Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgf

Medição e Simulação dos Fluxos de Energia e Evapotranspiração em Solo Cultivado com *Brachiaria decumbens* na Microrregião de Garanhuns-PE¹

Clarissa de Albuquerque Gomes², José Romualdo de Sousa Lima³, Antonio Celso Dantas Antonino⁴, Willames de Albuquerque Soares⁵, Eduardo Soares de Souza⁶, Apolo Alves Ribeiro⁷, Edevaldo Miguel Alves⁸, Cássia Bezerra Machado⁸, Francis Henrique Tenório Firmino⁹

¹Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, no Programa de Pós-Graduação em Produção Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE; ²Mestre, Analista da Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB. E-mail: clarissalbuquerque@hotmail.com; ³Prof. e Bolsista de Produtividade do CNPq; Unidade Acadêmica de Garanhuns, UFRPE. Av. Bom Pastor, S/N, CEP 55292-270, Garanhuns, PE; ⁴Prof. e Bolsista de Produtividade do CNPq; Dept. Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. E-mail: acda@ufpe.br; ⁵Prof. da Escola Politécnica de Pernambuco, Universidade de Pernambuco-UPE; E-mail: willamess@yahoo.com.br; ⁶Prof. da Unidade Acadêmica de Serra Talhada, UFRPE. E-mail: eduardosouza@uast.ufpe.br; ⁷Mestrando da Pós-Graduação em Produção Agrícola, UFRPE. E-mail: apolo_alves@hotmail.com; ⁸Doutorandos da Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPE. E-mail: edevaldofisica@gmail.com, cassiamachado@hotmail.com; ⁹Mestrando da Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFRPE. E-mail: francis-henrique@hotmail.com.

Artigo recebido em 27/08/2014 e aceito em 05/05/2015.

RESUMO

O cultivo de pastagem no Estado de Pernambuco destaca-se como a principal fonte de alimentação do rebanho bovino da região. Não sendo diferente das demais culturas, o conhecimento da quantidade de água requerida pela pastagem em cada fase de seu desenvolvimento é fator importante para o sucesso produtivo da lavoura. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi medir e simular a evapotranspiração da *Brachiaria decumbens* cultivada em sequeiro na microrregião de Garanhuns – PE, empregando os métodos do balanço de energia – razão de Bowen e o modelo SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model). Este trabalho foi realizado em uma área experimental de aproximadamente 24 ha (8° 52' 30"S, 36° 22' 00"O e 705 m) cultivada com *Brachiaria decumbens*. A coleta dos dados foi obtida de uma torre micrometeorológica instalada na área experimental, onde foram medidos: temperatura e umidade relativa do ar, saldo de radiação, radiação solar global, fluxo de calor no solo, direção do vento e precipitação pluvial. Também foram instalados sensores automatizados para medição da temperatura e umidade volumétrica do solo. Foram ainda realizadas as seguintes determinações na pastagem: altura da cobertura vegetal (dossel), índice de área foliar e evolução do sistema radicular. O modelo SiSPAT mostrou desempenho satisfatório ao simular os componentes do balanço de energia e a evapotranspiração acumulada da pastagem sob diferentes condições atmosféricas e de disponibilidade de água às plantas.

Palavras-chave: Uso de Água, Modelagem, Fluxo de Calor Latente, Modelo SiSPAT.

Measurement and Simulation of Energy Fluxes and Evapotranspiration in Cultivated Soil with *Brachiaria decumbens* in Garanhuns-PE

ABSTRACT

The cultivation of grasslands in the state of Pernambuco stands out as the main source of cattle's supply in the region. No different from other cultures, the knowledge of the amount of water required by the pasture at each stage of its development is an important factor for successful crop production. Therefore, the aim of this study was to measure and simulate the evapotranspiration of *Brachiaria decumbens* cultivated in rainfed in Garanhuns - PE, employing the methods of energy balance - Bowen ratio and SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model) model. This work was carried out in an experimental area of approximately 24 ha (8° 52'30"S, 36° 22' 00"W and 705 m) planted with *Brachiaria decumbens*. The data were obtained from a micrometeorological tower installed in the experimental area, where it was measured: temperature and relative humidity, net radiation, solar radiation, soil heat flux, wind direction and rainfall. Were installed automated sensors for measuring soil temperature and volumetric soil moisture. It was also carried out in the pasture the following determinations: height of vegetation (canopy), leaf area index and evolution of the root system. The SiSPAT model showed satisfactory performance by simulating the components of energy balance and evapotranspiration accumulated from pasture under different atmospheric conditions and water availability to plants.

