sensação térmica em espaços urbanos parte da caracterização das propriedades térmicas locais da camada intra-urbana. Os modelos de balanço energético unidimensional são constantemente usados na caracterização da distribuição de temperaturas do ar ao longo da camada intra-urbana e em simulações dessa distribuição quando são previstas alterações nas propriedades superficiais. Neste artigo são apresentados um panorama sobre o uso desses modelos em áreas urbanas e uma aplicação na cidade de Bauru (SP), onde os dados de superfícies foram obtidos através de imagens de satélite. Os resultados reproduziram com boa aproximação dados de temperatura do ar medidos ao longo de um dia em diversos pontos e mostraram que em Bauru a vegetação exerce ainda grande efeito na distribuição da temperatura do ar na camada intra-urbana.

ABSTRACT

The verification of the thermal sensation in the urban open spaces begins with the characterization of the local urban canopy layer thermal properties. The one-dimensional heat budget models are used several times on the characterization of the air temperature distribution in the urban canopy layer and to simulate this distribution when changes have been done on surfaces properties. This paper presents an overview of the utilization of these models in urban areas and an application in the city of Bauru (SP), where the surfaces data input were obtained from satellites images. The results fit well with air temperature data measured along a day in several points and put in evidence that in Bauru the vegetation cover have a great effect on the air temperature distribution in the urban canopy layer.

1. INTRODUÇÃO

O NUCAM – Núcleo de Conforto Ambiental da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação da UNESP desenvolve há algum tempo trabalhos envolvendo estudos de sensações térmicas e demandas de energia em edifícios relacionados com a morfologia dos espaços urbanos. Neles, têm se verificado que as etapas de levantamentos de dados para a caracterização térmica do espaço envolvem grande demanda de tempo. Assim, espera-se com o presente trabalho reduzir os investimentos nessa etapa.

Essa pesquisa dá seqüência aos trabalhos de Faria e Souza (2005), que têm por objetivo desenvolver ferramentas para análise e projeto em conforto ambiental. Na pesquisa anterior foram estudadas formas de se empregar imagens de satélite para criar classes de áreas termicamente homogêneas na cidade. Nesta, estuda-se a integração da imagem satélite com métodos de cálculo da distribuição da temperatura do ar na camada intra-urbana, iniciando pelos modelos de balanço energético unidimensional (MBEU).

Os MBEUs, como o próprio nome sugere, fazem o balanço energético entre uma superfície horizontal e as camadas da atmosfera acima dela. Desse balanço é possível extrair uma série de informações, como a composição dos fluxos de energia e a conseqüente relevância das propriedades superficiais, ou as temperaturas da superfície e do ar próximo a ela. São também chamados “modelos de placa plana” uma vez que a superfície tridimensional é reduzida a uma superfície plana, desaparecendo as interações térmicas entre superfícies verticais e interferências da rugosidade no fluxo do ar. Sua origem está nos estudos de meso-escala de áreas rurais, onde as estruturas das camadas atmosféricas próximas ao solo são simples.

Esse tipo de modelo assume que na sub-camada de rugosidade (a camada da atmosfera que vai do solo até acima dos obstáculos) os fluxos de energia são constantes em relação à altura, devido à intensa turbulência que nela ocorre. Assim, considera-se que a temperatura, que na realidade é calculada como sendo a da superfície, é aproximadamente igual à temperatura do ar acima dela (MORIYAMA e TAKEBAYASHI, 1999).

O primeiro MBEU aplicado ao meio urbano deve-se a Myrup (1969), que tinha por objetivo a caracterização da ilha de calor urbana. Nesse modelo, toda a área de uma cidade hipotética foi transformada numa imensa placa plana.

Em modelos posteriores, a área da cidade foi discretizada, através da alteração de constantes (capacidade e condutividade térmica) e de parâmetros superficiais (albedo, comprimento de rugosidade e disponibilidade de umidade). A capacidade térmica pode ser alterada pela estimativa de uma espessura de concreto equivalente na superfície, responsável pelo armazenamento de calor da massa edificada da cidade. Com tal inovação, incluída por Tso (1990), *apud* Barbirato (1998), o modelo foi empregado pela última para analisar o ambiente térmico urbano de Maceió (AL). Os MBEUs têm aumentado seu grau de complexidade, como a inclusão da difusão de calor em múltiplas camadas superficiais (KUSAKA *et al.*, 2001) e de fluxo de calor antropogênico (estimado a partir do consumo de energia elétrica e do tráfego de veículos, como em MORIYAMA e TAKEBAYASHI, 1999b), além do efeito de gases e de particulados poluentes no clima urbano (BORNSTEIN e CRAIG, 2001). Outros MBEUs acoplam modelos de camada atmosférica limite para determinar os valores das variáveis no topo da subcamada de rugosidade, que não são medidos por estações meteorológicas (LAKES, 2005).

