



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.ufrpe.br/jeap

<http://dx.doi.org/10.24221/jeap.2.2.2017.1179.115-124>



Modelagem da evapotranspiração e do fluxo de água em um solo cultivado com feijão caupi

Modeling of evapotranspiration and water flow in a cultivated soil with cowpea bean

Willames de Albuquerque Soares^a, Antônio Celso Dantas Antonino^b, José Romualdo de Sousa Lima^c,
Claude Hammecker^d

^a Universidade de Pernambuco-UPE, Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica, n. 455, Madalena, Recife-PE, Brasil. CEP: 50720-001. E-mail: was@poli.br

^b Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Departamento de Energia Nuclear, Av. Prof. Luiz Freire, n. 1000, Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50740-545. E-mail: acda@ufpe.br

^c Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Unidade Acadêmica de Garanhuns, Av. Bom Pastor, s/n, Boa Vista, Garanhuns-PE, Brasil. CEP: 55292-270. E-mail: romualdo.lima@ufrpe.br

^d Institut de Recherche pour le Développement-IRD, UMR Eco&Sols, Supagro - 2 place Viala, 34060 Montpellier cedex, França. E-mail: claude.hammecker@ird.fr

ARTICLE INFO

Recebido 14 Mar 2017

Aceito 19 Abr 2017

Publicado 30 Abr 2017

ABSTRACT

A numerical model was used to evaluate evapotranspiration (ET) of cowpea bean, and evolution of soil water storage (SWS) at depths of 10, 20 and 30 cm. The input data of the model were the potential evapotranspiration (ETP), rainfall and hydraulic properties of soil, as initial water content, water retention curves of the soil and four specific pressure head values regulating the extraction of water by the roots. The values of computed ET were compared to the measured values obtained by the Bowen ratio energy balance method, during the same period. Evolution of the modeled SWS was compared to experimental data obtained by neutron probe measurements. The average values of ET for the culture were 3.88 and 3.96 mm.d⁻¹, obtained by the model and the energy balance method, respectively. The model predicted accumulated ET with an underestimated relative error of 1.77%. The comparison between computed and measured evolution of the SWS at depths of 10, 20 and 30 cm showed RMSE results of 4.9, 6.3 and 10.5, respectively.

Keywords: Bowen ratio, water content, numerical model.

RESUMO

Um modelo numérico foi utilizado para modelar a evapotranspiração do feijão caupi, e a evolução do estoque de água no solo nas profundidades de 10, 20 e 30 cm, utilizando dados de evapotranspiração potencial, precipitação e os seguintes dados hídricos: umidade volumétrica inicial, curva de retenção da água no solo e quatro valores de potenciais matriciais que regulam a extração de água pelas raízes. Os valores modelados de evapotranspiração foram comparados com os valores medidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen. A modelagem da evolução do estoque de água no solo foi comparada com dados medidos por uma sonda de nêutrons. Os valores médios de evapotranspiração da cultura foram 3,88 mm d⁻¹ e 3,96 mm.d⁻¹, obtidos pelo modelo e pelo método do balanço de energia, respectivamente. O modelo predisse a evapotranspiração acumulada com um erro relativo subestimado de 1,77%. As evoluções dos estoques de água no solo nas profundidades de 10, 20 e 30 cm obtiveram resultados que apresentaram valores da

raiz quadrada média do erro (RMSE) de 4,9, 6,3 e 10,5 mm, respectivamente, o que indicam o pequeno espalhamento entre os dados medidos e os simulados.

Palavras-Chave: Razão de Bowen, umidade do solo, modelo numérico.

Introdução

A necessidade de uso dos recursos hídricos no meio agrícola tem crescido expressivamente, devido à agregação de novas técnicas ao processo produtivo. Isto tem aumentado a preocupação acerca do uso racional da água, de modo a não causar danos ao meio ambiente. A evapotranspiração é o principal parâmetro para perda de água no sistema solo-planta-atmosfera, determinando o grau de estresse hídrico do solo (Eitzinger et al., 2004).

A dinâmica hídrica no solo é fisicamente descrita pela equação proposta por Richards, entretanto, a sua solução analítica é impossibilitada pela geometria irregular e não linear do meio, o que provoca uma forte variação nas propriedades hidrodinâmicas dos solos agrícolas, ou pela impossibilidade de aplicação de condições de contorno particulares, tornando obrigatório à utilização de métodos numéricos (Parlange et al., 1999).

Uma ferramenta que vem sendo largamente aplicada por inúmeros pesquisadores na avaliação dos impactos ambientais decorrente da poluição do solo, é a modelagem dos processos, de fluxo da água e do transporte de contaminantes no solo. Geralmente, os modelos chamados físicos, utilizam a equação de Richards como base (Neves et al., 2000). Nas duas últimas décadas foram desenvolvidas várias rotinas numéricas para resolver a equação de Richards (Antonino 1992; Romano et al., 1998; van Dam & Feddes 2000), entretanto, os resultados encontrados para o fluxo de água no solo dependem muito da estrutura do esquema numérico e do passo de tempo aplicado (van Genuchten 1982; Célia et al., 1990, Miller et al., 1998).

