

PKS

PUBLIC
KNOWLEDGE
PROJECT

**REVISTA DE GEOGRAFIA
(UFPE)**

www.ufpe.br/revistageografia

OJS

OPEN
JOURNAL
SYSTEMS

ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO USANDO O MODELO SISPAT EM PROPRIEDADE PARTICULAR NO MUNICÍPIO DE SÃO JOÃO – PERNAMBUCO / BRASIL

Irami Buarque do Amazonas¹, Antonio Celso Dantas Antonino², Willames de Albuquerque Soares³, José Romualdo de Sousa Lima⁴, Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁵

1 - Doutor, Professor Adjunto, Universidade de Pernambuco (UPE), Garanhuns, PE, Brasil, email: irami.amazonas@upe.br.

2 - Doutor, Professor Associado, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Energia Nuclear (DEN), Recife, PE, Brasil, email: acda@ufpe.br.

3 - Doutor, Professor Adjunto, Escola Politécnica, Universidade de Pernambuco (Poli/UPE), Recife, PE, Brasil, email: was@poli.br.

4 - Doutor, Professor Adjunto, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns (UFRPE/UAG), Garanhuns, PE, Brasil, email: romualdo@uag.ufrpe.br.

5 - Doutora, Professora Associada, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil, email: suzanam@ufpe.br

Artigo recebido em 14/07/2013 e aceito em 12/03/2015

RESUMO

O modelo de transferência de água e calor no sistema solo-planta-atmosfera é de grande importância em diversas áreas do conhecimento. Vários modelos têm sido desenvolvidos para descrever esses processos, mas poucos têm sido avaliados nas condições ambientais do nordeste brasileiro. O objetivo deste trabalho foi aplicar o SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model), comparando valores experimentais obtidos para o solo considerados nu com a simulação. O SiSPAT é, basicamente, um modelo vertical unidimensional, forçado por séries atmosféricas de temperatura e umidade, velocidade do vento, radiação solar incidente, chuva e radiação solar de ondas longas. Os dados experimentais foram obtidos a partir do balanço hídrico e do balanço de energia-razão de Bowen (1926), que foi realizado em uma fazenda particular no município de São João, no Agreste pernambucano. A simulação foi de 7 dias, de 11 à 17/11/2011 e, mesmo sem calibração, o modelo apresentou concordância aceitável com os dados experimentais observados nos fluxos na interface solo-atmosfera.

Palavras-chave: modelo SiSPAT; transferência de água e calor; evaporação.

ESTIMATE OF THE EVAPORATION USING THE SISPAT MODEL IN A PRIVATE PROPERTY IN THE SÃO JOÃO CITY – PERNAMBUCO / BRASIL

ABSTRACT

The modelling of the water and heat transfer in the soil-plant-atmosphere system is of great importance in the diverse areas of knowledge. Numerous models have been developed to describe these processes, but, as far as we know, no model has been evaluated under the environmental conditions of northeast of Brazil. The objective of this work was to assess the SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model), by comparing simulated and experimental values obtained for bare soil. Basically, the SiSPAT is a one-dimensional vertical model; it is forced by atmospheric series of air temperature and humidity, wind speed, incoming solar and long-wave radiation and rainfall. The experimental data were obtained by means of water and energy balance experiment, which was carried out in a farmer, municipality of São João, in the Agreste region of the Pernambuco State. The simulations were carried out in the period from november 11TH to 17TH, 2011. Even without calibration, a fair agreement between the model and the data was observed for soil-atmosphere interface fluxes.

Keywords: SiSPAT model, water and heat transfer, evaporation.

INTRODUÇÃO

A modelagem e simulação dos processos de transferência de água e de calor no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA), devido a sua interação com diversas áreas do conhecimento como: hidrologia, agronomia, meteorologia, etc. pode ajudar na elaboração de projetos, contribuir para previsão de colheitas e preservação dos ecossistemas. Inúmeros modelos foram desenvolvidos para descrever estes processos de transferência (Antonino, 1992; Braud et al., 1995a; Šimůnek et al., 1998; Lilly, 1999; Van Dam, 2000; Abbaspour et al., 2001; Bohne; Salzmann, 2002), entretanto, mesmo com uma vasta quantidade de modelos existentes, nenhum foi avaliado nas condições ambientais do nordeste do Brasil.

Dentre estes, o SiSPAT (*Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model*) se destaca por seu grande detalhamento físico em todas as partes do sistema. Esse modelo foi desenvolvido na cidade de Grenoble (França) por Antonino (1992) e vem sendo utilizado em diversas condições de clima e solo (Antonino, 1992; Braud et al., 1995a; Boulet et al., 1997; Braud, 1998; Gonzalez-Sosa et al., 1999). Sua primeira aplicação ocorreu para um período de sete dias, sendo dois dias sob condições de secamento e cinco sob condições de umedecimento, num solo cultivado com soja, em Montpellier (França). O solo, com três horizontes, teve as propriedades térmicas e hidráulicas de cada horizonte determinadas experimentalmente, como também os fluxos na interface solo-planta-atmosfera. O modelo teve um ótimo desempenho após a sua fase de calibração (Braud et al., 1995a).