No processo de discretização, a área de estudo passou a ser formada por subáreas nas quais as diversas superfícies presentes transformam-se numa única, com propriedades médias. Dessa forma, em cada área homogênea de cálculo, as temperaturas de superfícies de ruas e topos de prédios, assim como de vegetação, caso haja, são as mesmas (KUSAKA *et al.*, 2001). O conceito dessa subárea homogênea relaciona-se ao conceito do pixel de uma imagem digital, unidade na qual está armazenada uma série de atributos da imagem, o que, por sua vez, abre espaço para o uso das imagens de satélite. Essas imagens são formadas por pixels compostos, em geral, por segmentos das várias superfícies abrangidas pelas suas coordenadas espaciais. Assim, a refletividade de cada pixel é o resultado da composição das refletividades dessas superfícies.

Numa seqüência de trabalhos, Ojima e Moriyama (1982) e Moriyama e Takebayashi (1999a e 1999b) desenvolveram uma vertente do modelo unidimensional de balanço, incorporando a ele inovações tecnológicas que refletem esse conceito. Assim, no primeiro artigo a área de estudo foi discretizada através de uma quadrícula (500 m de lado) e a base de dados superficiais empregada foi um mapa de uso e ocupação do solo. As propriedades superficiais (albedo e emissividade) foram extraídas de trabalhos anteriores. No último artigo, a base foi um conjunto de imagens do satélite Landsat-7 ETM+ (com resolução re-amostrada para 500 m) e as propriedades superficiais (exceto a rugosidade) foram extraídas do tratamento dessas imagens.

Existe atualmente uma grande quantidade de trabalhos que procuram determinar propriedades das superfícies, como albedo e emissividade, a partir de relações de refletividades e de refletâncias das diversas bandas que compõem uma imagem de satélite. Boa parte deles usa uma relação entre as refletividade (ou refletância) dos pixels das bandas 3 e 4 dos satélites da série Landsat chamada

“índice de vegetação da diferença normalizada” (IVDN ou NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*) para derivar aquelas propriedades, tal qual Roerink *et al.* (2000).

As operações envolvidas em tratamentos de imagens são bastante simplificadas pelo uso de sistemas de informação geográfica (SIG), como o Spring (Câmara *et al.*, 1996), que as executam através de rotinas internas ou através de programação complementar relativamente simples. Atualmente estão disponíveis gratuitamente na web, no site do Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Aeroespaciais – http://www.cbears.inpe.br/pt/index_pt.htm), as imagens do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres, o CBERS-2. Elas são radiometricamente compatíveis com as imagens do Landsat-7 ETM+. Assim, a farta literatura sobre o tratamento de imagens do Landsat-7 pode ser também empregada para as imagens do CBERS-2.

Bornstein e Craig (2001) e Piringer *et al.* (2002) apontam uma série de problemas de ordem conceitual operacional que ocorrem quando se adapta o MBEU para superfícies urbanas. Elas são decorrentes principalmente da complexidade da superfície urbana, quando comparado à rural. Assim, a camada intra-urbana é composta por uma série de vales, cujas diferentes orientações lhes conferem comportamentos distintos, e a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, que possibilita o cálculo dos fluxos, não é válida para a sub-camada de rugosidade nessas condições.