Um conjunto de modelos relativamente mais simples do que os modelos físicos e bastante eficazes na representação da dinâmica da água no solo são os modelos do tipo reservatório. Estes modelos utilizam os conceitos de capacidade de campo e ponto de murcha na modelagem da dinâmica da água no solo, e vêm sendo utilizados e avaliados por diversos pesquisadores (Nouna et al., 2000, Eitzinger et al., 2004, Popova & Kercheva, 2005, Nyang'au et al., 2014, Vilayvong et al., 2015).

Nouna et al. (2000) utilizaram um modelo do tipo reservatório em condições semi-áridas, avaliando o seu desempenho no período de dois anos, sob diferentes condições de umidade do ar e do solo. O modelo não apresentou perdas no seu

desempenho devido às diferenças relativas a umidade do ar, entretanto, para pequenas variações do estoque de água no solo, ocorreu uma subestimação significativa da evapotranspiração.

Eitzinger et al. (2004) fizeram um estudo em lisímetro para a comparação entre os valores de umidade no perfil do solo, medidos por meio de sondas TDR e preditos por um modelo físico e por dois modelos do tipo reservatório (múltiplas e única camada). Os autores encontraram resultados similares para os três modelos utilizados, entretanto, recomendaram o uso do modelo de múltiplas camadas, devido a sua aplicabilidade em solos com grande heterogeneidade vertical.

Popova & Kercheva (2005) avaliaram um modelo do tipo reservatório em duas culturas diferentes (milho e trigo) e em dois solos (Luvisolo e Vertissolo) e encontraram para ambos uma boa representação da extração e retenção, tanto para a água como para o nitrogênio, na zona das raízes.

Nyang'au et al. (2014) utilizaram o modelo CERES para avaliar os efeitos da mudança das condições climáticas (temperatura, radiação solar e concentração de CO₂ atmosférico) na produção de arroz, no Quênia. Eles observaram que para altas temperaturas ocorreu uma diminuição da produção de arroz.

Vilayvong et al. (2015) encontraram ótimos resultados ao utilizarem o modelo CERES-Rice para determinar quais práticas de manejo são mais adequadas para aumentar a produção de arroz, em campos de agricultores na planície de Vientiane, Laos.

Geralmente há uma boa concordância entre o estoque de água no solo, a evapotranspiração real e a drenagem obtidos por modelos físicos e por modelos do tipo reservatório. Entretanto, modelos físicos possuem uma maior sensibilidade a alterações dos parâmetros de entrada, como a profundidade das raízes, a precipitação e a espessura do perfil do solo, bem como a capacidade de campo (Antonino, 1988).

Como base no que foi exposto, o objetivo do presente trabalho foi modelar a evapotranspiração real e a evolução do estoque de água em um solo parcialmente saturado, na zona das raízes, por meio de um modelo tipo reservatório, em um solo cultivado com feijão caupi, no Nordeste do Brasil.

Material e Métodos

O modelo reservatório

O solo

O método considera o solo como uma superposição de camadas que servem como reservatórios de água, sendo o volume inicial determinado pelo seu valor inicial de umidade (θ_j^i), onde os índices i e j referem-se ao tempo e a profundidade da camada, respectivamente. A umidade relativa ao dia posterior de medida (θ_j^{i+1}) é estimada a partir do balanço hídrico em cada camada de solo e de um balanço geral de energia. O modelo utiliza uma faixa de valores limitada inferiormente pela umidade no ponto de murcha (θ_{pm}) e superiormente pela umidade na capacidade de campo (θ_{cc}) para o cálculo dos balanços e para regular a extração de água pela planta (χ_r). A

umidade do solo para a camada vertical é calculada pela distribuição da água infiltrada (P^i), entre as várias camadas de solo por um simples princípio de cascata. A drenagem do perfil do solo (DR^i) é controlada pela camada de drenagem lenta, situada na base do perfil. Na ocorrência de chuvas, após o escoamento superficial, a água remanescente infiltra na primeira camada do perfil. Se o valor da soma entre a umidade inicial da camada e a infiltração for maior do que a umidade na capacidade de campo, o excesso de água será drenado para a segunda camada. Caso contrário, não ocorre drenagem para as próximas camadas. (Figura 1). A extração total de água no solo (ER_j^i) é descrita pela soma da água retirada pelas raízes das plantas, considerada igual a transpiração, e pela evaporação do solo descoberto (E_s).

