



EFEITO DO TIPO DE VEGETAÇÃO URBANA NO CONFORTO TÉRMICO HUMANO PARA AMBIENTES EXTERNOS: UM ESTUDO DE CASO PARA SÃO PAULO

MARCOS VINICIUS BUENO DE MORAIS¹
VIVIANA VANESA URBINA GUERRERO²
EDMILSON DIAS DE FREITAS³

Resumo: Simulações numéricas com o modelo BRAMS foram realizadas para analisar o papel do tipo de vegetação no efeito da ilha de calor urbana e no conforto térmico humano para ambientes externos. As simulações mostraram que as vegetações mais altas contribuem para uma redução da temperatura, devido ao efeito de sombreamento, enquanto que a vegetação baixa, mesmo contribuindo para uma redução da temperatura, não tem muito impacto na temperatura efetiva. Esta variação é devido ao fluxo de calor latente produzido entre os dois tipos de vegetação.

Palavras-chave: Conforto térmico, vegetação urbana, BRAMS.

Abstract: Numerical simulations with BRAMS were performed to analyze the role of vegetation type on the effect of urban heat island and in human thermal comfort in outdoor environments. The simulations showed that the highest vegetation contribute to a reduction in temperature due to the shadowing effect, while the low vegetation, even contributing to a reduction in temperature does not have much impact on the effective temperature. This variation is due to flow of latent heat produced between the two types of vegetation.

Key-words: Thermal comfort, urban vegetation, BRAMS.

1 – Introdução

Tendo em vista que no Brasil cerca de 80% da população vive em cidades, o conhecimento do clima urbano é uma informação importante para a sociedade. Além do papel econômico, é importante estudar o papel do meio ambiente urbano sobre as pessoas e os materiais, a fim de subsidiar ações mitigadoras dos efeitos negativos que o clima urbano possa ter nas pessoas. Para investigar o clima urbano, nos últimos anos, vem sendo realizado um considerável esforço no desenvolvimento de modelos numéricos para simular

¹ Acadêmico do Programa de Pós-graduação em Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. e-mail: marcos.bueno@iag.usp.br

² Acadêmica do Programa de Pós-graduação em Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. e-mail: viviana.urbina@iag.usp.br.

³ Docente do Programa de Pós-graduação em Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. e-mail: efreitas@model.iag.usp.br.



as propriedades da camada limite urbana, em virtude da falta de dados observacionais em resolução espacial e temporal, necessárias para aplicações em gerenciamento ambiental, previsão do tempo e clima.

Estes modelos numéricos representam as regiões urbanas através de elementos de cânions der rua (MASSON, 2000; MARTILLI et al., 2002), que consistem de duas colunas paralelas representando as construções nas regiões urbanas. Esta representação da superfície urbana permite levar em conta a distribuição de sorvedouro de momentum em todos os elementos do cânion (teto, paredes e rua), além dos efeitos de sombreamento e retenção da radiação.

Uma boa caracterização das cidades não consiste somente na representação das construções mas também a área da superfície vegetada existente. Uma cidade é uma combinação de elementos como prédios, casas, bosques, etc. Hamdi e Schayes (2008) mostraram que com a inclusão desta fração, as simulações reproduzem de forma mais correta os dados observados na região da Basiléia, Suíça.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é um bom exemplo de área urbana de rápido crescimento. A RMSP é constituída por 39 municípios, com mais de 20 milhões de habitantes, e ocupa uma área de aproximadamente 8000 km², localizada entre a Serra da Cantareira e a Serra do Mar, distante cerca de 60 km do oceano Atlântico (Figura 01), com um clima caracterizado por um verão úmido e inverno seco.

Este trabalho tem como objetivo investigar o papel do tipo de vegetação urbana na cidade de São Paulo no conforto térmico humano para ambientes externos e na Ilha de Calor Urbana (ICU), utilizando a modelagem numérica.