No entanto, pela simplicidade conceitual e operacional e pela boa aproximação dos resultados, os modelos unidimensionais continuam a ser aprimorados e usados na análise de climas urbanos em meso-escala, desde que as trocas térmicas envolvendo superfícies verticais possam ser desprezadas. Isso ocorre em áreas urbanas com baixo índice de verticalização, situação comum a um grande número de cidades interioranas do Brasil, que apresentam perfil predominantemente horizontal, embora seu porte seja considerável. A opção de migrar para modelos tridimensionais, mais complexos, depende do objetivo do estudo. O modelo de meso-escala, operando com unidades de área de 500 m de lado, é suficiente para estudos envolvendo planejamento urbano (por exemplo, o impacto provocado pela implantação de um conjunto habitacional), mas o estudo dos ambientes que compõem essas unidades sem dúvida exige modelos mais complexos. Por fim, mas não menos importante, sempre existe questões relativas à disponibilidade de dados: são poucas as cidades que contam com bases cadastrais digitalizadas e atualizadas. Qualquer outro tipo de base significa investimento de recursos para gerar uma base de dados de superfície, inclusive volumetria, exigida pelos modelos tridimensionais.

Os trabalhos de Faria e Mendes (2004) e Faria e Souza (2005), apresentam uma metodologia para caracterização da distribuição da temperatura do ar na camada intra-urbana na situação presente, mas não permitem simulações de situações decorrentes do crescimento das cidades. Assim, como evolução daqueles trabalhos, investigou-se a viabilidade de realizar essas simulações a partir de modelos de balanço de energia. Como nos trabalhos anteriores, tomou-se a cidade de Bauru (SP) por objeto de estudo e, portanto, deparou-se com os mesmos problemas existentes anteriormente: bases cartográficas da área urbana desatualizadas e inexistência de bases digitais. Em vista dessas dificuldades, optou-se novamente por extrair o máximo possível de informações de imagens de satélite e, dado essa precariedade de dados, não seria possível alimentar com eles senão um MBEU.

Bauru apresenta atualmente os elementos para um bom desempenho de um MBEU: morfologia predominantemente horizontal, com verticalização esparsa, e fatores de visão de céu (FVC) elevados, raramente abaixo de 0,6 (FARIA e SOUZA, 2005), elementos esses que reduzem a importância dos fluxos a partir de superfícies verticais.

O MBEU elaborado para a realização deste trabalho parte de uma formulação geral, usada por uma série de trabalhos, complementada por formulações necessárias para a extração das informações necessárias de imagens de satélite.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para agilizar os trabalhos, foram empregadas as imagens tratadas nos trabalhos anteriores a partir da cena do Landsat-7 ETM+ do dia 18 de abril de 2002, contendo a área de estudo. Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP (IPMet),

localizado fora da área de estudo, na forma de registro digital com intervalos entre de aquisições de 5 min.

As imagens do Landsat foram processadas no SIG Spring. Elas foram re-amostradas de forma que seus pixels ficaram com 500 m de lado, dimensão essa presente nos trabalhos consultados e compatível com a meso-escala. Com as imagens re-amostradas foram elaboradas as imagens de valores de $NDVI$ (eq. 1) e $NDVIr$ (eq. 2). Com o próprio Spring, empregando programação em linguagem própria (LEGAL – Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico), foram derivadas imagens contendo os albedos (α_0) e as emissividades (ϵ_0) superficiais dos pixels, calculados respectivamente a partir das formulações empíricas apresentadas por Chemin (2002) e Roerink *et al.* (2000) para o primeiro termo (eq. 3) e Valor e Caselles (1986) para o segundo (eq. 4 e 5).

$$NDVI = \frac{DN_4 - DN_3}{DN_4 + DN_3} \quad (1)$$

$$NDVIr = \frac{r_4 - r_3}{r_4 + r_3} \quad (2)$$

As refletâncias dos pixels são calculadas a partir dos procedimentos apresentados por NASA (2004).

$$\alpha_0 = \frac{0,293r_1 + 0,274r_2 + 0,233r_3 + 0,156r_4 + 0,033r_5 + 0,011r_7 - 0,016}{0,536} \quad (3)$$

$$\epsilon_0 = \epsilon_v P_v + \epsilon_g (1 - P_v) + \langle d\epsilon \rangle P_v (1 - P_v) \quad (4)$$

$$P_v = \frac{NDVIr - NDVIr_g}{NDVIr_v - NDVIr_g} \quad (5)$$

No presente trabalho foram adotados valores sugeridos por Roerink *et al.* (2000): $\epsilon_g = 0,91$; $\epsilon_v = 0,99$; $\langle d\epsilon \rangle = 0,02$; $NDVIr_g = 0,1$ e $NDVIr_v = 0,8$.

Os demais dados superficiais, como densidade, calor específico e rugosidade, foram extraídos da bibliografia anteriormente referenciada.