Keywords: water use, modeling, latent heat flux, SiSPAT model.

* E-mail para correspondência: romualdo@uag.ufpe.br. (Lima, J.R.S.).

Introdução

A maior parte das pastagens do Brasil é formada por monoculturas, predominantemente espécies do gênero *Brachiaria*, devido a sua baixa exigência em fertilidade do solo, tolerância à acidez e alta produtividade de matéria seca (Silva et al., 2011). A *B. decumbens*, espécie largamente plantada no Nordeste brasileiro, é muito conhecida pela sua resistência à seca e sua boa adaptação a regiões úmidas, no entanto é pouco tolerante ao frio. Desenvolve-se bem em variados tipos de solo, porém não suporta aqueles encharcados (Vilela, 2011).

Não sendo diferente das demais espécies cultivadas, o sucesso produtivo da *B. decumbens* depende de uma série de fatores, especialmente condições climáticas favoráveis. Portanto, o conhecimento da quantidade de água requerida pela planta em cada estágio de desenvolvimento é de grande importância. Além do mais, a conhecida escassez de recursos hídricos nessas regiões de cultivo obriga o uso cada vez mais eficiente desse recurso natural. Portanto, quantificar a evapotranspiração, ainda que em agricultura de sequeiro, é demasiadamente importante, haja vista possibilitar estratégias de manejo em função das condições climáticas da região e hídricas do solo (Souza et al., 2009).

O cálculo da quantidade de água requerida pela cultura necessita de uma seleção apropriada do método ou modelo de estimativa (Ramirez et al., 2011). Como método micrometeorológico de estimativa da evapotranspiração, o balanço de energia – razão de Bowen é baseado na análise do balanço energético dos ganhos e perdas de energia térmica radioativa, condutiva e convectiva por uma superfície evaporante, sendo frequentemente utilizado para se estimar a evapotranspiração de uma superfície vegetada (Borges et al., 2008).

A evapotranspiração pode ainda ser quantificada por métodos empíricos (mais simples), especialmente quando é observado o ponto de vista prático e econômico (Lima et al., 2005), além do mais, quando na prática existem algumas dificuldades para a quantificação direta da evapotranspiração, como, por exemplo, o alto custo de aquisição de sensores e materiais e o cuidado na aquisição dos dados (Ramirez et al., 2011).

É nesse cenário que surgiram os modelos SVAT's (*Soil Vegetation Atmosphere Transfer* – Transferência de água e calor no sistema solo-vegetação-atmosfera). Existem diversos modelos que simulam as trocas de água e energia no sistema solo-planta-atmosfera (Soares, 2009; Alves et al., 2012; Braud et al., 2013). Dentre os vários modelos existentes, o SiSPAT (Simple Soil

Plant Atmosphere Transfer Model) destaca-se pelo relevante detalhamento físico do sistema solo-planta-atmosfera e vem sendo utilizado em várias condições de clima e solo (Braud, 2000; Soares, 2009; Braud et al., 2013). Em virtude da diversidade de locais onde foi e vem sendo testado, foi possível construir diferentes versões do mesmo. No entanto, a nível de Nordeste brasileiro poucos são os estudos com esse modelo. Além do mais, por possuir uma enorme variedade de climas e de solos, a região proporciona excelentes condições para a avaliação do modelo SiSPAT (Soares, 2009).

Diante do apresentado, este trabalho teve como objetivo medir, utilizando o método do balanço de energia – razão de Bowen, e simular, empregando o SiSPAT, os processos de transferência de energia e a evapotranspiração em solo cultivado com *B. decumbens* na microrregião de Garanhuns – PE.

Material e Métodos

Descrição da área de estudo

A coleta dos dados foi realizada em uma área de 23,42 ha cultivados com *B. decumbens* Stapf na Fazenda Riacho do Papagaio, município de São João – PE. As coordenadas geográficas da área são: 8° 52' 30'' de latitude sul, 36° 22' 00'' de longitude oeste e altitude de 705 m.

De acordo com Borges Júnior et al. (2012), o clima é tropical chuvoso, com verão seco; a estação chuvosa se inicia no outono e engloba o inverno e o início da primavera. De acordo com dados da Secretaria de Agricultura e Reforma Agrária de Pernambuco (SARA, 2012) a precipitação anual total é de 597,09 mm, sendo o trimestre mais chuvoso constituído dos meses de maio, junho e julho. O solo da área é classificado como Neossolo Regolítico (Santos et al., 2012).