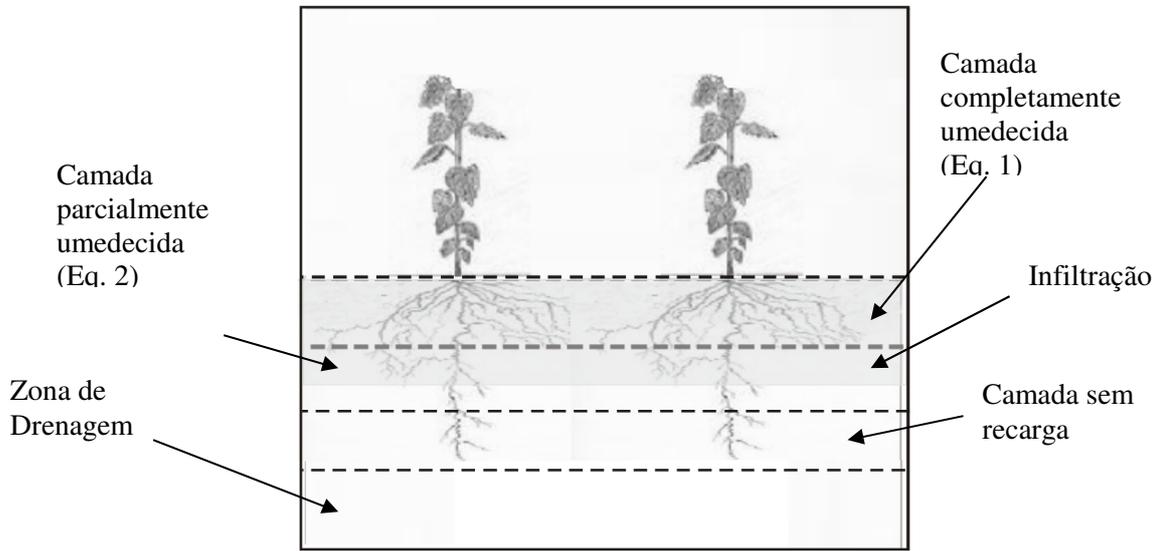


Figura 1. Esquema do modelo tipo reservatório.

No caso das camadas em que a água infiltrada foi suficiente para atingir a capacidade de campo (θ_{cc}), utiliza-se :

$$\theta_j^{i+1} = \theta_{cc} - ER_j^i \tag{1}$$

Para as camadas parcialmente recarregadas, a equação abaixo é utilizada:

$$\theta_j^{i+1} = \theta_j^i + \frac{[P^i - \sum_{m=1}^{j-1} (\theta_{cc} - \theta_m^i) \Delta j]}{\Delta j} - ER_j^i \tag{2}$$

Para as camadas que não recebem água, ou seja, onde à frente de molhamento é menor do que a profundidade da camada é aplicada a seguinte equação:

$$\theta_j^{i+1} = \theta_j^i - ER_j^i \tag{3}$$

sendo θ_m a diferença entre as umidades na capacidade de campo e do dia anterior. Por fim, a água drenada além dos limites considerados é determinada pela equação:

$$DR^i = P^i - \sum (\theta_{cc} - \theta_j^i) \Delta j \tag{4}$$

b) Demanda atmosférica

A demanda atmosférica foi determinada em função da taxa de evapotranspiração potencial (ETP) modificada em função da cobertura do solo pela cultura, e foi decomposta em suas componentes por meio das seguintes fórmulas:

$$EP = ETP(1 - \lambda) \tag{5}$$

$$TP = ETP\lambda \tag{6}$$

sendo EP a evaporação potencial, TP a transpiração potencial e λ a percentagem de área de solo coberta pela cultura. Como o modelo de reservatório não prediz o movimento da água entre as camadas, a evaporação foi considerada apenas na primeira camada (10 cm), embora a água perdida por evaporação possa ser retirada de várias camadas através de uma função empírica de evaporação versus profundidade. A evaporação real (E_s) foi considerada como igual a evaporação potencial.

A ETP foi obtida pelo modelo de Penman-Monteith, proposta por Allen *et al.* (1998).

A percentagem de área de solo coberta pela cultura foi determinada por meio de um dispositivo que consistia de um mastro e de uma base para o apoio de uma máquina fotográfica digital e de um retângulo de área conhecida, o qual era colocado em 4 áreas previamente selecionadas, para o acompanhamento da evolução da cobertura foliar.

Após serem tiradas as fotografias, as mesmas eram transferidas para um computador, onde com o auxílio do Programa Image Tool (versão 3.0), procedia-se o cálculo da área ocupada pelas plantas. Foram realizadas nove determinações durante o período de cultivo da cultura e a partir destes dados, foi construída uma interpolação em função dos dias decorridos após o plantio (DAP), tanto no estágio de crescimento quanto na maturação (Figura 2). Os dados de λ também serviram de base para a estimativa do índice de área foliar IAF , por meio da relação proposta por Medeiros *et al.* (2001). A λ e o IAF foram expressos pelas equações 7 e 8, respectivamente:

$$\lambda = \frac{-2DAP^3 + 260DAP^2 - 9290DAP + 99270}{100000} \quad (7)$$

$$IAF = -0,297 + 0,048\lambda - 0,0000754\lambda^2 \quad (8)$$

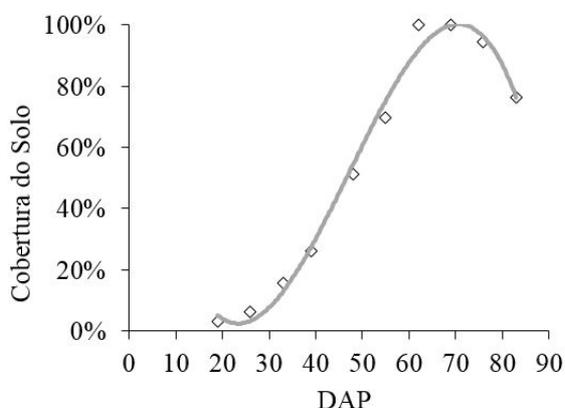


Figura 2. Porcentagem da cobertura do solo em função dos dias após o plantio (DAP).