A formulação geral de um MBEU pressupõe o equilíbrio de fluxos num determinado instante, conforme a eq. 6, cujo esquema é representado na fig. 1. O objetivo é calcular a temperatura da superfície (e, conseqüentemente, da base da sub-camada de rugosidade) que possibilite esse equilíbrio.

$$R = H + IE + G + ST \quad (6)$$

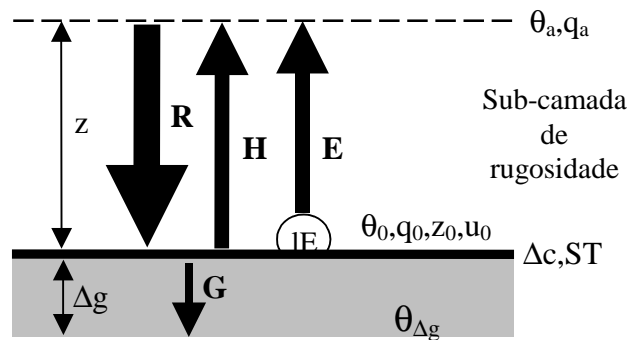


Fig. 1. Diagrama esquemático do modelo do balanço unidimensional de energia usado neste trabalho.

No presente trabalho optou-se por incluir um termo relativo à taxa de calor armazenada na superfície (ST), que função de uma superfície equivalente de concreto de espessura Δc . Não foi incluído o fluxo de calor antropogênico, uma vez que em Bauru o uso de energia para climatização não é tão expressivo e o tráfego é de pequena intensidade quando não se trata de vias arteriais e principais. Os

termos envolvidos na eq. 6 foram tratados como sendo as respectivas densidades de fluxo e taxa de armazenamento por unidade de área, uma vez que balanço é feito em áreas de propriedades homogêneas.

A radiação líquida é dada pela diferença entre a radiação solar global e as radiações de ondas longas.

$$R = (1 - \alpha_0)R_s + L \downarrow - L \uparrow \quad (7)$$

No período de aquisição da imagem e do levantamento dos dados usados na calibração do modelo, o sensor de radiação da estação automática do IPMet estava avariado. Assim, a radiação solar (R_s) foi calculada a partir do algoritmo de Bird e Hulstrom (1981). As radiações de ondas longas são calculadas pela lei de Stefan-Boltzmann (eq. 8 e 9).

$$L \uparrow = \varepsilon_0 \sigma T_0^4 \quad (8)$$

$$L \downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (9)$$

A emissividade da abóbada (ε_a) pode ser determinada a partir da equação de Brunt (MORIYAMA e TAKEBAYASHI, 1999b) (eq. 10).

$$\varepsilon_a = a\sqrt{Pw_a} + b \quad (10)$$

A eq. 10, assim como várias outras que virão a seguir, dependem de dados do topo da camada limite (índices a). Na falta deles, considerou-se o estado da atmosfera como neutro e empregaram-se equações hidrostáticas para gerar os dados necessários. Essas equações são comuns a vários livros de hidrologia e neste trabalho elas foram extraídas de Occhipinti (1989).

$$H = \alpha_c (\theta_0 - \theta_a) \quad (11)$$

$$\alpha_c = \frac{\rho_{ar} C_{ar} u_{ref} \kappa^2}{\Psi_m \Psi_h} \quad (12)$$

Apesar das considerações de Bornstein e Craig (2001) e Piringer *et al.* (2002) sobre as restrições do uso da similaridade de Monin-Obukhov na sub-camada de rugosidade, ela é correntemente usada nos MBEU, com bons resultados. Ela é empregada nas funções universais de transferência para converter a velocidade do vento meteorológico da altura de medição na estação (z_{ref}) para a base da sub-camada de rugosidade (z_0) (eq. 13 e 14).

$$\Psi_m = \ln \frac{z_{ref}}{z_0} \quad (13)$$

$$\Psi_h = 0,74 \Psi_m \quad (14)$$

$$LE = w l \alpha_w (q_0 - q_a) \quad (15)$$

$$\alpha_w = \frac{\alpha_c}{C_{ar}} \quad (16)$$

$$w = \frac{42,66 - 48,75\alpha_0}{59,81 - 37,78\alpha_0 - \theta_0} \quad (17)$$