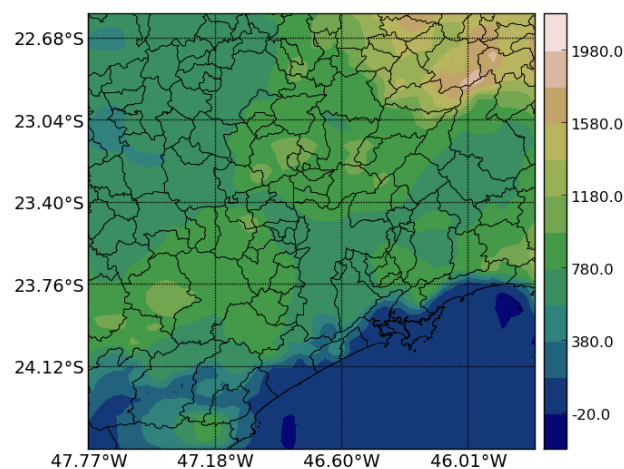


Figura 01 – Topografia e localização da RMSP.



2 – Metodologia

2.1 – Modelo Numérico

Para este trabalho foi utilizado o modelo numérico BRAMS (Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modelling System; FREITAS et al, 2009), que é um modelo de mesoescala com representação para os processos atmosféricos para regiões tropicais e sub-tropicais. Ele inclui várias parametrizações físicas de mistura turbulenta, convecção, radiação e processos de superfície.

O BRAMS inclui o modelo de superfície LEAF (Land Ecosystem-AtmosphereFeedback), que fornece as condições de limite inferior para o modelo numérico (LEE, 1992). O LEAF é um esquema solo-vegetação-atmosfera de transferência de energia e momentum, no qual equações de conservação de energia e momento são aplicáveis. Assumindo que os fluxos horizontais entre os diferentes tipos de superfície numa célula de grade são pequenos comparando-se aos fluxos verticais, o LEAF permite a subdivisão de cada célula em diferentes tipos de superfícies (patches; WALKO et al, 2000). Estes patches têm a finalidade de representar as variações nas características da superfície (tipo de solo, umidade, inclinação, tipo de vegetação, corpos de água). As equações prognósticas são evoluídas para cada componente ou patch na célula de grade. Nesta aproximação, todos os patches interagem com a mesma coluna de ar, cada um de acordo com a razão do tipo de superfície.

Para áreas urbanas, o esquema TEB (Town Energy Budget; MASSON, 2000) é utilizado. Ele utiliza uma geometria de cânion, permitindo o refinamento dos balanços radiativos bem como momento, calor turbulento e fluxos de superfícies. Este modelo foi inicialmente proposto por Nunez e Oke (1977), e sua forma é demonstrada na Figura 02.

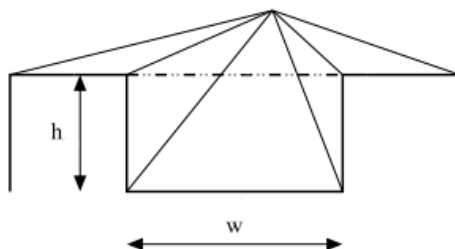


Figura 02 – Perspectiva de um cânion com comprimento infinito, onde h é altura do prédio e w a largura do cânion.



Para consideração do efeito da vegetação na região urbana, uma ponderação dos fluxos turbulentos de acordo com a fração de área de vegetação no ponto de grade urbana é realizada (Figura 03).

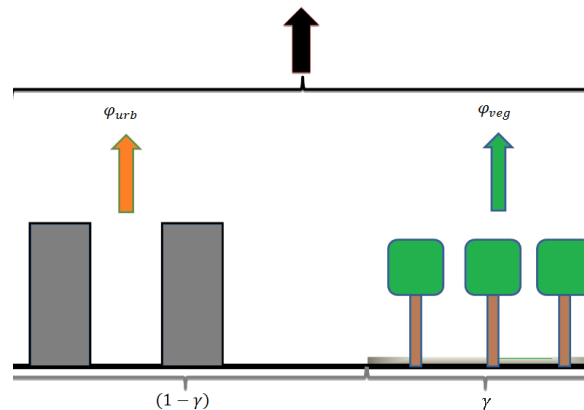


Figura 03 – Esquematização da ponderação dos fluxos turbulentos no ponto de grade do modelo.

