

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO FEIJÃO CAUPI UTILIZANDO O MODELO DE PENMAN-MONTEITH

José Romualdo de Sousa Lima¹; Antonio Celso Dantas Antonino²; Willames de Albuquerque Soares²; Ivandro de França da Silva¹

¹*Departamento de Solos e Engenharia Rural, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, PB, romualdosolo@yahoo.com*

²*Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE*

1 RESUMO

O modelo de Penman-Monteith (PM) com uma resistência do dossel (r_c) variável foi usado para estimar a evapotranspiração (ET) do feijão caupi sob diferentes condições atmosféricas e de conteúdo de água do solo. A resistência r_c é função da temperatura do ar, do déficit de pressão de vapor, do saldo de radiação e do conteúdo de água do solo. Esses parâmetros foram medidos, com sensores conectados a uma central de aquisição, numa área cultivada de 4,0 ha, localizada no CCA-UFPB, Areia, PB. A ET foi determinada experimentalmente por meio do método do Balanço de Energia-razão de Bowen. O conteúdo de água do solo foi monitorado com sensores do tipo TDR. O desempenho do modelo de PM foi avaliado comparando-se os valores horários e diários de ET calculados e os determinados experimentalmente. O valor do erro padrão (SE) para os valores horários da ET foi de 0,02 mm h⁻¹, enquanto o índice d (Id) foi 0,99; para os valores diários, SE foi de 0,45 mm d⁻¹ e o Id de 0,89. O modelo de PM pode ser usado para estimar com exatidão a ET do feijão caupi nas escalas horária e diária.

UNITERMOS: razão de Bowen, calor latente, conteúdo de água no solo, irrigação, TDR

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; SILVA, I. de F. da.
COWPEA EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE USING THE PENMAN-MONTEITH MODEL

2 ABSTRACT

The Penman-Monteith model with a variable surface canopy resistance (r_c) was used to estimate cowpea crop evapotranspiration (ET) under different soil water content and atmospheric conditions. r_c is a function of air temperature, vapor pressure deficit, net radiation and soil water content. These parameters were measured with sensors connected to a datalogger, in a 4.0-ha cultivated area situated at the CCA-UFPB, Areia, PB. ET was determined experimentally by the Bowen Ration Energy Balance method. Soil water content was monitored by TDR sensors. The Penman-Monteith model performance (ET_{PM}) was evaluated using hourly and daily evapotranspiration values that were obtained from the energy balance – Bowen ratio (ET_B). On an hourly basis, the overall standard estimate error (SEE) was 0.02 mm h⁻¹ and the d index (Id) was 0.99; while on a daily basis, the SEE was 0.45 mm d⁻¹ and the Id, 0.89. Thus, the Penman-Monteith model may be used to estimate daily and hourly cowpea crop ET accurately.

KEYWORDS: Bowen ratio, latent heat, soil water content, irrigation, TDR

3 INTRODUÇÃO

A estimativa da evapotranspiração (ET) é de fundamental importância para o planejamento da irrigação das culturas, para aplicação em modelos de predição de crescimento e produção de culturas (Rana, Katerji & Perriola, 2001).