A eficiência evaporativa da superfície (w) representa, a rigor, a relação entre o balanço dos fluxos de calor por radiação e condução e o evaporativo. Ela é responsável pelo melhor ajuste do modelo nos períodos próximos à temperatura máxima. No presente trabalho ela é calculada pela expressão empírica de Roerink *et al.* (2000) (eq. 17). Durante a calibração do modelo, verificou-se a necessidade de um coeficiente de redução para ajustar o valor de w . Assim, foram testadas soluções onde seu valor variou de 5 a 100% em relação ao valor encontrado diretamente na eq. 17.

$$G = \lambda_g \frac{\theta_0 - \theta_{\Delta g}}{\Delta g} \quad (18)$$

Devido à inércia térmica do subsolo, G é calculado em regime transiente.

$$ST = \rho_c C_c \Delta c \frac{\theta_{0,t} - \theta_{0,t-\Delta t}}{\Delta t} \quad (19)$$

A espessura equivalente de concreto (Δc) não foi estimada a partir de dados de campo, mas tratada como parâmetro e ajustada durante a fase de calibração do modelo. A partir dos valores levantados por Barbirato (1998) foram elaboradas equações de regressão linear de Δc em função de $NDVI$. Foram testadas equações variando-se a espessura máxima de 0,1 m a 0,5 m.

Para a resolução do MBEU, θ_0 foi calculada iterativamente até que a eq. 20 fosse satisfeita.

$$|R - H - lE - G - ST| < Erro \quad (20)$$

Para calibrar o MBEU foram usados dados levantados em 14 de abril de 2003, mesmo mês de aquisição da imagem. Esse sincronismo é necessário porque o albedo e a emissividade dos vegetais muda de acordo com a disponibilidade de água, e ela é bem distinta nos períodos de inverno e verão na região de Bauru.

Depois de calibrado, o modelo foi rodado com os parâmetros ajustados e os resultados foram importados pelo Spring para gerar uma imagem da distribuição das temperaturas da base da sub-camada de rugosidade.

3. RESULTADOS

A fig. 2, resultante do tratamento das imagens do Landsat, indica a distribuição da ocupação da área urbana de Bauru. As áreas claras representam as porções mais densamente ocupadas da cidade, que não são necessariamente as verticalizadas. Assim, as áreas mais claras correspondem, além do centro verticalizado, a conjuntos de interesse social localizados na periferia e de implantação recente, onde os lotes são pequenos e a presença de vegetação de qualquer espécie é praticamente nula.

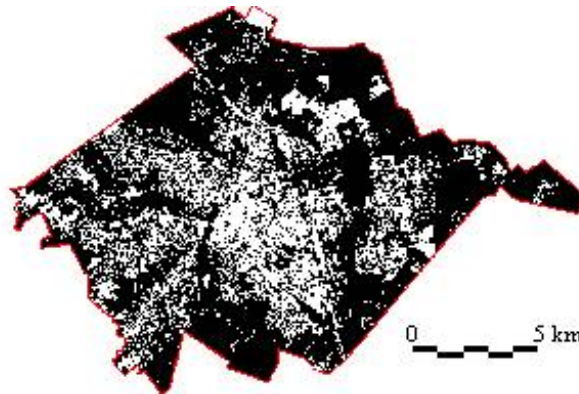


Fig. 2. Área de estudo. As porções mais claras indicam regiões mais densamente ocupadas.

As figs. 3 e 4 mostram, respectivamente, as distribuições do albedo e da emissividade superficiais, calculadas segundo os procedimentos descritos. Os valores são coerentes com os indicados na bibliografia, em especial os expostos por Oke (1987).

A melhor combinação de parâmetros (Δc e w), ajustados manualmente, foi composta pelos seguintes valores:

$$w = 8,5\% \text{ do valor encontrado na eq. 17}$$

$$\Delta c = -0,002NDVI + 0,35 \quad (21)$$

A grande redução no valor calculado pela eq. 17 resulta, na realidade, em valores de w compatíveis com os encontrados por Moriyama e Takebayashi (1999b), de onde se conclui que a formulação de Roerink *et al.* (2000) superestima a variável.