Braud et al. (1995b) utilizaram o modelo SiSPAT, numa versão estocástica, para determinar a influência da variabilidade espacial das propriedades hidrodinâmicas, descrita por intermédio de um fator de escala, oriundo da teoria dos meios similares, nos fluxos superficiais e nos perfis de umidade e de temperatura do solo. Eles observaram que a vegetação tende a suavizar a influência da variabilidade espacial das propriedades do solo, quando se comparam solos com e sem vegetação.

Boulet et al. (1997), utilizando o modelo SiSPAT, encontraram uma frente de secagem da qual se inicia um fluxo de água em fase vapor no sentido descendente, ao encontro da frente de evaporação, diminuindo a quantidade que se move ascendentemente e chega a zona superior da coluna reduzindo, portanto, consideravelmente a evaporação. Gonzalez-Sosa et al. (1999) utilizaram o modelo SiSPAT, num solo com cobertura morta espalhada em torno das plantas, para avaliar as transferências de água e de calor, apesar do pequeno conhecimento existentes sobre as propriedades da matéria vegetal em decomposição.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o modelo SiSPAT nas condições ambientais do nordeste brasileiro, comparando os valores calculados e os determinados experimentalmente no município de São João.

MATERIAIS E MÉTODOS

Breve descrição do modelo SiSPAT

Basicamente, é um modelo vertical 1D, forçado com séries climáticas de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, radiação global e atmosférica e precipitação pluviométrica, que permite descrever as trocas verticais de calor e água no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA). É dividido esquematicamente em quatro módulos, nomeados de: módulo solo, módulo atmosfera, módulo interface solo-planta-atmosfera e módulo solo-planta (Antonino, 1992; Braud et al., 1995a). Pode-se encontrar uma descrição mais detalhada da versão do modelo SiSPAT usada neste trabalho em Braud (2000).

O modelo SiSPAT foi aplicado a um solo considerado sem vegetação, a fim de permitir usar a interface solo-planta-atmosfera apenas como solo-atmosfera. O acoplamento entre os módulos solo e atmosfera foi feito, então, através das equações do balanço de energia na superfície e de continuidade do fluxo de massa através da superfície do solo, formando um sistema de duas equações não lineares que tem como incógnitas o potencial matricial e a temperatura na superfície do solo.

A base para este modelo foi o modelo de Philip e de Vries (1957), de fluxos acoplados de umidade e de calor em meios porosos parcialmente saturados, modificado por Milly (1982). Com as variáveis dependentes sendo a temperatura T (K) e o potencial matricial h (m) do solo, as equações unidimensionais para o movimento vertical são (Passerat de Silans et al., 1989; Antonino, 1992):

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mh} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - K \right) - \frac{S}{\rho_w} \quad (01)$$

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ch} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{cT} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (02)$$

Onde são funções da umidade e/ou da temperatura do solo os parâmetros: extração (S) de água pelo sistema radicular da cultura ($\text{kg}\cdot\text{m}^3/\text{s}$); as capacidades capilar, C_h (1/m) e térmica volumétrica, C_T ($\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$); as condutividades hidráulicas (K) e isotérmica (D_{mh}) do solo, ambas

em m/s; a condutividade isotérmica de vapor, D_{ch} (W/m^2) e térmica aparente, D_{cT} (W/mK) e a difusividade térmica (D_{mT}) de vapor ($m^2/s \cdot K$).

No módulo atmosfera, as variáveis atmosféricas características são definidas em um nível de referência z_a (m), com a estratificação térmica da atmosfera considerada de acordo com a teoria de Monin e Obukhov (1954) e as funções de correções da estabilidade atmosféricas de Paulson (1970). Os coeficientes de rugosidade para calor (z_{oh} , m) e vapor (z_{ov} , m) são considerados iguais, bem como as correspondentes funções integradas de estabilidade ψ_h e ψ_v . As duas equações diferenciais parciais que descrevem as transferências de massa e calor no solo são resolvidas utilizando o método das diferenças finitas com esquema implícito, mas com linearização explícita dos coeficientes de transferência e estoque, de acordo com Celia et al. (1990), interpolando-se as camadas no espaço com a média geométrica entre dois nós. As equações são discretizadas usando o método do balanço de massa, avaliado a cada camada j , obtendo-se a seguinte equação:

$$C_{hj}^{i+1} \frac{h_j^{i+1} - h_j^i}{\Delta t^{i+1}} \Delta z_j = \left[D_{mhj+1/2}^{i+1} \frac{h_{j+1}^{i+1} - h_j^{i+1}}{dz_j} + D_{mTj+1/2}^{i+1} \frac{T_{j+1}^{i+1} - T_j^{i+1}}{dz_j} - K_{j+1/2}^{i+1} \right] - \left[D_{mhj-1/2}^{i+1} \frac{h_j^{i+1} - h_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} + D_{mTj-1/2}^{i+1} \frac{T_j^{i+1} - T_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} - K_{j-1/2}^{i+1} \right] - \Delta z_j \frac{S_j^{i+1}}{\rho_w} \quad (03)$$