Os dados utilizados neste estudo compreendem o período de 01 de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2011.

Para a análise física do solo (granulometria, classificação textural e densidade do solo) foram coletadas amostras deformadas de solo a cada 20 cm até a profundidade de 60 cm, seguindo a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). Os resultados encontram-se na Tabela 1.

Determinação do balanço de energia – método da razão de Bowen

O balanço de energia na superfície do solo é determinado pela equação 1 (Lima et al., 2013):

$$R_n = G + H + LE \quad (1)$$

onde, R_n representa o saldo de radiação ($W.m^{-2}$);
 G o fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$); H o fluxo de

calor sensível ($W.m^{-2}$) e LE o fluxo de calor
 latente ($W.m^{-2}$).

Tabela 1. Análise granulométrica, classificação textural, densidade do solo e porosidade total da área experimental na fazenda Riacho do Papagaio, em São João-PE, 2011.

Camada cm	Areia -----	Silte g.kg ⁻¹ -----	Argila -----	Classificação textural	Densidade do solo Kg.m ⁻³	Porosidade total m ³ .m ⁻³
0-20	876,5	88,2	35,3	Areia	1.530	0,423
20-40	816,5	120,2	63,3	Areia franca	1.450	0,453
40-60	764,1	162,1	73,8	Areia franca	1.400	0,472

Para a medida de fluxo de calor no solo, foram instalados na profundidade de 5,0 cm um fluxímetro e um sensor de umidade do solo (TDR). Duas sondas térmicas foram instaladas nas profundidades de 2,0 e 8,0 cm. Todas as medidas acima citadas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos em um sistema de aquisição de dados. O fluxo de calor na superfície do solo (G_{sup}) foi obtido de acordo com Kustas et al. (2000).

A partição da energia disponível ($R_n - G$) entre o fluxo de calor latente e calor sensível foi obtida pelo método do balanço de energia - razão de Bowen, de acordo com metodologia descrita por Lima et al. (2013).

A taxa de evapotranspiração (mm) foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$) pelo calor latente de vaporização, considerado como constante ($2,45 MJ.kg^{-1}$).

Aplicação do modelo SiSPAT

O SiSPAT é dividido em quatro módulos: módulo solo, módulo atmosfera, o módulo interface solo-planta-atmosfera e o módulo solo-planta (Soares, 2009). Braud (2000) mostra uma descrição detalhada da versão do modelo SiSPAT usado neste trabalho. O SiSPAT é escrito na linguagem computacional Fortran e a descrição detalhada dos processos de troca de energia e

massa, com as respectivas equações resultantes, é encontrada no trabalho de Soares (2009).

Para as determinações da umidade volumétrica foram instalados sensores automatizados tipo TDR (modelo CS 615 da Campbell Scientific Inc.) nas profundidades de 10, 20, 30, 40 e 50 cm. Para a medição do perfil de temperatura do solo foram instalados sensores automatizados (modelo 108 da Campbell Scientific Inc.) nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 cm. As leituras foram realizadas a cada minuto e a média dos últimos 30 minutos armazenada em um sistema de aquisição de dados CR 1000 (Campbell Scientific), assim como para os dados de umidade volumétrica.

As curvas de retenção, $h(\theta)$, e de condutividade hidráulica, $K(\theta)$, foram descritas, respectivamente, pelos modelos de van Genuchten (1980) e de Brooks & Corey (1964). Obtiveram-se os parâmetros de forma e normalização usando-se o programa BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration on Experiments) proposto por Lassabatère et al. (2006). Os valores dos parâmetros da curva de retenção e os valores da condutividade hidráulica à saturação do solo (K_s) estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores dos parâmetros da curva de retenção de água no solo $h(\theta)$ e da condutividade hidráulica ($K(\theta)$) para as camadas de 0-20 e 20-40 cm.

Camada cm	n	m	η	θ_r -----cm ³ .cm ⁻³ -----	θ_s	α cm ⁻¹	K_s mm.d ⁻¹
0-20	2,50	0,173	10,714	0,003	0,403	0,533	0,1319
20-40	2,28	0,126	8,227	0,002	0,390	0,115	0,0244

Os perfis de temperatura e de potencial matricial são utilizados como condição inicial. Normalmente, para a condição de fronteira inferior são usadas a temperatura e o potencial matricial do solo na base do perfil.