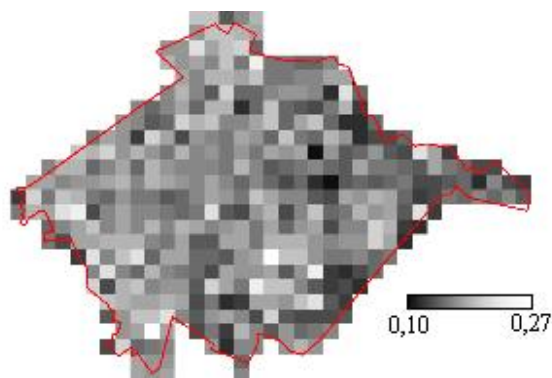


Fig. 3. Distribuição espacial do albedo.

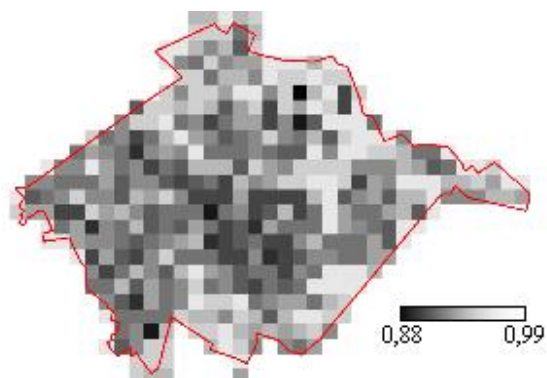


Fig. 4. Distribuição espacial da emissividade.

A eq. 21 resulta de um Δc máximo de 0,2 m, para uma escala de *NDVI* variando de 0 a 200, em valores digitais. O valor é inferior ao encontrado por Barbirato (1998), o que era esperado, uma vez que a ocupação de Bauri é menos densa do que a de Maceió.

Nas figs. 5 e 6 são comparadas as temperaturas do ar medidas na estação meteorológica e em pontos no interior da área urbana e as simuladas pelo modelo nos pixels correspondentes às localizações dos pontos do levantamento. Nelas, pode-se notar a boa aproximação entre os valores de temperatura calculados e os medidos. Verificam-se diferenças de entre as temperaturas simuladas (correspondentes às temperaturas no interior da camada intra-urbana) e as medidas no IPMet (fora da área urbana) nos períodos próximos à ocorrência da máxima da ordem de 3K. Essa ordem de grandeza é compatível com as verificadas no levantamento realizado em Faria e Souza (2005).

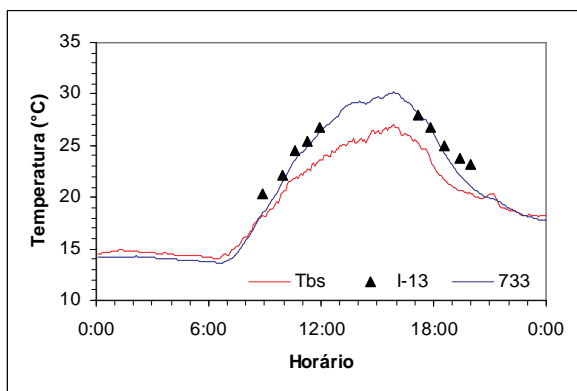


Fig. 5. Temperaturas do ar medidas no IPMet (Tbs), num ponto com entorno densamente ocupado (I-13) e simulada no pixel correspondente ao local do ponto (733).

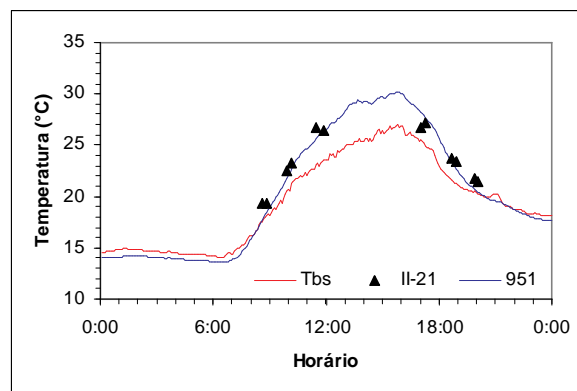


Fig. 6. Temperaturas do ar medidas no IPMet (Tbs), num ponto em fundo de vale (II-21) e simulada no pixel correspondente ao local do ponto (951).