Para a equação de calor, tem-se a seguinte equação:

$$C_{Tj}^{i+1} \frac{T_j^{i+1} - T_j^i}{\Delta t^{i+1}} \Delta z_j = \left[D_{chj+1/2}^{i+1} \frac{h_{j+1}^{i+1} - h_j^{i+1}}{dz_j} + D_{cTj+1/2}^{i+1} \frac{T_{j+1}^{i+1} - T_j^{i+1}}{dz_j} \right] - \left[D_{chj-1/2}^{i+1} \frac{h_j^{i+1} - h_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} + D_{cTj-1/2}^{i+1} \frac{T_j^{i+1} - T_{j-1}^{i+1}}{dz_{j-1}} \right] \quad (04)$$

Os perfis de temperatura e de potencial matricial são utilizados como condição inicial. Para a condição de fronteira inferior foram usadas a temperatura e o potencial matricial do solo na base do perfil, enquanto que para a condição de fronteira superior ela é imposta pela resolução do módulo interface solo-atmosfera. Neste módulo, o sistema de duas equações não lineares é resolvido usando o método de Newton-Raphson (Soares, 2009). Deve-se observar que quando o sistema de equações da interface é resolvido, é necessário conhecer o potencial matricial h_2 e a temperatura do solo T_2 no segundo nó.

Como o módulo solo ainda não foi resolvido, estes valores são extrapolados a partir de seus valores nos dois passos de tempos anteriores. Quando o módulo solo é resolvido, a

convergência entre os valores extrapolados e os valores atuais é verificada. Se a diferença estiver acima de um limite estabelecido, o módulo interface é novamente calculado com os novos valores de h_2 e T_2 e o procedimento é repetido até que a convergência de todos os módulos seja alcançada (Passerat de Silans et al., 1989). No módulo atmosfera, um procedimento iterativo similar ao método descrito por Itier (1980) é usado para estimar o comprimento de Monin-Obukhov (1954).

Aplicação do modelo SiSPAT

A área estudada fica localizada no município de São João, a 220 Km de Recife, e faz parte da microrregião de Garanhuns, no Agreste Meridional Pernambucano. O local possui as seguintes coordenadas geográficas: ao Sul, Latitude - 08° 52' 32" e ao Oeste, Longitude -36° 22' 00". Com altitude de 716 m, apresenta as seguintes características climáticas: precipitação pluviométrica média anual 1309mm, temperatura média anual em torno de 21°C, clima do tipo tropical chuvoso com verão seco (Rodrigues, 2003; Brasil, 2005). Os dados experimentais são provenientes da estação meteorológica instalada na área experimental em São João. As simulações foram realizadas com duração de 7 dias correspondendo ao período de 11 a 17/11/2011. Os dados de entrada utilizados no modelo foram os dados atmosféricos, os perfis de temperatura e de potencial matricial do solo, a capacidade térmica volumétrica do solo e os parâmetros típicos do solo, tais como a curva de retenção de água no solo $h(\theta)$ e a condutividade hidráulica $K(\theta)$.

Dados atmosféricos

A Figura 1 mostra a evolução dos seis parâmetros de dados atmosféricos de entrada para o modelo SiSPAT, que são: a radiação solar global (RG) e a atmosférica incidente (RA), ambas dadas em W/m²; a temperatura (T) do ar, em K; a umidade (q) específica (kg/kg); a velocidade (m/s) do vento U_2 (m/s) e precipitação pluviométrica, em mm. Em uma torre meteorológica automatizada localizada no centro da área experimental instalou-se um termohigrógrafo, um anemômetro (à 1,05 m de altura), um piranômetro e um pluviógrafo (à 2,0 m), com os quais foram medidos os valores de T, de U_2 , de RG e da precipitação pluviométrica, respectivamente. O valor de RA foi obtido em função de T pela equação:

$$RA = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)^4 \quad (05)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$) e ε é a emissividade da atmosfera, que foi obtida a partir da expressão de Brutsaert (1975) ajustado por Silva et al. (2002):