O perfil de temperatura do solo, obtido por meio do sensor instalado a 40 cm de

profundidade, que serve de entrada para a condição inicial utilizada na simulação está na Figura 1.

Figura 1. Perfil de temperatura do solo.

O perfil de potencial matricial do solo que serve de entrada para a condição inicial utilizado na simulação está na Figura 2.

Figura 2. Perfil de potencial matricial no solo.

Características hidrodinâmicas e térmicas do solo

A caracterização térmica do solo foi obtida pela equação proposta por De Vries (1966). A fração de volume dos minerais (f_m) foi estimada em 0,440 e 0,500 nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, respectivamente, e a fração de matéria orgânica do solo (f_o) foi de aproximadamente 0,01 em ambas as camadas.

Para estimar a difusividade térmica do solo (α), empregou-se o método harmônico (Horton et al., 1983), com seis harmônicas ($N = 6$) e um período igual a um dia ($P = 86400$ s). Para a obtenção dos valores diários de α , utilizaram-se os dados de temperatura obtidos a 8 cm. A condutividade térmica do solo (λ) foi calculada como o produto entre a capacidade térmica volumétrica do solo (C) e a difusividade térmica (α).

Dados atmosféricos

No centro da área experimental foi instalada uma torre micrometeorológica equipada com sensores de medição da temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento em duas alturas, 50 e 100 cm, acima do dossel da cultura. Também foi instalado um piranômetro, para medir a radiação global, um radiômetro para medições do saldo de radiação e um pluviôgrafo, para a medida da precipitação pluvial. Todos esses sensores foram instalados na altura de 2,0 m. Todas as medidas acima citadas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos, exceto os valores de precipitação, os quais foram armazenados em seus valores totais, em um sistema de aquisição de dados CR 1000 da Campbell Scientific.

Os dados de entrada da atmosfera para o modelo consistem de: radiação solar global (R_g , $W.m^{-2}$); radiação atmosférica (RA , $W.m^{-2}$); temperatura do ar (T , K); umidade específica (q , $kg.kg^{-1}$); velocidade do vento (u_2 , $m.s^{-1}$) e precipitação pluvial (mm). Os valores de T , u_2 , R_g e precipitação pluvial foram obtidos de sensores instalados na torre localizada no centro da área.

O valor de RA foi obtido em função da T pela equação 2:

$$RA = \epsilon \sigma (T)^4 \quad (2)$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^4$) e ϵ a emissividade da atmosfera, que foi obtida a partir da expressão de Brutsaert (1975), ajustada por Silva et al. (2002).

O valor da umidade específica (q) foi obtido em função da pressão atmosférica (P_{atm} em Pa) pela equação 3:

$$q = \frac{0,622 e_a}{P_{atm} - 0,37 e_a} \quad (3)$$

sendo e_a a pressão real de vapor.

Desempenho das metodologias

Para avaliar a concordância de resultados entre a evapotranspiração medida pelo balanço de energia – Razão de Bowen e a simulada pelo SiSPAT foram usados diferentes critérios estatísticos:

1. coeficiente de correlação (r), seguindo a metodologia de Hopkins (2008);
2. índice de concordância (d) proposto por Willmott et al. (1985);
3. índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997);

4. erro quadrático (RSME), dado pela equação 4.

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum (T_i - M_i)^2}{Nd} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

sendo T_i os valores simulados pelo SiSPAT, M_i os valores experimentais e Nd o número de determinações.

A faixa de valores do índice “d” varia entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita. O índice “c” tem a finalidade de avaliar o desempenho do modelo utilizado, considerando as seguintes classes de interpretação (Tabela 3), de acordo com Camargo & Sentelhas (1997).

Tabela 3. Classificação para o índice de confiança “c”.

Desempenho	
Ótimo	> 0,85
Muito bom	0,76-0,85
Bom	0,66-0,75
Mediano	0,61-0,65
Sufrível	0,51-0,60
Mau	0,41-0,50
Péssimo	< 0,40

Resultados e Discussão

Calibração do modelo SiSPAT

O modelo foi calibrado durante o mês de Abril de 2011 para os parâmetros relativos ao solo e para os parâmetros relativos à pastagem, utilizando medidas micrometeorológicas e hidrológicas.