Extração de água pelas raízes

O método proposto por Feddes *et al.* (1974), para o controle da χ_r , descreve o termo de extração da água pelas raízes em um volume de solo como sendo dependente da presença das raízes e da umidade ou do potencial matricial do solo no volume considerado. Este método relaciona o conceito de água disponível para a planta, cobrindo a variação de umidade do solo desde a capacidade de campo até o ponto de murcha.

$$\chi_r(h)_j^i = \alpha(h)\chi_{rmax} \quad (9)$$

sendo $0 \leq \alpha(h) \leq 1$ o coeficiente adimensional de redução de extração de água pela raízes, que é calculado em função do potencial matricial do solo.

A extração máxima ocorre quando o potencial matricial do solo se encontra entre dois potenciais matriciais pré-definidos (h_2 e h_3). Caso o potencial esteja fora deste intervalo, seja em potenciais altos (h_1 a h_2) ou baixos (h_3 a h_4), existe um decréscimo linear na taxa de extração de água devido à falta de areação ou redução da água disponível para a planta, respectivamente. Um esquema dessa redução pode ser visto na Figura 3.

A χ_{rmax} ocorre sempre que o potencial matricial do solo esteja dentro do intervalo limitado pelos potenciais h_2 e h_3 , e é calculada para cada camada pela relação:

$$\chi_{rmax} = \frac{TP}{PR} \quad (10)$$

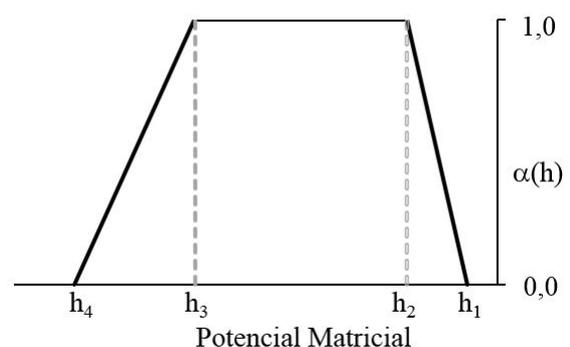


Figura 3. Esquema do coeficiente de redução de extração de água pelas raízes.

Para os valores de h_1 , h_2 , h_3 e h_4 , foram utilizados um pequeno valor, a pressão de borbulhamento, a capacidade de campo e o ponto de murcha, respectivamente. Esses valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores dos potenciais matriciais, em MPa, reguladores da extração de água pelas raízes.

h_1	h_2	h_3	h_4
-0,001	-4,38	-103,00	-15498,90

Profundidade das raízes

Para a determinação da profundidade das raízes foram feitas amostragens por meio de monólitos de solos, conforme a metodologia descrita por Bohm (1979), utilizando-se placas de pregos medindo 30 cm de comprimento por 30 cm de largura. As amostras foram retiradas com uma espessura de solo de aproximadamente 20 cm.

Após a retirada, as amostras eram colocadas em tanque com água durante 24 horas, com o objetivo de facilitar a lavagem das raízes, isto é, a separação das raízes do solo. Para remover o solo das placas utilizaram-se jatos controlados de água por intermédio de uma mangueira. Ao final da lavagem, as raízes foram separadas e identificadas por faixas de 5 cm, correspondendo às profundidades de amostragens em toda a largura da placa (30 cm).

Para a utilização no modelo, as medidas das profundidades das raízes foram interpoladas em função dos dias decorridos após o plantio (*DAP*), tanto no estágio de crescimento quanto na maturação, por meio de uma função quadrática expressa por:

$$PR = -0,117DAP^2 + 1,211DAP - 2,432 \quad (11)$$

A profundidade máxima das raízes se deu ao 37 *DAP*, atingindo uma profundidade de 29,0 cm (Figura 4).

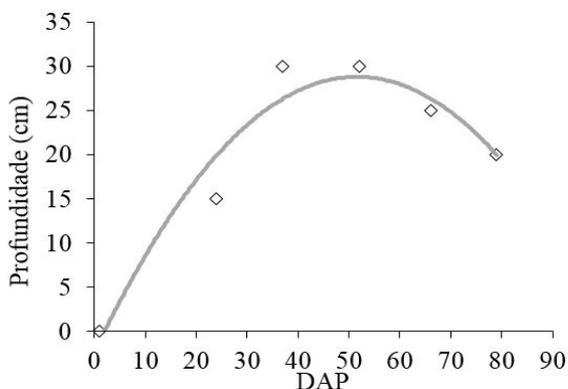


Figura 4. Profundidades das raízes do feijão caupi, durante o período de 11/03/2003 a 07/06/2003.

Área de estudo e parcela experimental

Os estudos foram realizados na fazenda Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, situado na microrregião do Brejo Paraibano, no município de Areia, PB (6°58'12" S e 35°42'15" O). O período do experimento se deu entre os dias 11/03/2003 e 07/06/2003. A precipitação máxima ocorreu no 44º dia após o plantio (*DAP*), com um total de chuvas de 34,4 mm.

Balço de energia

Para a realização do balanço de energia, foi instalada uma torre no centro da área experimental contendo sensores de temperatura, de umidade relativa do ar, de velocidade do vento, um piranômetro, para a medida da radiação global, um radiômetro para as medições da radiação líquida, e um pluviógrafo, para a medida da precipitação pluviométrica. Todos os dados obtidos foram armazenados como médias a cada 30 minutos em um sistema de aquisição de dados CR 10x da *Campbell Scientific*. A única exceção se deu para os dados de pluviometria, os quais foram calculados em seu valor total.