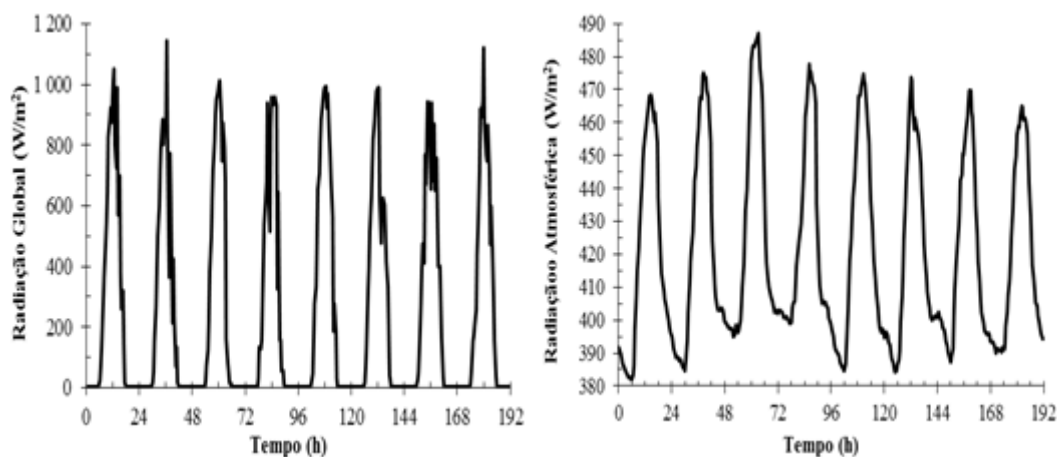
$$\varepsilon = \left[1,697 - 0,58 \left(\frac{e_a}{T} \right)^{\frac{1}{7}} \right] \quad (06)$$

sendo e_a a pressão de vapor (Pa). O valor da umidade (q) foi obtido em função pressão atmosférica P_{atm} (Pa) pela equação:

$$q = \frac{0,622 \cdot e_a}{P_{atm} - 0,37 \cdot e_a} \quad (07)$$

A Figura 1 mostra a evolução temporal dos dados de radiação atmosféricos usados como condição de fronteira superior no modelo SiSPAT, para a simulação de sete dias, enquanto que na Figura 2 constam os demais dados de entrada.

Figura 1: Dados de radiação atmosférica e radiação global (Rg) no período de 11 a 17/11/2011.



Condição inicial

Os dados do perfil de temperatura do solo foram obtidos pelos sensores de temperatura (Campbell Scientific Inc., modelo 108) instalados nas profundidades de 2, 8, 14, 20, 40, 60 e 80 cm, conectados a uma central de aquisição de dados. Para a obtenção dos perfis de potencial matricial do solo foram instalados tensiômetros nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60 e 80

cm e os dados para as profundidades entre os valores medidos foram obtidos por interpolação. Os perfis de potencial matricial e temperatura no início da simulação estão apresentados na Figura 3.

Figura 2: Demais dados atmosféricos de entrada do modelo SiSPAT, nos sete dias de simulação.

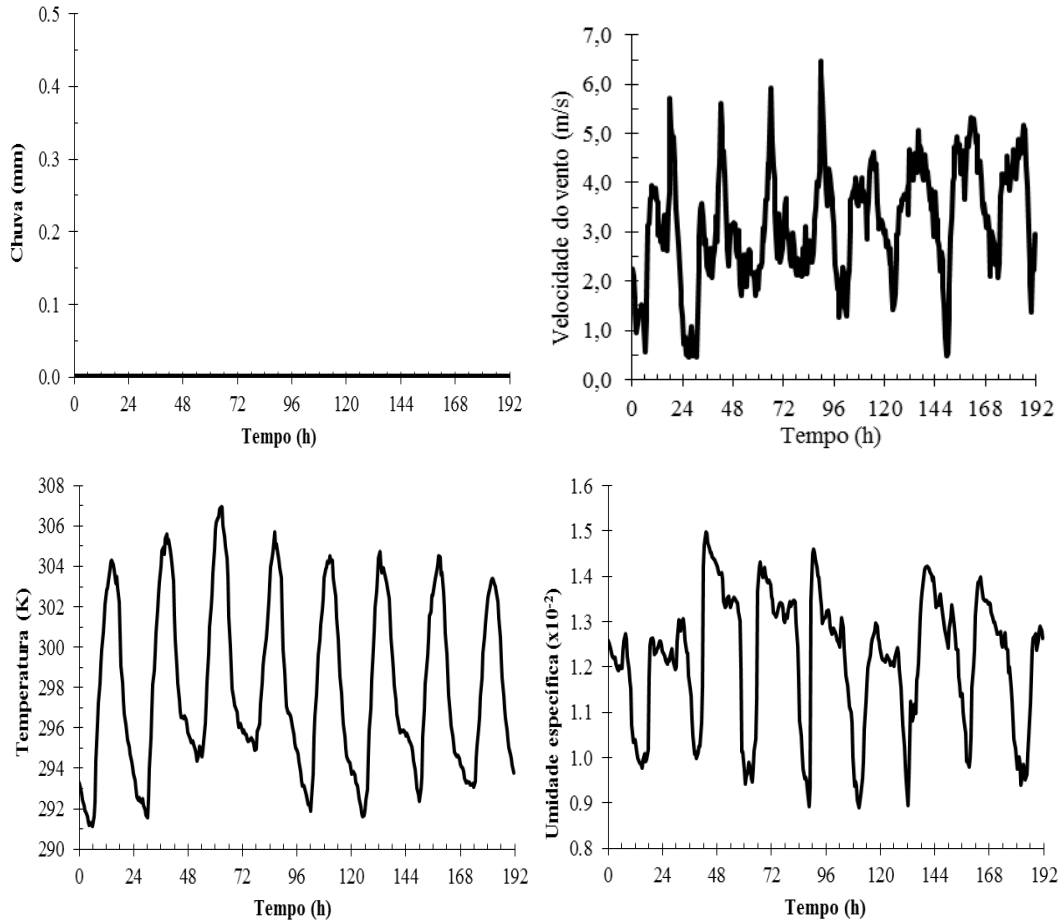
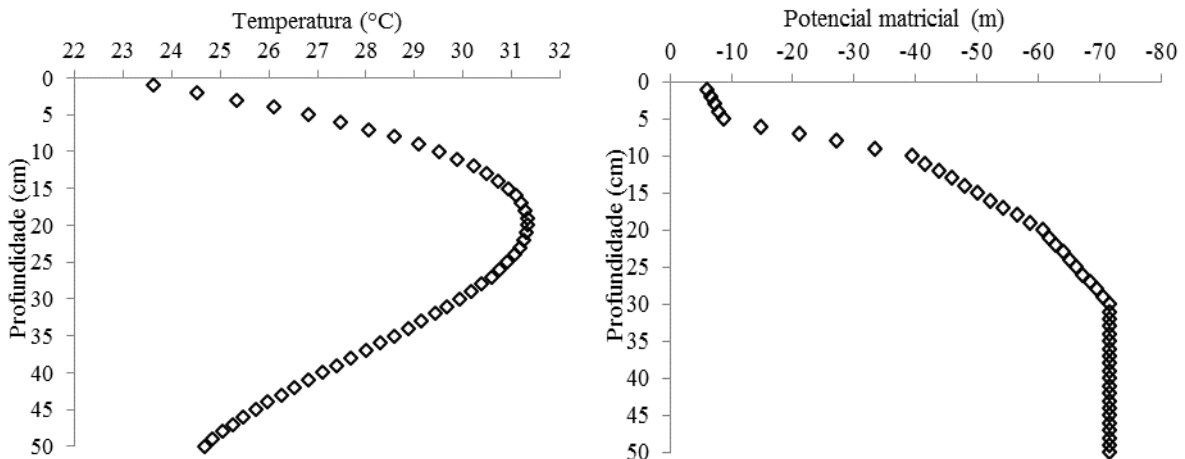