$$\Phi_i = (1 - \gamma)\varphi_{urb} + \gamma\varphi_{veg} \quad (1)$$

onde φ_{urb} e φ_{veg} são os fluxos turbulentos de calor ou momentum para a região urbana e vegetada, respectivamente, Φ_i é o fluxo total no ponto de grade, e γ é a fração de vegetação no ponto de grade urbano, obtida a partir de dados do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Através de simulações numéricas, Gouvêa (2007) verificou que para a RMSP, o fluxo de calor latente aumentou em até 280 W/m², enquanto o fluxo de calor sensível diminuiu em até 200 W/m². Estas simulações foram realizadas de maneira “off-line”, ou seja, o impacto da vegetação urbana foi calculado separadamente. Além disso, observou-se o efeito da vegetação na estabilização da atmosfera. Conforme os cenários construídos, quanto maior a fração vegetada, mais próximo da neutralidade ou da estabilidade ficará o ambiente.

Neste trabalho, a ponderação dos fluxos é feita de maneira “on-line”, ou seja, para cada passo de tempo, calcula-se o impacto da vegetação nos fluxos turbulentos, incluindo a influência entre eles. Além disso, a fração de vegetação é obtida segundo Sellers *et al* (1996).



2.2 – Estrutura das rodadas

As características e parametrizações utilizadas no modelo numérico são as mesmas de Freitas (2003). Na Tabela 1, têm-se alguns dos parâmetros utilizados no esquema TEB para cada tipo de uso do solo urbanos e sua respectiva vegetação, baseada no Atlas Ambiental da cidade de São Paulo (SVMA, 2004).

Parâmetros	Urbano 1	Urbano 2	Urbano 3	Suburbano
Albedo Telhado	0,18	0,18	0,18	0,18
Albedo Rua	0,08	0,08	0,08	0,08
Albedo Parede	0,14	0,14	0,14	0,14
Emissividade Telhado	0,9	0,9	0,9	0,9
Emissividade Rua	0,95	0,95	0,95	0,95
Emissividade Parede	0,9	0,9	0,9	0,9
Altura das construções (m)	50	20	10	5
Razão Geométrica	10	2	1,25	0,6
Comprimento de Rugosidade	3	2	1	0,5
Fluxo de calor sensível do tráfego (W/m ²)	90	60	60	10
Fluxo de calor latente do tráfego (W/m ²)	10	10	5	5
Fluxo de calor sensível industrial (W/m ²)	14	14	10	10
Fluxo de calor latente industrial (W/m ²)	50	50	30	30
Fração urbana	0,7	0,6	0,5	0,5
Tipo de vegetação	Gramma curta	Floresta Mista	Árvores Perenes	Gramma Curta

Tabela 1Tabel 01 - Valores de alguns parâmetros utilizados dentro do TEB para as simulações. Os valores do albedo das superfícies foram obtidos de Morais *et al.* (2009)

A Figura 04 mostra o uso de solo urbano utilizado nas simulações. As características das construções para a RMSP seguem o padrão proposto por Gouvêa (2007). O tipo chamado de urbano 1 é considerado a região central da cidade, com alta densidade de construções e verticalidade pronunciada, bem como avenidas largas de intenso tráfego veicular. Já o tipo denominado urbano 2, está localizado no entorno desta região central, e é caracterizado por uma alta densidade de edificações, porém já com uma mescla de construções de porte médio. O urbano 3 possui uma característica mais residencial, com construções mais baixas e ruas estreitas, enquanto o suburbano, situado na periferia da área urbanizada, representa a transição entre a área urbana e a rural.

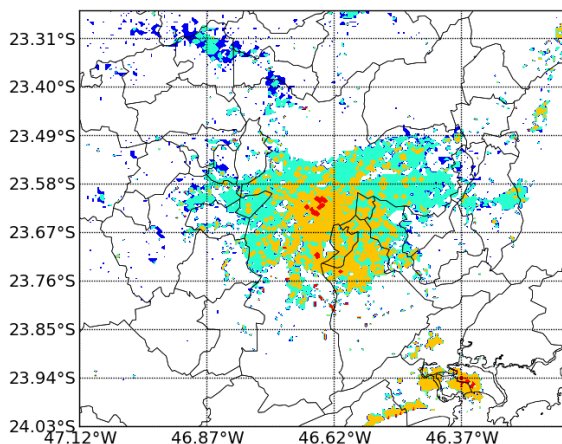


Figura 04 - Resultado da classificação da superfície urbana utilizada para esta simulação, com espaçamento de grade de 500 m, para a RMSP. A cor azul corresponde ao tipo suburbano, a cor verde ao tipo urbano 3, a cor amarela ao urbano 2 e a cor vermelha ao urbano 1.