A fig. 7 mostra a distribuição espacial da temperatura do ar às 21 horas. Comparando-se essa figura com a fig. 2, verifica-se a forte associação entre as distribuições de temperatura do ar de vegetação. Os dados simulados confirmam a pequena diferença de temperaturas do ar que havia sido detectada pelo levantamento citado anteriormente. A boa aproximação dos resultados era esperada, por conta da morfologia predominantemente horizontal da cidade, com FVC elevados.

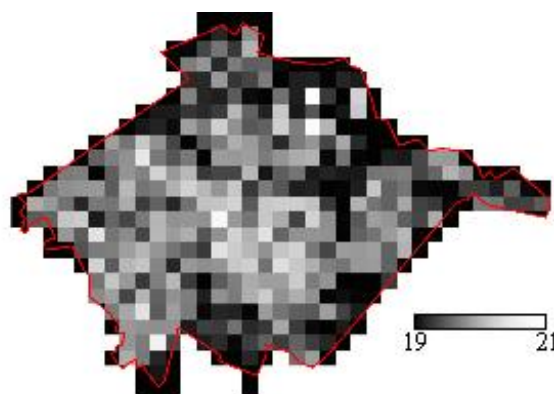


Fig. 7. Distribuição espacial da temperatura do ar simulada para as 21 horas do dia 14 de abril de 2003.

4. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste artigo um panorama sobre o uso de modelos de balanço energético (MBEU) aplicados em áreas urbanas, mostrando suas vantagens e limitações. A outra finalidade do artigo foi a elaborar procedimentos para integrar imagens de satélite a esses modelos. O uso do modelo em meso-escala em conjunto com essas imagens o torna propício para aplicações em planejamento urbano e regional, tanto para mapear a situação existente como para simular impactos da alteração das características superficiais. A partir da aplicação de MBEU na área urbana de Bauru, tendo por entrada de dados superficiais imagens do satélite Landsat-7 ETM+, verificou-se a boa aproximação de temperaturas do ar calculadas em relação a dados medidos ao longo da cidade.

Um dos motivos do bom desempenho do modelo pode ser atribuído à morfologia da cidade, ainda predominantemente horizontal e com verticalização esparsa. Dessa forma, o modelo pode ainda servir para monitorar os efeitos da recente expansão da área urbana, através de loteamentos fechados na zona sul, assim como do crescente adensamento de áreas verticalizadas.

Pretende-se aperfeiçoar o modelo, incorporando algoritmos para o ajuste automático de parâmetros. Pretende-se também analisar seqüências de imagens do CBERS-2 para estudar o impacto da alteração das propriedades superficiais ao longo do ano, assim como simular cenários de expansão urbana e adensamento de áreas verticalizadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARBIRATO, G. M. (1998) *Aplicação de modelo de balanço de energia para análise do ambiente térmico urbano de Maceió-AL*, USP – Escola de Engenharia de São Carlos, (tese de doutorado).
- BIRD, R. E.; HULSTROM, R. L. (1981) *A simplified clear sky model for direct and diffuse insolation on horizontal surfaces*, Solar Energy Research Institute, Golden, CO. (ERI Technical Report SERI/TR-642-761). Disponível em <<http://rredc.nrel.gov/solar/pubs/PDFs/TR-642-761.pdf>>. Último acesso: junho de 2004.
- CÂMARA, G.; SOUZA, R. C. M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J.; MITSUO, F. (1996) SPRING: integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling, *J. Computers & Graphics*, **20**:(3), 395-403.
- CHEMIN, Y. (2002) *Evapotranspiration by energy balance budget, applied theory to common satellite sensors*. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. (PhD special study report).
- FARIA, J. R. G.; MENDES, J. F. (2004) Sobre o uso e ocupação do solo urbano e temperatura do ar. *Ambiente Construído*, **4**:(3), 7-17.