Figura 3: Perfis de temperatura e potencial matricial do solo.



Características hidráulicas dos solos

Os parâmetros que descrevem as curvas de retenção $h(\theta)$ e de condutividade hidráulica $K(\theta)$, dos modelos de Van Genuchten (1980) e de Books e Corey (1964), respectivamente, foram obtidos pelo método Beerkan (Haverkamp et al., 1998) na escala da parcela agrícola. Pode-se encontrar uma descrição detalhada deste método em Souza (2005).

A Tabela 1, a seguir, apresenta os seguintes parâmetros hidráulicos do solo: umidade à saturação (θ_s) e residual (θ_r), parâmetros n e h_g , do modelo de Van Genuchten (1980), e η de Books e Corey (1964), condutividade hidráulica saturada (K_s) e porosidade (ϕ).

Tabela 1: Parâmetros dos coeficientes hidráulicos do solo.

θ_s (m ³ /m ³)	θ_r (m ³ /m ³)	n	H_g (m)	η -	K_s (mm/s)	ϕ
0,352	0,022	2,369	-0,018	8,483	0,0954	0,431

Características térmicas do solo

O valor de capacidade térmica volumétrica do solo foi estimado somando-se as capacidades caloríficas dos vários constituintes do solo, ponderados de acordo com suas frações de volume (Vries, 1966). A condutividade térmica do solo foi calculada pelo modelo proposto por Vries (1966).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Fluxos superficiais

A comparação entre os valores dos fluxos superficiais experimentais: saldo de radiação (R_n , W/m²), fluxo de calor na superfície do solo (G , W/m²), fluxo de calor sensível (H , W/m²) e fluxo de calor latente (LE , W/m²), e os calculados pelo SiSPAT, no período de 11 a 17/11/2011, está apresentada respectivamente nas Figuras 4 e 5.

Observa-se que globalmente o modelo reproduz bem o comportamento dos fluxos na interface solo-atmosfera, apresentando alguma discrepância em relação ao fluxo de calor no solo. De um modo geral, tendeu a superestimar os fluxos, apresentando um melhor desempenho na simulação do fluxo de calor sensível. Praticamente para todo o período, tanto o saldo de radiação como o fluxo de calor sensível foram superestimados. No caso do fluxo de calor

latente, ele foi subestimado no dia 7, nos dias 3 e 6 houve uma boa reprodução dos dados experimentais e nos demais dias o modelo superestimou. O melhor acordo entre os valores simulados e medidos foi para o saldo de radiação.

Figura 4: Evolução do saldo de radiação e do fluxo de calor no solo, medidos e simulados.