O balanço de energia na superfície do solo pode ser representado através da seguinte equação (Perez et al., 1999; Todd et al., 2000):

$$R_n = G + H + LE \quad (12)$$

sendo R_n o saldo de radiação (Wm^{-2}), G o fluxo de calor no solo (Wm^{-2}), H o fluxo de calor sensível (Wm^{-2}) e LE o fluxo de calor latente (Wm^{-2}).

A partição da energia disponível ($R_n - G$) entre fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível pode ser obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (β), baseado na razão das densidades de fluxo de calor sensível e calor latente, sendo determinada pela razão entre as diferenças na temperatura do ar e na pressão de vapor em dois níveis (Perez et al., 1999):

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (13)$$

sendo ΔT a diferença de temperatura do ar ($^{\circ}C$) e Δe a diferença de pressão de vapor (kPa).

Utilizando-se esta razão, procederam-se o cálculo dos fluxos de calor latente e calor sensível H pelas seguintes equações:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (14)$$

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (15)$$

A taxa de evapotranspiração da cultura (mm) foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente (Equação 13) pelo calor latente de vaporização, o qual é igual a 2,45 MJ kg⁻¹.

Para se evitar possíveis erros na estimativa dos fluxos de calor latente e de calor sensível, os valores da razão de Bowen menores do que -0,75, bem como aqueles valores cujas medições dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor eram menores do que o limite de resolução dos sensores, foram eliminados e substituídos por

interpolação dos valores precedentes e subsequentes válidos (Ohmura, 1982; Ortega-Farias et al., 1996).

Conteúdo de água no solo

Para a obtenção do conteúdo de água no solo foi instalado um tubo de acesso, em alumínio, para a sonda de nêutrons que é constituída essencialmente de uma fonte radioativa que emite nêutrons rápidos e de um detector de nêutrons térmicos. As medidas neutrônicas foram realizadas diariamente a cada 10 cm, com uma sonda TROXLER série 3300, tendo a mesma uma fonte radioativa de Am-Be de atividade de 10 mCi (0,37 GBq). Os valores do conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha, correspondentes às tensões de 0,033 MPa e 1,5 MPa, foram 0,319 cm³ cm⁻³ e 0,179 cm³ cm⁻³, respectivamente.

Avaliação da modelagem

O desempenho da modelagem foi avaliado comparando-se a evaporação acumulada e o estoque de água, medidos e simulados. Os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho da modelagem foram o erro médio *EM*, a raiz quadrada média do erro *RQME* e o erro relativo *ER*, os quais são, respectivamente, calculados a partir das seguintes equações:

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)}{n} \quad (16)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - o_i)^2}{n}} \quad (17)$$

$$ER = \frac{\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n o_i}{\sum_{i=1}^n o_i} \quad (18)$$

sendo *n* o número total de casos, *p_i* os valores preditos e *o_i* os valores medidos. *EM* é uma medida de tendência dentro dos resultados simulados. Valores perto de zero indicam os valores medidos e simulados não diferem sistematicamente um do outro. *RMSE* é uma medida que indica o grau de espalhamento entre pontos de dados medidos e simulados ao redor da linha de relação 1:1. Baixos valores indicam um pequeno espalhamento. O *ER* indica o erro relativo entre os valores medidos e estimados, levando em consideração as dimensões dos valores medidos.

Resultados e Discussão

A precipitação pluviométrica e a ETP totalizaram, durante o experimento, 341,4 mm e 373,0 mm, respectivamente, com uma distribuição bastante regular (Figura 5).

As componentes do balanço hídrico do solo, para períodos de cada dez dias, na cultura de feijão são apresentadas na Tabela 2. A ETP apresentou uma média diária de 4,66mm d⁻¹, com taxas mínima e máxima de 1,59 mmd⁻¹ e de 7,8 mmd⁻¹, respectivamente. A drenagem totalizou 18,7 mm, com uma média diária de 0,23 mm.