Para as condições iniciais e de contorno foram utilizadas as análises do GFS, com espaçamento de grade horizontal de 1°. Todas as simulações foram de 72 horas, inicializando às 00Z do dia 17 de julho de 2008. Este período foi escolhido por serem dias de céu claro. Foram utilizadas três grades aninhadas (Figura 05), sendo o espaçamento horizontal (de menor a maior resolução) de 16 km, 4 km e 1 km. Os arquivos de topografia do USGS (U.S. Geological Survey), com resolução espacial de 1 km, foram utilizados sem nenhum tipo de modificação. Para a fração de vegetação, foram utilizados dados de NDVI do sensor MODIS dos satélites AQUA/TERRA para o dia 18 de julho de 2008, com espaçamento de 250 m (Figura 06).

Para análise do impacto do tipo de vegetação no conforto térmico humano para ambientes externos, três rodadas foram realizadas: uma denominada controle, com a configuração descrita; outra na qual a vegetação de todos os tipos urbanos descrito na Tabela 2 foi substituída por um tipo alta (Floresta Mista); e uma terceira, na qual a vegetação foi substituída por um tipo baixa (grama baixa). Para o cálculo da ICU, uma simulação substituindo a região urbana pela vegetação do tipo Floresta Mista foi utilizada. Este tipo de vegetação foi escolhido por ser a predominante no entorno da RMSP (FREITAS, 2003).

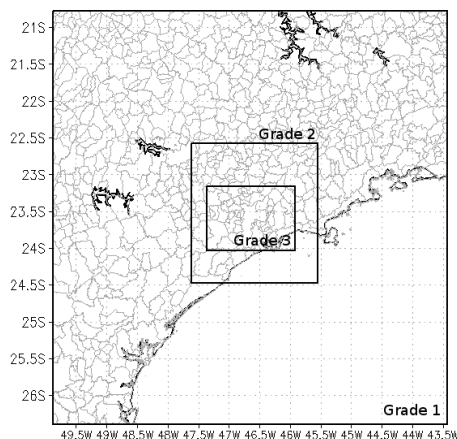


Figura 05 – Grades aninhadas utilizadas nas simulações.

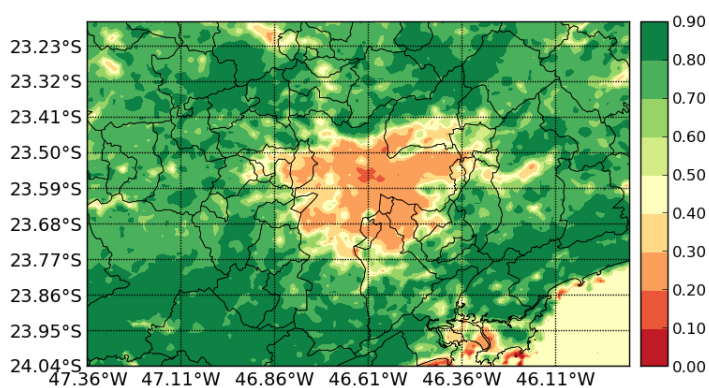


Figura 06 – NDVI para a RMSP com espaçamento de 250 m.

2.3 – Conforto Térmico

A relação de conforto térmico humano para ambientes externos utilizada neste trabalho foi a Temperatura Efetiva (TE) proposta por Missenard (1937). Esta relação considera a temperatura e a umidade relativa do ar no nível do pedestre (considerada como 2 metros acima da superfície nas simulações):

$$TE = T - 0.4(T - 10) \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (2)$$

onde TE é a temperatura efetiva (em °C), T é a temperatura do ar a 2 m (°C) e UR é a umidade relativa do ar a 2 metros (em %). Os níveis de conforto definidos por este índice é apresentado na Tabela 02.