Neste período, 01 a 30 de Abril/2011, houve chuvas regulares e bem distribuídas, com valores de umidade do solo variando entre 0,05 e

0,171 cm³ cm⁻³. Foram calibrados os parâmetros relativos às curvas de retenção, $\theta(h)$, e de condutividade hidráulica, $K(\theta)$, respectivamente, propostas por van Genuchten (1980), com a hipótese de Burdine (1953) e por Brooks & Corey (1964). A espessura da primeira camada foi de 0 a 20 cm e da segunda camada foi de 20 a 40 cm. A Tabela 4 apresenta os valores da calibração dos parâmetros de $\theta(h)$ e $K(\theta)$.

Tabela 4. Valores da calibração dos parâmetros da curva de retenção de água no solo $\theta(h)$ e da condutividade hidráulica ($K(\theta)$) para as camadas de 0-20 e 20-40 cm.

Camada cm	$\square$ s cm ³ cm ⁻³	hg m	n	Ks m s ⁻¹	$\square$	m
0-20	0,403	-0,02475	2,50	6,56 e ⁻⁰⁶	8,714	0,1490
20-40	0,390	-0,03999	2,28	1,14 e ⁻⁰⁴	8,227	0,1630

Para a primeira camada de solo, os valores calibrados do parâmetro n (2,50) aproximaram-se bastante dos valores médios (2,33), obtidos experimentalmente pelo método Beerkam, apresentando uma diferença de 6,8%. Para a segunda camada de solo esses valores não precisaram ser calibrados. Os valores calibrados da pressão de entrada de ar (hg) para a primeira e segunda camadas foram de -0,025 m e -0,039 m e os valores medidos foram de -0,019 m para a primeira camada, e de -0,08 m, para a segunda camada. Os valores calibrados da condutividade hidráulica do solo foram praticamente iguais aos

medidos em campo. Os valores do parâmetro η foram inferiores aos medidos. Vale ressaltar que, apesar desses valores terem sido medidos, a calibração foi necessária uma vez que os valores obtidos são pontuais e a área do estudo não é completamente homogênea, fazendo-se necessária, portanto, a calibração desses parâmetros.

Os valores dos índices estatísticos das evoluções das umidades volumétricas do solo ($\square$), medidas e simuladas, para as profundidades de 5, 10, 20, 30 e 40 cm, no período de calibração, estão apresentadas na Tabela 5. Os valores de r indicam uma correlação quase perfeita, com um índice de desempenho que varia de muito bom a ótimo, exceto para a profundidade de 10 cm que

apresentou um índice de desempenho sofrível. No entanto, vale ressaltar que, apesar das diferenças numéricas entre os valores medidos e os simulados pelo SiSPAT, ambos apresentaram mesmo comportamento ao longo do tempo.

A evolução diária do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G) e do fluxo de calor latente (LE), no período de calibração, medidas e simuladas pelo SiSPAT, estão apresentadas na Figura 3.

Tabela 5. Índices estatísticos da umidade volumétrica do solo após a calibração do SiSPAT

Profundidade	RMSE ¹	d	c	Desempenho	r
5 cm	0,038	0,818	0,782	Muito bom	0,956
10 cm	0,041	0,618	0,571	Sufrível	0,925
20 cm	0,043	0,879	0,808	Muito bom	0,919
40 cm	0,005	0,986	0,977	Ótimo	0,992

¹RMSE ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Figura 3. Evolução diária, medida e simulada, do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) no período de calibração do modelo SiSPAT.

Tabela 6. Índices estatísticos dos componentes do balanço de energia após a calibração do SiSPAT.

	RMSE ¹	d	c	Desempenho	r
R_n	54,36	0,965	0,908	Ótimo	0,941
G	10,29	0,881	0,689	Bom	0,782
LE	42,19	0,894	0,784	Muito bom	0,877
H	33,86	0,952	0,866	Ótimo	0,910

¹RMSE em $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

De forma geral, todos os fluxos foram bem calibrados. O R_n apresentou, de maneira geral, leves superestimativas. O H apresentou, nos dias chuvosos pequenas subestimativas, comportamento inverso ao apresentado pelo LE . Esses comportamentos também foram semelhantes aos comportamentos observados por

Soares (2009), onde esse autor utilizou o SiSPAT para simular, dentre outras coisas, os fluxos de energia em feijão macassar e mamona.