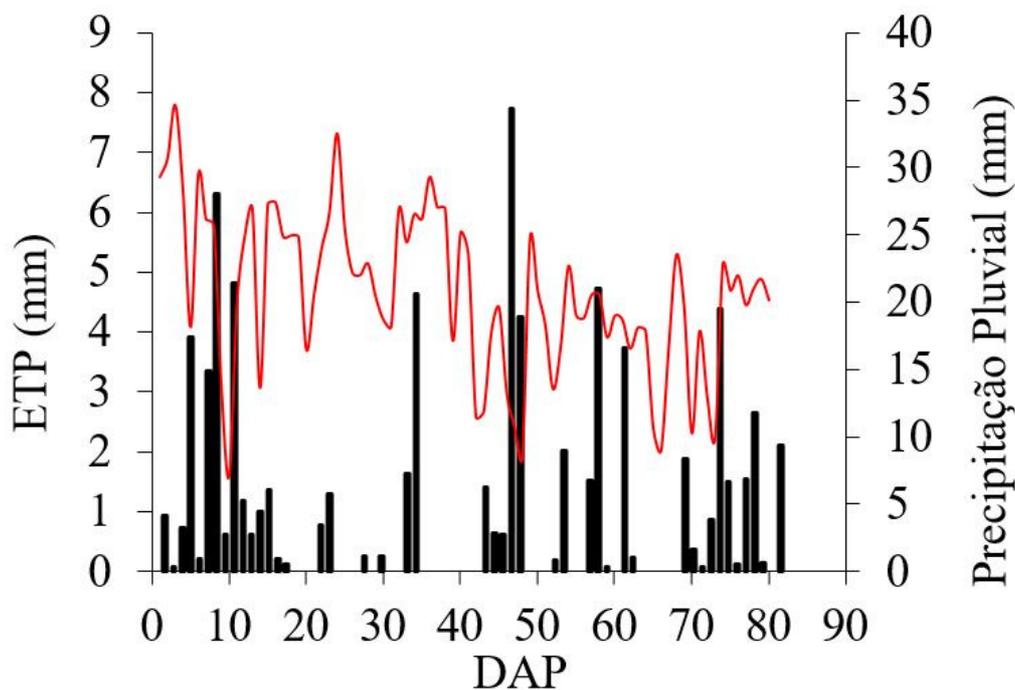


Figura 5. Evapotranspiração potencial (ETP) e precipitação pluvial durante o ciclo da cultura.

Tabela 2 - Variação da precipitação pluvial (P), da evapotranspiração potencial (ETP), da drenagem (D) e do armazenamento de água no solo (ΔA), em Areia, PB.

DAP	P	ETP	DR	ΔA
1-10	92,9	54,76	5,13	5,90
11-20	23,1	52,07	5,20	-2,24
21-30	15,1	53,00	5,20	-7,42
31-40	29,6	55,83	6,91	-12,39
41-50	65,8	36,52	11,79	-2,26
51-60	45,6	42,03	14,83	-1,34

61-70	59,3	36,23	18,05	10,85
71-80	10,0	42,56	18,77	-8,90

Os valores de ET medida e modelada diariamente e a evolução do índice de área foliar IAF no ciclo da cultura são apresentadas na Figura 6, e a ET acumulada correspondente é apresentada na Figura 7. Os valores médios de evapotranspiração da cultura foram de 3,88 e 3,96 mm d⁻¹, obtidos pelo modelo e pelo método do balanço de energia, respectivamente.

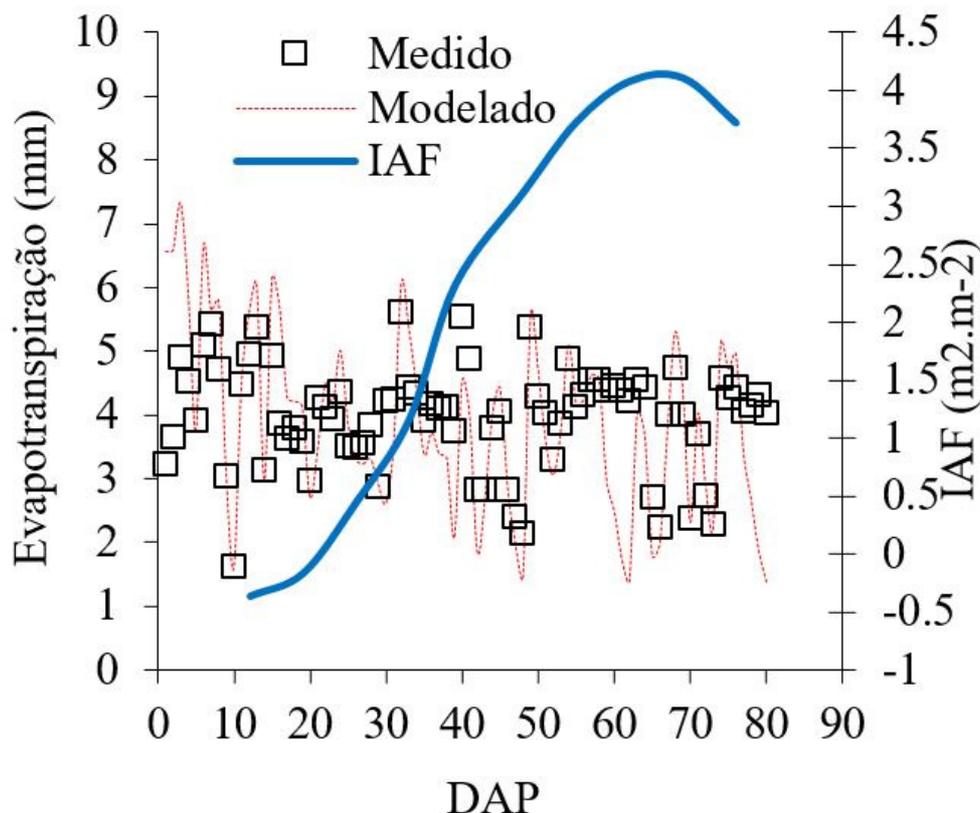


Figura 6. Evapotranspiração diária medida e modelada e evolução do índice de área foliar IAF durante o ciclo do feijão caupi.

O modelo predisse a ET acumulada com um erro relativo subestimado de 1,8%. Tal valor representa uma pequena diferença, uma vez que Rocha et al. (2003), utilizando o modelo proposto por Christiansen-Hargreaves (1969), na sua forma original, encontraram valores significantes subestimados para a evapotranspiração real do feijão preto, encontrando um erro médio da estimativa de 11,78%.

Entretanto, deve-se ressaltar que os valores citados de evapotranspiração real, por Rocha et al. (2003) são para o feijão preto enquanto que a pesquisa realizada foi com o feijão caupi e de que o modelo utilizado por eles não leva em consideração o estresse hídrico.