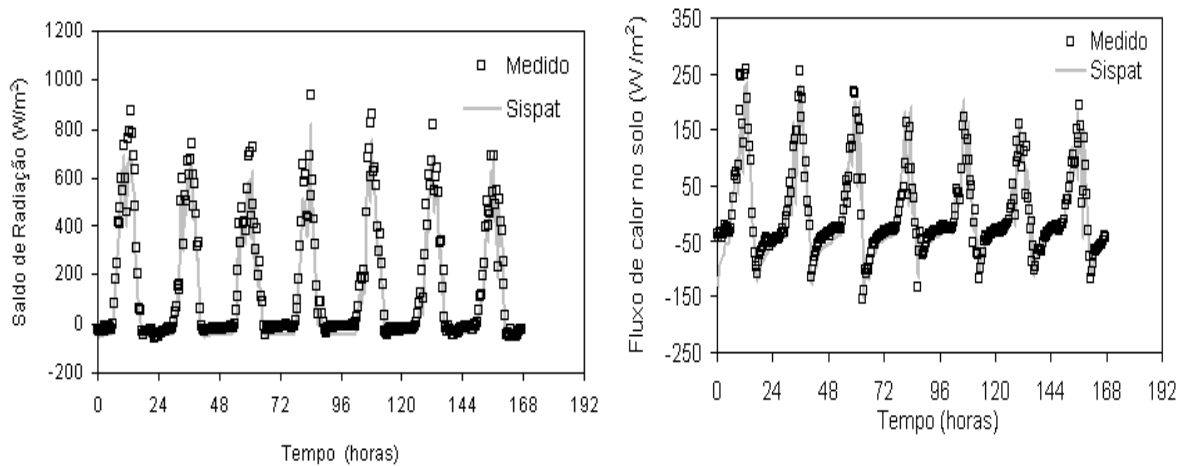
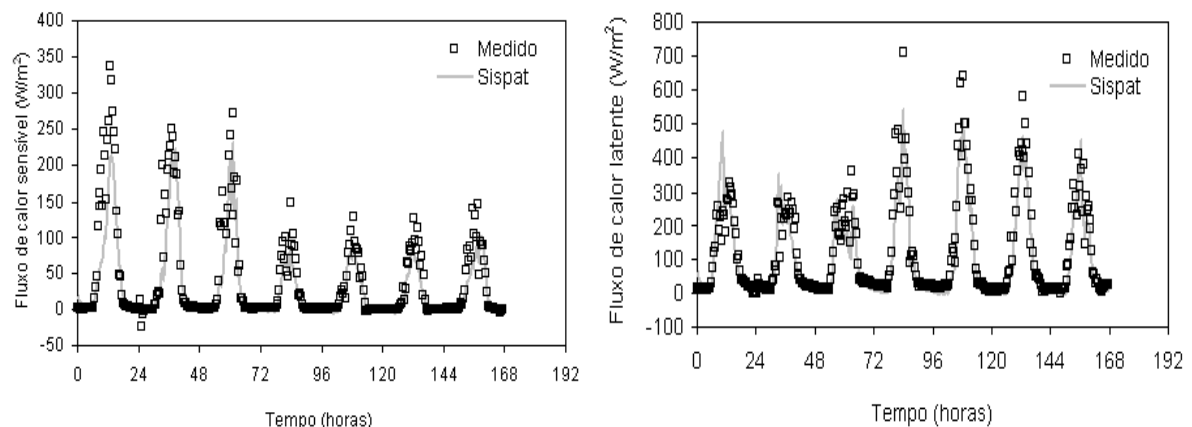


Figura 5: Evolução dos fluxos de calor sensível e latente, medido e simulado.



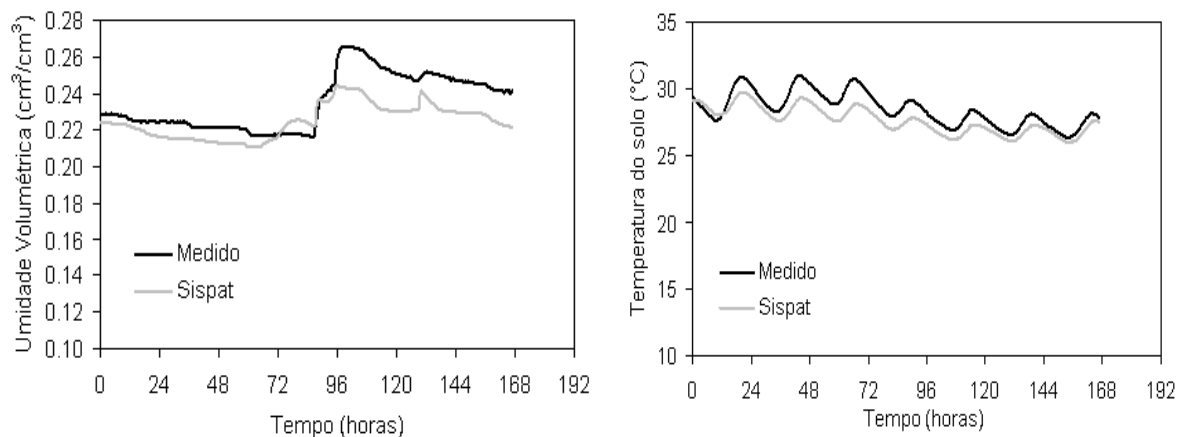
Umidade e temperatura do Solo

A Evolução das umidades volumétricas e temperaturas medidas e simuladas na profundidade de 20 cm são apresentadas na Figura 6. Observa-se que o modelo simula bem um evento de chuva ocorrido no segundo dia, conforme a Figura 2, evidenciado por um pico na umidade à qual posteriormente diminui.