- FARIA, J. R. G.; SOUZA, L. C. L. (2005) Caracterização do campo térmico intra-urbano, in: J. F. G. MENDES; A. N. R. SILVA; L. C. L. SOUZA e R. A. R. RAMOS (orgs.) *Contribuições para o desenvolvimento sustentável em cidades brasileiras e portuguesas*, Almedina, Coimbra.
- KUSAKA, H.; KONDO, H.; KIKEGAWA, Y.; KIMURA, F. (2001) A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models, *Boundary-Layer Meteorology*, **101**: 329-358.
- LAKES Environment (2005) *AERMOD tech guide*. Disponível em <<http://www.weblakes.com/AERMOD/tableofcontents.html>>. Último acesso: abril de 2005.
- MORIYAMA, M.; TAKEBAYASHI, H. (1999a) Determination method of coefficients and its problems in the simulation of urban air temperature based on one dimensional heat budget model, *Proceedings of Building Simulation'99*, Kyoto, Japan.
- MORIYAMA, M. e TAKEBAYASHI, H. (1999b) Making method of “klimatope” map based on normalized vegetation index and one-dimensional heat budget model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **81**: 211-220.
- MYRUP, L. O. (1969) A numerical model of the urban heat island. *Journal of Applied Meteorology*, **8**: 908-918.
- NASA (2004) *Landsat 7 Science Data Users Handbook. Chapter 11 – Data Products*. Disponível em <http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_htmls/chapter11/chapter11.html>. Último acesso: dezembro de 2004.
- OCCHIPINTI, A. G. (1989) Hidrometeorologia. in: RAMOS, F. *et al. Engenharia hidrológica*. ABRH/Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, v. 2, p. 19-141. (Coleção ABRH de recursos hídricos).
- OJIMA, T. e MORIYAMA, M. (1982) Earth surface heat changes caused by urbanization. *Energy and Buildings*, **4**: 99-114.
- OKE, T. R. (1987) *Boundary layer climates*. 2nd. ed. Routledge, London.
- PIRINGER, M.; GRIMMOND, C. S. B.; JOFFRE, S. M.; MESTAYER, P.; MIDDLETON, D. R.; ROTACH, M. W.; BAKLANOV, A.; De RIDDER, K.; FERREIRA, J.; GUILLOTEAU, E.; KARPPINEN, A.; MARTILLI, A.; MASSON, V.; TOMBROU, M. (2002) Investigating the surface energy balance in urban areas – recent advances and future needs, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, **2**: 1-16.
- ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. (2000) S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance, *Phys. Chem. Earth (B)*, **25**:2, 147-157.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e à Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP) pelo suporte financeiro para a participação neste evento.

ANEXO – LISTA DE SÍMBOLOS

- C_{ar} – calor específico do ar (J/kg°C)
 E – taxa de evaporação (kg/m²s)
 G – densidade de fluxo de calor por condução para o subsolo (W/m²)
 H – densidade de fluxo de calor sensível (W/m²)
 $L\uparrow, L\downarrow$ – densidade de fluxo de radiação de ondas longas ascendente e descendente (W/m²)

P_w	– pressão de vapor de água (kPa)
R	– densidade de fluxo de radiação líquida (W/m^2)
R_s	– densidade de fluxo de radiação solar global (W/m^2)
ST	– taxa de armazenamento de calor por unidade de área (W/m^2)
T	– temperatura absoluta do ar (K)
a, b	– constantes da equação de Brunt ($a = 0,51$; $b = 0,209$)
l	– calor latente de evaporação (J/kg)
LE	– densidade de fluxo de calor latente (W/m^2)
q	– umidade específica ($g_{vapor}/g_{ar\ seco}$)
r_i	– refletância do pixel da banda de refletividades i
u	– velocidade do vento meteorológico (m/s)
w	– eficiência evaporativa
z	– altura
Ψ_m, Ψ_h	– valores integrados da função universal de transferência de fluxo
Δg	– profundidade do subsolo a partir da qual a temperatura é constante (aproximadamente 0,5 m)
Δc	– espessura equivalente da placa de concreto correspondente à massa edificada (m)
Δt	– intervalo de tempo entre dois cálculos de temperatura (s)
α_0	– albedo superficial
α_c	– coeficiente de transferência de calor sensível ($W/m^2\text{ }^\circ C$)
α_w	– coeficiente de transferência de umidade ($kg/(m^2\ h(kg/kg))$)
ε	– emissividade
κ	– constante de von Karman (0,35)
λ	– coeficiente de condutividade térmica ($W/m\text{ }^\circ C$)
θ	– temperatura do ar ($^\circ C$)
Índices	
0	– superfície ou próximo a ela
a	– topo da sub-camada de rugosidade ($z = 300\ m$)
c	– concreto
g	– subsolo
t	– tempo atual
$t-\Delta t$	– tempo anterior
ref	– padrão de observação de vento meteorológico (10 m)