Os valores dos índices estatísticos dos componentes do balanço de energia estão apresentados na Tabela 6. De acordo com o índice “c”, percebe-se que o R_n e H apresentaram ótimo

desempenho, o LE teve desempenho muito bom e o G mostrou-se com bom desempenho.

Na Figura 4 estão apresentadas as evoluções da evapotranspiração acumulada após a calibração dos parâmetros relativos à *Brachiaria*. Observa-se que a calibração conseguiu ajustar bem os valores

medidos e simulados. O modelo mostrou-se tendencioso a subestimar a evapotranspiração antes de eventos chuvosos e a superestimar durante esses eventos, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4. Evolução da evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT, após a calibração dos parâmetros de *Brachiaria decumbens*.

Validação do modelo SiSPAT

A evolução da precipitação pluvial medida e da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT nas profundidades de 5, 10, 20, 30 e 40 cm no período de 01/01/2011 a 31/12/2011 é apresentada na Figura 5.

Da mesma forma do período de calibração, houve diferença quantitativa nos valores da umidade volumétrica do solo. No entanto, o comportamento de ambos (medido e simulado) foi bastante semelhante. Essas diferenças podem ser decorrentes da alta sensibilidade do modelo SiSPAT aos parâmetros hídricos, além de que os valores medidos foram pontuais. Ainda é válido ressaltar que os próprios dados medidos podem apresentar imprecisões, devido aos próprios erros dos sensores.

Com relação aos índices estatísticos utilizados para comparar a umidade volumétrica medida e simulada (Tabela 7) observa-se que a umidade volumétrica simulada obteve desempenho que varia de sofrível a muito bom de acordo com índice de desempenho (c), porém com coeficiente de correlação (r) variando de moderado a quase perfeito. Os baixos valores do erro quadrático (RMSE) indicam que o modelo simulou razoavelmente bem a evolução da umidade do solo. Esses resultados estão semelhantes aos observados por Soares (2009), que utilizou o modelo SiSPAT para simular a evolução na umidade volumétrica em solo vegetado com feijão caupi e com mamona e também em solo nu.

Figura 5. Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT no período de 01/01/2011 a 31/12/2011.

Tabela 7. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo no período de 01/01/2011 a 31/12/2011.

	RMSE ¹	d	c	Desempenho	r
5 cm	0,035	0,869	0,760	Muito bom	0,875
10 cm	0,052	0,597	0,552	Sufrível	0,925
20 cm	0,046	0,599	0,550	Sufrível	0,919
30 cm	0,043	0,680	0,671	Bom	0,986
40 cm	0,039	0,748	0,741	Bom	0,992

RMSE ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Moret et al. (2007) utilizaram o SiSPAT em região semi-árida da Espanha para simular o balanço hídrico de solo submetido ao cultivo convencional e ao plantio direto. Observaram que o SiSPAT simulou bem a evolução da umidade volumétrica para ambos os cultivos, com um RMSE médio de 0,037 e 0,035 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ nas profundidades de 10 e 20 cm, respectivamente.

A evolução do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor no solo (G), do fluxo de calor latente (LE) e do fluxo de calor sensível (H), medido e simulado pelo SiSPAT, está apresentado na Figura 6. De forma geral, o modelo SiSPAT apresentou uma boa simulação. Assim como observado por Soares (2009), no presente estudo também foi percebido que os valores noturnos medidos do saldo de radiação apresentaram-se

variáveis enquanto que os valores simulados

foram praticamente constantes.

Figura 6. Evolução diária, medida e simulada, do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) no período de validação do modelo SiSPAT.

Quando se observam os índices estatísticos da comparação entre os valores medidos e simulados dos componentes do balanço de energia (Tabela 8), vê-se que os resultados da simulação para o período de validação do SiSPAT foram muito bons, com desempenho variando de muito bom a ótimo (índice c). Vale ressaltar que essa pesquisa foi a primeira que utilizou o SiSPAT para simular resultados de 01 ano completo de dados. Resultados semelhantes ao dessa pesquisa foram observados por outros autores ao utilizarem o SiSPAT (Gonzalez-Sosa et al., 2001; Soares, 2009) em intervalos de tempo menores.

A evapotranspiração acumulada medida e simulada durante o período de estudo são apresentadas na Figura 7. No período estudado a

evapotranspiração acumulada medida foi de 543,43 mm e de 458,46 mm quando modelada pelo SiSPAT. A ET média medida foi de 1,5 mm.d⁻¹, e a simulada pelo SiSPAT foi de 1,3 mm.d⁻¹.