Verifica-se que até esta chuva, o sensor e o modelo apresentam comportamento de correspondência e, após, ocorre uma discrepância com o sensor não mais respondendo perfeitamente à chuva verificada. As discrepâncias dos valores medidos, em relação à

simulação, podem ser atribuídas à ao efeito de insensibilização ou atraso na resposta do sensor de umidade. Pode atribuir a superestimativa do fluxo de calor no solo à temperatura do solo ser superestimada pelo modelo, observando-se que os resultados foram obtidos sem calibração do mesmo.

Figura 6: Evolução das umidades volumétricas medidas e simuladas na profundidade de 20cm.

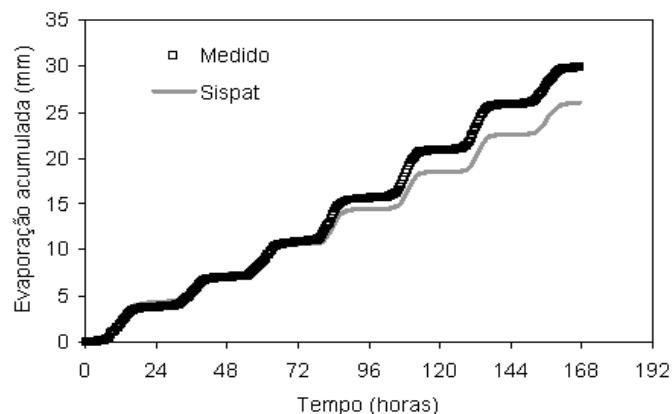


Evaporação do solo

A evolução da evaporação acumulada em função do tempo, medida pelo método da razão de Bowen e a simulada pelo SiSPAT está apresentada na Figura 8. O valor simulado da evaporação acumulada total foi 18,7 mm, enquanto que o seu valor medido foi de 8,4 mm. Observa-se que apenas no início da simulação a evaporação acumulada simulada e a experimental apresentaram certa concordância. Após esse período, houve uma superestimativa do fluxo de calor latente, refletindo na maior evaporação acumulada do modelo em relação aos dados experimentais.

Algumas causas possíveis para essa superestimativa pode ter sido devido às chuvas ocorridas no período que provocaram o umedecimento do solo sendo que a curva de retenção considerada pelo modelo leva em conta apenas a fase de secamento, além da pouca resposta do sensor de umidade que não respondeu bem às chuvas (Figura 2) ocorridas. Sendo assim, observa-se o aumento mais acentuado da evaporação segundo o modelo, devido à maior disponibilidade hídrica causada pela chuva, enquanto que os dados experimentais apresentam uma regularidade no incremento da evaporação, pouco compatível com as chuvas ocorridas.

Figura 7: Evaporação acumulada em função do tempo determinada pelo método do balanço de energia-razão de Bowen e simulada pelo SiSPAT.



CONCLUSÕES

A aplicação do código SiSPAT foi realizada nas condições ambientais do agreste brasileiro, em um solo sem vegetação e, despeito da não calibração do modelo, foi obtida uma boa concordância geral entre os dados simulados e os experimentais dos fluxos na interface solo-atmosfera, embora tenha havido discrepâncias para a umidade e temperatura do solo.

Embora esta adequação já fosse esperada, tendo em vista que o modelo dispõe de grande embasamento físico considerado para o solo, para a atmosfera e para a vegetação, a principal limitação para a sua aplicação reside na quantidade de dados que devem ser fornecidos.

É necessário se realizar uma a calibração local do modelo, a fim de melhorar a estimativa dos parâmetros, além se considerar a estratificação do solo em subcamadas com parâmetros hidrodinâmicos e térmicos distintos e levar em consideração a cobertura vegetal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelos recursos cedidos (CNPq processos nº 142611/2007-7, nº 305727/2009-5, nº 475094/2009-3 e 476979/2009-9), bem como à FACEPE (processo nº APQ-1178-3.01/10).

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; SCHULIN, R.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. *Advances in Water Resources*, n. 24, p. 827-841, 2001.