TE (°C)	Sensação Térmica Humana
>30	Calor Extrema
24 a 30	Calor Moderado
18 a 24	Agradável – levemente quente
12 a 18	Agradável – levemente fresco
0 a 12	Fresco
-12 a 0	Frio
<-12	Frio Extremo

Tabela 02 - Classificação das condições de conforto térmico humano pela temperatura efetiva. Fonte: HENTSCHEL (1986)

3 – Resultados

A Figura 07 mostra a evolução da ICU para o ponto central. A presença de vegetação mais alta induz uma redução da ICU, alcançando valores de até 3,1 °C as 23Z do dia 18 de julho. Neste caso, nota-se um padrão diferente do obtido na simulação controle, com uma intensidade negativa durante todo o período. Analisando o campo de intensidade de ilha de calor (Figura 08), percebe-se que o mesmo acontece em toda a região urbana, mesmo para o período de maior incidência de radiação solar (15 Z; Figura 08a). Este resfriamento é causado pelo efeito das sombras das vegetações.

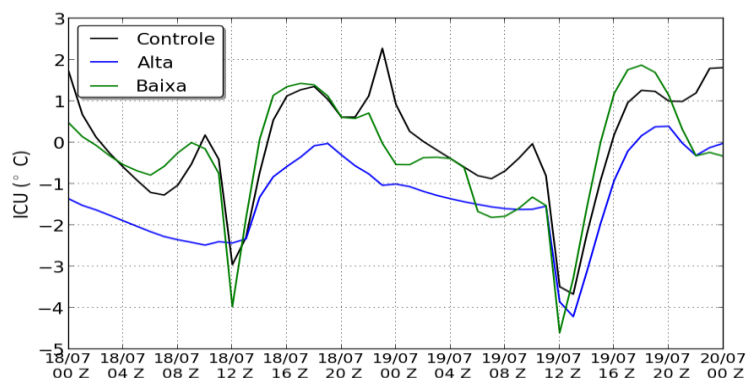


Figura 07 – Evolução da intensidade da ICU para o ponto central da RMSP. A linha preta é a simulação controle, a azul é a simulação com vegetação urbana do tipo floresta mista (alta) e a linha verde é com vegetação do tipo grama baixa

No caso da vegetação baixa, nota-se um leve aumento nos períodos diurnos, alcançando até 0,6 °C as 17 Z do dia 19 de julho (Figura 07), e um resfriamento no período noturno 2,1 °C as 23 Z do dia 18 de julho. Esta diferença se deve à alteração do tipo de vegetação na região circunvizinha da área central urbana. Na Figura 08b, percebe-se que



toda a área urbana se mantém com uma ICU mais elevada em até 1,1 °C. O fato de a vegetação ser grama baixa contribui para uma redução do calor latente nestas áreas (comparado à simulação controle e a vegetação alta), aumentando a temperatura e reduzindo a umidade. Além disso, a baixa estatura desta vegetação contribui para uma maior emissão de onda longa para a atmosfera durante a noite, diminuindo a temperatura do ar próxima a superfície.

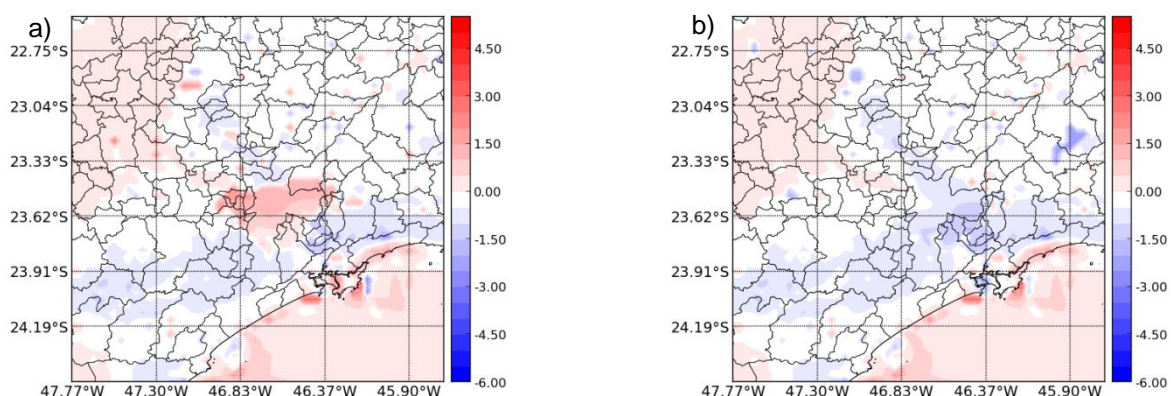


Figura 08 - Campo de intensidade de ICU para a simulação com o a) vegetação alta e b) vegetação baixa para as 15 Z do dia 18 de julho.