Observa-se na Figura 6 que o modelo a partir de 12 DAP começa a apresentar uma melhor

adequação aos dados medidos, quando comparado ao início do ciclo. Nesse período, a cultura começa a apresentar uma cobertura vegetal e o crescimento das raízes começa a ultrapassar a primeira camada. Essa melhora nos valores modelados se deve ao fato de que este método utiliza a evaporação do solo e a transpiração das plantas separadamente e que antes do 12 DAP o solo encontrava-se, praticamente, desnudo, ou seja, sem vegetação.

Apesar dos valores de RQME e de EM serem relativamente altos, deve-se ressaltar que os dados necessários para a aplicação do modelo são poucos e fáceis de serem obtidos quando comparados com os dados necessários para a aplicação do balanço de energia.

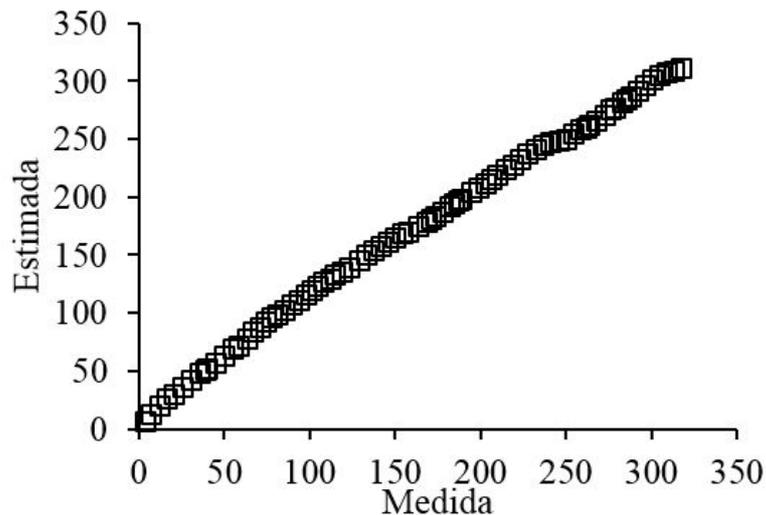


Figura 7. Comparação entre a evapotranspiração acumulada medida e modelada no ciclo durante o ciclo do feijão caupi.

Na Figura 8 observa-se o estoque de água no solo, medido e modelado, nas camadas de 10, 20 e 30 cm durante o ciclo da cultura. Como também comprovam os resultados da avaliação da modelagem (Tabela 3), a camada de 10 cm foi a que obteve uma melhor representação dos valores medidos.

O melhor desempenho da modelagem a 10 cm foi em consequência da presença das raízes ao longo de todo o tempo nesta camada. As raízes só atingiram a segunda camada no 12 DAP e a terceira camada só foi atingida depois do 24 DAP; esse fato interagiu diretamente com a modelagem da transpiração nos primeiros dias. Além disso, a evaporação só foi considerada nesta camada. Este mesmo comportamento foi observado por Eitzinger et al. (2004), que também obtiveram valores crescentes de RQME com a profundidade, sendo a camada mais próxima da superfície, a que melhor estimou o estoque de água no solo.

Os valores dos parâmetros estatísticos para a avaliação da modelagem são apresentados na Tabela 3. Considerando os poucos dados de entrada, os valores de EM, RQME e ER indicam que a modelagem conseguiu representar de forma satisfatória o estoque de água no solo e a evaporação acumulada. Os resultados indicam que a modelagem foi mais eficiente para a evaporação acumulada. Entretanto no estoque de água no solo nas camadas de 10 e 20 cm foram observados os menores espalhamentos entre os dados medidos e os simulados, como mostram os valores de RQME, EM, principalmente a 10 cm.

Considerando a simulação da evaporação acumulada, utilizando o modelo reservatório, observa-se um maior espalhamento entre os dados medidos e os simulados, mas, ainda assim, estes são valores aceitáveis que indicam uma boa adequação do modelo utilizado aos parâmetros modelados.

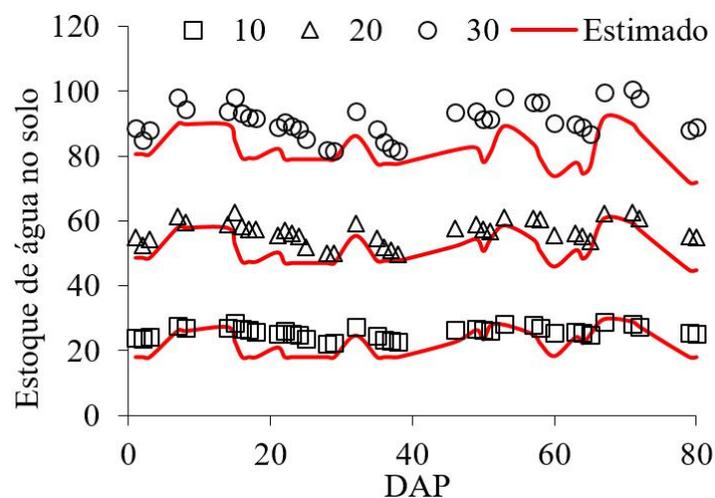


Figura 8. Estoque de água no solo medido e estimado, nas profundidades de 10, 20 e 30 cm, durante o ciclo do feijão caupi.