A Tabela 9 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados pelo modelo SiSPAT da evapotranspiração acumulada. Observando os índices estatísticos, percebe-se que a evapotranspiração apresentou correlação alta, com baixo valor de RMSE e desempenho muito bom, podendo afirmar que o SiSPAT simulou bem a ET. Esses resultados estão semelhantes aos observados por Varado et al. (2006) e Soares (2009).

Tabela 8. Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT dos componentes do balanço de energia no período de 01/01/2011 a 31/12/2011.

	RMSE ¹	d	c	Desempenho	r
Rn	38,20	0,991	0,974	Ótimo	0,983
G	14,77	0,919	0,808	Muito bom	0,880
LE	42,91	0,922	0,834	Muito bom	0,905
H	43,93	0,901	0,901	Ótimo	0,939

¹RMSE (W.m⁻²).

Figura 7. Evolução da evapotranspiração acumulada medida e simulada pelo SiSPAT, no período de 01/01/2011 a 31/12/2011.

Tabela 9. Índices estatísticos da simulação da evapotranspiração pelo modelo SiSPAT no período de 01/01/2011 a 31/12/2011.

	RMSE ¹	d	c	Desempenho	r
ET	0,032	0,923	0,835	Muito bom	0,905

¹RMSE (mm.d⁻¹).

Conclusões

1. O modelo SiSPAT, na fase de calibração conseguiu reproduzir bem os valores dos componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxos de calor latente, sensível e no solo). Na fase de validação, o modelo SiSPAT demonstrou bom desempenho ao simular os componentes do balanço de energia, assim como a evapotranspiração acumulada sob variadas condições de clima e de umidade do solo.

2. A evapotranspiração da pastagem, determinada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen e também pelo SiSPAT seguiu as variações da precipitação pluvial e foi em média de 1,5 mm.d⁻¹ quando calculada pela razão de Bowen e de 1,3 mm.d⁻¹ quando simulada pelo SiSPAT.

Agradecimentos

À CAPES e ao CNPq pela concessão de bolsas de Mestrado e de Produtividade em Pesquisa (processo 307641/2013-9); ao CNPq pelos recursos por meio do projeto “Balanço hídrico e de energia em pastagens na microrregião de Garanhuns (processo 475094/2009-3)”. À FACEPE pela concessão de recursos financeiros

por meio dos projetos “Impacto de mudanças climáticas sobre a cobertura e uso da terra em Pernambuco: geração e disponibilização de informações para o subsídio a políticas públicas” (Edital FACEPE 02/2009 - Mudança Climática Global) e “Dinâmica da Água e de Carbono em Ecossistemas no Estado de Pernambuco” (Edital FACEPE 12/2010 PRONEM/FACEPE/CNPq); À FINEP pelos recursos financeiros por meio do projeto “Estudos hidrológicos e sedimentológicos em Bacias experimentais e representativas do semiárido e cerrado” (Edital MCT/FINEP CT-HIDRO 01/2010) e ao Professor Antonio de Pádua Montenegro, pela disponibilização da área experimental.

Referências

- Alves, B.J.R., Smith, K.A., Flores, R.A., Cardoso, A.S., Oliveira, W.R.D., Jantalia, C.P., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2012. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. *Soil Biology Biochemical* 46, 129-135.
- Borges, C.J.R., Azevedo, P.V., Silva, V.P.R., Campos, J.H.B., Moura, M.S.B., Soares, J.M.,