ANTONINO, A.C.D. Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans le système sol-plante-atmosphère. Influence de la variabilité spatiale des caractéristiques

- hydrodynamiques du sol. 1992. 195 f. Tese (Doutorado) - Universidade Joseph Fourier/Grenoble. 1992.
- BOHNE, K.; SALZMANN, W. Inverse simulation of non-steady-state evaporation using nonequilibrium water retention data: a case study. *Geoderma*, v.110, p. 49-62, 2002.
- BOULET, G., KALMA, J. D. Estimation of catchment-scale water balance with a Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer model, *Env. Modelling and Software*, v.12, n.4, p. 323-328, 1997.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Phys. Rev.*, 27:779-787, 1926.
- BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. Documento de Introdução: Plano Nacional de Recursos Hídricos: Iniciando um Processo de Debate Nacional. Brasília. DF. 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia – SUDENE. Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro. Boletim Técnico, n.15, p. 670. 1972.
- BRAUD, I. 2000. SiSPAT, a numerical model of water and energy fluxes in the soil-plant-atmosphere continuum - SiSPAT user's manual. 106p (Disponível em http://www.lthe.hmg.inpg.fr/Sispat/SiSPAT_Manual.zip).
- BRAUD, I. Spatial variability of surface fluxes versus spatial variability of surface properties. Application to a fallow savannah of the Hapex-Sahel experiment using the SiSPAT SVAT model, *Agricu. For. Meteorol.*, v.89, n. 1, p. 15-44, 1998.
- BRAUD, I.; DANTAS-ANTONINO, A. C.; VAUCLIN, M. A stochastic approach to studying the influence of the spatial variability of soil hydraulic properties on surface fluxes, temperature and humidity. *Journal of Hydrology*, n. 165, p. 283-310, 1995b.
- BRAUD, I.; DANTAS-ANTONINO, A. C.; VAUCLIN, O. M.O.; THONY, J. L.O.; RUELLE, P. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SISPAT) development and field verification. *Journal of Hydrology*, n. 166, p. 213-250, 1995a.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap.* 3, Colo. State Univ., Fort Collins. 1964.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, v.11, p.742-744, 1975.
- CELIA, M.A.; BOULOULAS, E.T.; ZARBA, R.L., A general mass conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. *Water Resources Research*, v.26, p. 1483-1496, 1990.
- DE VRIES, D.A. Thermal properties of soils. In: VAN WIJK, W.R. *Physics of Plant Environment*. p. 210–233, 1966.
- GONZALEZ-SOSA E.; BRAUD, I.; JEAN-LOUIS, T.; MICHEL, V.; PIERRE, B. CHRISTOPHE, C. J. Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 97, p. 151-169, 1999.

- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: SPOSITO, G. (Ed.). Scale dependence and scale invariance in hydrology. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 190–223.
- ITIER, B. Une methode simplifiee pour la mesure du flux de chaleur sensible. *Journal de Recherche Atmospherique*, v.14, p.17-34, 1980.
- LILLY, A. The use of inverse modeling and dipwell data in the calibration and evaluation of a soil water simulation model. *Geoderma*, v. 90, p. 203-227, 1999.
- LIMA, J.R.S. Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do Brejo Paraibano. 2004. 167p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco/Recife. 2004.
- MILLY, P.C.D. Moisture and heat transport in hysteretic inhomogeneous porous media: a matric head-based formulation and a numerical model. *Water Resources Research*, v.18, p.489-498, 1982.
- MONIN, A. S.; OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulence mixing in the ground layer of the atmosphere, *Geofiz. Ins. Akad. Nauk., USSR*, n. 24, p. 163-187, 1954.
- PASSERAT DE SILANS, A.; BRUCKLER, L.; THONY, J.L.; VAUCLIN, M. Numerical modeling of coupled heat and water flows during drying in a stratified bare soil. Comparison with field observations. *Journal of Hydrology*, v.105, p.109-138, 1989.
- PAULSON, C.A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, v.9, p.857-861, 1970.
- PHILIP, J.R.; DE VRIES, D.A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. *Transactions America Geophysical Union*, v.38, p. 222-232, 1957.
- RODRIGUES, W. B. O semi-árido pernambucano. Recife: DNOCS, 2003. 130p.
- SILVA, R. C.; ALVALÁ, R. C. S.; MANZI, A. O.; SOUZA. A Estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Pantanal sul matogrossense durante o período seco de 1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, p. 2817-2826, 2002.
- ŠIMŮNEK, J.; ÂNGULO-JARAMILO, R.; SCHAAP, M. G.; VANDERVAERE, J.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soil from tension-disc infiltrometer data. *Geoderma*, v.86, p. 61- 81, 1998.
- SOARES, W. A. Fluxos de água e de energia em feijão macassar e mamona no nordeste do Brasil. 2009. 167p. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Pernambuco/Recife. 2009.
- SOUZA, E. S. Caractérisation hydrodynamique des sols à l'échelle locale et de la parcelle agricole de deux sols de l'état de la paraíba: variabilité spatiale et temporelle, et milieu homogène équivalent. 2005. 138 f. Tese (Doutorado) Institut National Polytechnique de Grenoble/Grenoble. 2005.

VAN DAM J. C. Field-scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. 2000. 167 f. Tese (PhD), Wageningen Universiteit. 2000.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society American of Journal, v. 44, p. 892-898. 1980.