Com relação ao conforto térmico, a presença de uma vegetação mais alta contribui para uma redução de até 2°C na TE as 10 Z, ultrapassando o limite “Fresco” (linha preta em 12 °C na Figura 09, do dia 18 julho. Novamente, isto está ligada ao fato do tipo floresta mista aumentar o efeito de sombreamento na região urbana. O campo de diferença de temperatura efetiva entre a simulação com vegetação alta e a controle mostra que a redução acontece em toda a área urbana, tanto para o período diurno (Figura 10a) quanto noturno (Figura 10c). Para o caso da vegetação baixa, a diferença de TE não é tão grande quanto o caso da vegetação alta. Pouca diferença é notada na região urbana, tanto no período diurno (Figuras 10b) quanto noturno (Figura 10d).

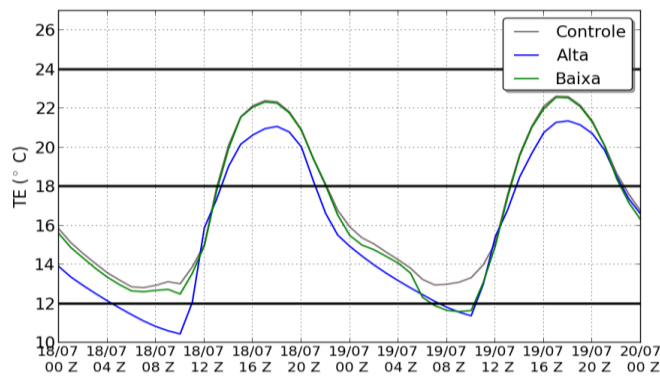


Figura 09 - Evolução diária da intensidade da temperatura efetiva para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde, com vegetação baixa e a azul, com vegetação alta.