- Silva, B.B., 2008. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 12, 393-399.
- Borges Júnior, J.C.F., Anjos, R.T., Silva, T.J.A., Lima, J.R.S., Andrade, C.L.T., 2012. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 380-390.
- Braud, I., 2000. SiSPAT version 3.0, User's manual. Disponível: <http://www.lthe.inpg.fr/Sispat>. Acesso: 30 Maio 2013.
- Braud, I., Tilmant, F., Samie, R., Goff, I.L., 2013. Assessment of the SiSPAT SVAT model for irrigation estimation in south-east France. *Procedia Environmental Sciences* 19, 747-756.
- Brooks, R.H., Corey, A.T., 1964. Hydraulic properties of porous media. *Hydrology Paper* 3. Fort Collins: Colorado State University.
- Burdine, N.T., 1953. Relative permeability calculation from size distribution data. *Transactions of AIME* 198, 71-78.
- Camargo, A.P., Sentelhas, P.C., 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 5, 89-97.
- De Vries, D.A., 1966. Thermal properties of soils. In: van Wijk, W.R. (ed). *Physics of Plant Environment*. Amsterdam: North-Holland.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1997). *Manual de métodos de análise de solo*. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA/SNLCs.
- Gonzalez-Sosa, E., Braud, I., Jean-Louis, T., Vauclin, M., Pierre, B., Christophe, C.J., 2001. Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch. *Agricultural and Forest Meteorology* 244, 119-136.
- Hopkins, W.G., 2008. Correlation Coefficient. Disponível: <http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>. Acesso: 10 Fevereiro 2013.
- Horton, R., Wierenga, P.J., Nielsen, D.R., 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of America Journal* 47, 25-32.
- Kustas, W.P., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Ramalingam, K., Hipps, L.E., 2000. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. *Agricultural and Forest Meteorology* 103, 249-264.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. *Soil Science Society of America Journal* 70, 521-532.
- Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Lira, C.A.B.O., Silva, I.F., 2005. Estimativa da evapotranspiração em uma cultura de feijão caupi, nas condições do brejo paraibano. *Agropecuária Técnica* 26, 86-92.
- Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Lira, C.A.B.O., Souza, E.S., Silva, I.F., 2011. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica* 42, 65-74.
- Lima, J.R.S., Antonino, A.C.D., Souza, E.S., Lira, C.A.B.O., Silva, I.F., 2013. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration, energy exchange, yield and water use efficiency of castor grown under rainfed conditions in northeastern Brazil. *Industrial Crops and Products* 50, 203-211.
- Moret, D., Braud, I., Arrúe, J.L., 2007. Water balance simulation of a dryland soil during fallow under conventional and conservation tillage in semiarid Aragon, Northeast Spain. *Soil and Tillage Research* 92, 251-263.
- Ramírez, V.H., Mejía, A., Marín, E.V., Arango, R., 2011. Evaluation of models for estimating the reference evapotranspiration in Colombian Coffee Zone. *Agronomía Colombiana* 29, 107-114.
- Santos, J.C.B., Souza Júnior, V.S., Corrêa, M.M., Ribeiro, M.R., Almeida, M.C., Borges, L.E.P., 2012. Caracterização de Neossolos Regolíticos da Região Semiárida do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36, 683-695.
- SARA - Secretaria de Agricultura e Reforma Agrária. Dados meteorológicos de São João. Disponível: http://www.agricultura.pe.gov.br/interna.php?p=dadospluviometricos&s=RD7_Q_Ajustados. Acesso: 03 dezembro 2012.
- Silva, R.C., Alvalá, R.C.S., Manzi, A.O., Souza, A., 2002. A estimativa da radiação de onda longa atmosférica no Pantanal sul matogrossense durante o período seco de 1999. In: *Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Meteorologia.
- Silva, T.C., Macedo, C.H.O., Araújo, S.S., Pinho, R.M.A., Perazzo, A.F., Santos, E.M., Gonzaga Neto, S., 2011. Características agrônômicas do capim *Brachiaria decumbens* submetido a intensidades e frequências de corte e adubação

- nitrogenada. Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal 12, 583-593.
- Soares, W.A., 2009. Estudo e simulação dos fluxos de água e de energia em feijão caupi e mamona cultivados no nordeste do Brasil. Recife: Universidade Federal de Pernambuco.
- Souza, M.S.M., Bezerra, F.M.L., Viana, T.V.A., Teófilo, E.M., Cavalcante, I.H.L., 2009. Evapotranspiração do maracujá nas condições do Vale do Curu. Revista Caatinga 22, 11-16.
- van Genuchten, M.T.H., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal 44, 892-898.
- Varado, N., Braud, I., Ross, P.J., 2006. Development and assessment of an efficient vadose zone module solving the 1D Richard's equation and including root extraction by plants. Journal of Hydrology 323, 258-275.
- Vilela, H., 2011. Série Gramínea Tropical - Gênero Brachiaria (Brachiaria decumbens - Capim). Disponível: http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_gramineas_tropicais_brachiaria_decumbens.htm. Acesso: 11 abril 2013.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, J.J., Feddema, K.M., Klink, D.R., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. Journal of Geophysical Research 90, 8995-9005.