Tabela 3. Avaliação estatística do desempenho do modelo reservatório utilizado. Raiz quadrada média do erro (RQME), erro relativo (ER) e erro médio (EM) entre os valores medidos e modelados para o estoque de água no solo e evapotranspiração acumulada.

Estoque de água no solo			
Profundidades	RQME	ER	EM
10	4,95	3,92	-0,198
20	6,28	5,47	-0,121
30	10,46	9,58	-0,131
Evapotranspiração acumulada			
RQME	ER	EM	
4,70	10,24	0,018	

Em geral, os valores preditos pelo modelo apresentaram valores dentro de uma faixa de erro bastante eficaz, quando comparados com os citados por Braud et al (2005), que avaliando módulos de extração de água pelas raízes combinadas com um modelo físico, obtiveram valores de RQME entre 0,84 mm e 0,97 mm para a evapotranspiração diária, e entre 4,3 e 14,2 para o estoque de água no solo.

Conclusão

O modelo reservatório apresentou resultados bastante satisfatórios para a modelagem da evapotranspiração, principalmente quando a cultura apresentou um IAF alto. O mesmo ocorreu para o estoque de água no solo, principalmente na camada de 10 cm.

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage. FAO Rome:, 300p.

ANTONINO, A. C. D. 1992. Modélisation des transferts de masse et de chaleur dans système sol-plant-atmosphère. Influence de la variabilité des caractéristiques hydrodynamiques des sol. Tese (Doutorado), Universidade Joseph Fouries, Grenoble, França. 195p.

ANTONINO, A. C. D. 1988. Simulação numérica do comportamento dinâmico da água no solo. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. 118p.

BRAUD, I. ; VARADO, N. ; OLIOSO, A. 2005. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or potential transpiration. Journal of Hydrology, v.301, p.267-286.

BOHM, W. 1979. Methods of studying root systems. Springer, Berlim, 188p.

CELIA, M. A.; BOULOUTAS, E. T.; ZARBA, R. L. 1990. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation. Water Resources Research, v.26, p.1483-1496.

CHISTIANSEN, J. E.; HARGREAVES, G. H. 1969. Irrigation requirements from evaporation. Transactions of International York, v.3, n.23. p.569-596.

EITZINGER, J.; TRNKA, M.; HÖSCH, J.; ŽALUD, Z.; DUBROVSKÝ, M. 2004. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. Ecological Modelling, v.171, p.223-246.

FEDDES, R. A.; BRESLER E.; NEUMAN, S. P. 1974. Field test of a modified numerical model for water uptake by root systems. Water Resources Research, v.10, p.1199-1206.

MILLER, C. T.; WILLIAMS, G. W.; KELLY, C, T.; TOCCI, M. D. 1998. Robust solution of Richards equation for nonuniform porous media. Water Resources Research, v.34, p.2599-2610.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M. 2001. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L). Agricultural Water Management, v.49, p.211-224.

NEVES, R.; CHAMBEL-LEITÃO, P.; LEITÃO, P.C. 2000. Modelação numérica da circulação da água no solo. O modelo mohid. Pedologia, v.28, p.46-55.

NOUNA, B. B.; KATERJI, N.; MASTRORILLI, M. 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model Performance. European Journal of Agronomy, v.13, p.309-322.

NYANG'AU, W. O.; MATI, B. M.; KALAMWA, K.; WANJOGU, R. K.; KIPLAGAT, L. K. 2014. Estimating Rice Yield under Changing Weather Conditions in Kenya Using CERES Rice Model. International Journal of Agronomy, v.2014, Article ID 849496, 12p.

OHMURA, A. 1982. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. Journal Applied Meteorology, v.21, p.595-598.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. 1996. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. *Agricultural and Forest Meteorological*, v.81, p.131-143.

PARLANGE, J. -Y.; HOGARTH, W. L.; BARRY, D. A.; PARLANGE, M. B.; HAVERKAMP, R.; ROSS F. P. J.; STEENHUIS, T. S.; DICARLO, D. A.; KATUL, G. 1999. Analytical approximation to the solutions of Richards equation with applications to infiltration, ponding, and time compression approximation. *Advances in Water Resources*, v.23, p.189-194.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. 1999. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorological*, v.97, p.141-150.

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M. 2005. CERES model application for increasing preparedness to climate variability in agricultural planning – calibration and validation test. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.30, p.125-133.

ROCHA, O. C.; GUERRA, A. F.; AZEVEDO, H. M. 2003. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para a estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. *Revista Brasileira de*

Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.263-268.

ROMANO, N. O; BRUNONE, B. O.; SANTINI, A. 1998. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soil. *Advances in Water Resources*, v.21, p.315-324.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. 2000. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorological*, v.103, p.335-348.

VAN DAM, J. C.; FEDDES, R. A. 2000. Numerical simulation of infiltration, evaporation and shallow groundwater levels with the Richards equation. *Journal of Hydrology*, v.233, p.72-85.

VAN GENUTHEN, M. T. 1982. A comparison of numerical solutions of the one-dimensional unsaturated-saturated flow and transport equations. *Advances in Water Resources*, v.5, p.47-55.

VILAYVONG, S.; BANTERNGI, P.; PATANOTHAI, A.; PANNANGPETCH, K. 2015. CSM-CERES-Rice model to determine management strategies for lowland rice production. *Scientia Agrícola*, v.72, n.3, p.229-236.