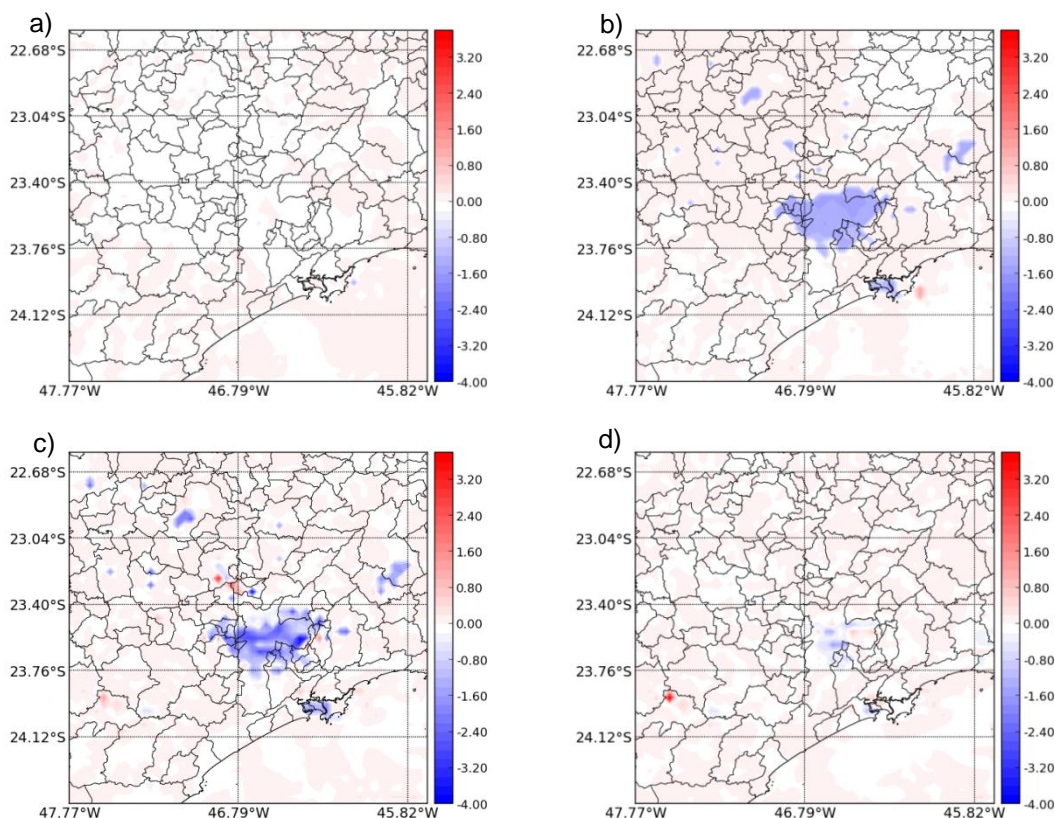


Figura 10 - Diferença de temperatura efetiva entre as simulações com vegetação alta para as a) 15 Z do dia 18 de julho e c) 00 Z do dia 19 de julho e vegetação baixa para as b) 15 Z do dia 18 de julho e d) 00 Z do dia 19 de julho e a simulação controle.

4 – Conclusão

Os resultados apresentados mostram o papel do tipo de vegetação no desenvolvimento da ICU e no conforto térmico humano. As simulações numéricas, utilizando o modelo BRAMS com o TEB acoplado, mostram que, no caso de uma vegetação alta, o efeito de sombreamento contribui para a redução da TE e da temperatura na cidade. Nesta situação, no início das manhãs, a TE atinge o limite de “fresco” na classificação da sensação térmica. No caso da vegetação mais baixa, o aumento da temperatura, com relação à vegetação mais alta, gera um aumento da ICU na área central, comparado com a simulação



controle. Não há muita diferença na TE entre estas simulações, visto que a vegetação do tipo grama baixa é a que predomina na área urbana da RMSP. Estes resultados mostram a importância da simulação numérica no planejamento urbano.

5 – Referências Bibliográficas

FREITAS, E.D., **Circulações Locais em São Paulo e sua influência na dispersão de poluentes**. 2003. 157 f. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP, São Paulo, SP.

FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; SILVA DIAS, M.A.F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M.O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L.F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J., The Coupled Aerosol and Tracer Transport Model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation. **Atmospheric Chemistry and Physics**, vol. 9, 2009, p. 2843-2861.

GOUVEA, M. L. **Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo**. 2007. 87 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HAMDI, R.; SCHAYES, G. Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. **International Journal of Climatology**, vol. 28,2008, p. 973-982.

HENTSCHEL, G. A human biometeorology classification of climate for large and local scales. **World Climate Programme Applications** n.1, World Meteorological Organization, p. 120-138, 1986.

MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M.W. An urban surface Exchange parametrization for mesoscale models. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 104,2002, p. 261-304.

MASSON, V.A. physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, vol. 94,, 2000, p. 357-397.

MISSERNARD, A., **L'homme et le climat**. Paris, 1937.

MORAIS, M.V.B.; OLIVEIRA, A.P.; FERREIRA, M.J. Estudo Numérico do Balanço de Radiação na superfície: Variação diurna e anual do albedo na cidade de São Paulo. **Revista Ciência e Natura**, Vol. Especial, 2009, p. 297-300.

NUNEZ, M.; OKE, T.R., The Energy Balance of an Urban Canyon, **Journal of Applied Meteorology**, vol. 16, 1977,p. 11-19.

SELLERS, P.J.; RANDALL, D.A.; COLLATZ, G.J.; BERRY, J.A.; FIELD, C.B.; DAZLICH, D.A.; ZHANG, C.; COLLELO, G.D.; BOUNOUA L. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. **Journal of Climate**, v.9, 1996, p.676-705.

SVMA. Secretaria do Verde e do Meio Ambiente, **Atlas ambiental de São Paulo**, Prefeitura da cidade de São Paulo, São Paulo, 2004.



WALKO, R. L., BAND, L. E., BARON, J., KITTEL, T. G. F., LAMMERS, R., LEE, T. J., OJIMA, D., PIELKE, R. A., TAYLOR, C., TAGUE, C., TREMBACK, C. J., VIDALE, P. L. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 39, n. 6, 2000, p. 931-944.