A equação de Penman-Monteith (PM) pode ser usada para fazer predições da ET real, sendo que a maior dificuldade na aplicação desta equação está relacionada com a estimativa correta da resistência do dossel (Rana & Katerji, 1998). Vários modelos empíricos foram desenvolvidos para explicar as influências não lineares tanto das condições atmosféricas quanto do conteúdo de água do solo no comportamento da resistência estomática (r_s) ou na resistência do dossel (Jarvis, 1976; Noilhan & Planton, 1989; Taconet et al., 1995; Olioso, Carlson & Brisson, 1996; Rana et al., 1997). Esses modelos usualmente incluem os valores de radiação global incidente, do déficit de pressão de vapor, dentre outros. O efeito da umidade do solo pode ser introduzido diretamente por meio da curva de resposta da resistência ao conteúdo de água do solo na zona radicular (Noilhan & Planton, 1989) ou ao potencial de base, que é o potencial hídrico foliar medido antes do nascer do sol (Rana et al., 1997). Ortega-Farias (1993) propôs um modelo alternativo para a estimativa da resistência do dossel (r_c) que é muito atrativo para os usuários da equação de PM, pois necessita de dados similares (saldo de radiação, déficit de pressão de vapor), sendo de fácil implementação, além de poder incluir os valores do conteúdo de água do solo. Esse modelo foi usado com sucesso em grama (Ortega-Farias, 1993; Ortega-Farias, Acevedo & Fuentes, 1999), em tomate sob condições irrigadas (Ortega-Farias et al., 2000) e em soja com um conteúdo de água do solo variando de $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ a $0,20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (Ortega-Farias et al., 2004).

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo utilizar a equação de PM, com uma r_c variável proposta por Ortega-Farias (1993), para se estimar a evapotranspiração horária e diária do feijão caupi nas condições do Brejo Paraibano.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização, clima e solo da área experimental

As medidas necessárias para a aplicação da equação de PM foram efetuadas numa área de 4,0 ha, localizada 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 ($6^{\circ}58'12''$ S e $35^{\circ}42'15''$ W, 620 m). O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As' (quente e úmido), com estação chuvosa no período outono-inverno, sendo as maiores precipitações nos meses de junho e julho (BRASIL, 1972). O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 1999).

4.2 Plantio, colheita e período de coleta dos dados

O plantio da cultura do feijão caupi foi realizado manualmente e se estendeu de 13 a 16/03/2002, e a colheita dos dias 10 a 14/06/2002. O espaçamento entre filas foi de 1,0 m e, entre plantas, de 0,50 m, sendo colocadas três sementes por cova. Os dados necessários a aplicação da equação de Penman-Monteith e para o balanço de energia, corresponderam ao período de 04/04/2002 a 14/06/2002 (23-94 dias após o plantio).

4.3 Altura da cultura e comprimento e densidade de raízes

Para a realização das medidas de altura foram escolhidas cinco plantas na área experimental, sendo as medidas realizadas semanalmente desde os 23 DAP (dias após o plantio) até a colheita da cultura. Para o intervalo entre medidas, o valor da altura da cultura foi obtido por interpolação linear. Aos 23, 65 e 94 DAP, a cultura se encontrava com uma altura média de $21,8 \pm 3,2$, $41,3 \pm 5,5$ (altura máxima) e $31,8 \pm 5,1$ cm, respectivamente.

Na determinação do comprimento e da densidade das raízes utilizou-se o método de Tennant (1975). A coleta das raízes foi feita por meio de monolitos de solos, conforme a metodologia descrita por Bohm (1979). Foram realizadas quatro medições durante o ciclo fenológico do feijão caupi (23 DAP, 36 DAP, 51 DAP e 78 DAP), sendo que em cada dia de medição eram retirados quatro monolitos de solo. Verificou-se que a profundidade máxima (p_{\max}) atingida pelas raízes foi 0,40 m, sendo que 80% delas encontravam-se na camada de 0-0,20 m.

4.4 Conteúdo de água do solo

O conteúdo de água do solo foi medido a cada 30 minutos por meio de dois sensores CS 615, tipo TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), da Campbell Scientific instalados horizontalmente, respectivamente, nas profundidades de 0,20 m e 0,40 m. A curva de calibração utilizada foi a do próprio sensor (Lima et al., 2005).

O conteúdo de água do solo na zona das raízes (camada de 0-0,40 m) foi calculado por meio da seguinte equação:

$$\theta_r^i = \frac{\theta_{20} \cdot r_1 + \theta_{40} \cdot r_2}{r_1 + r_2} \quad (1)$$

sendo θ_r^i o conteúdo de água do solo na zona das raízes (o índice i refere-se ao tempo em minutos), θ_{20} e θ_{40} o conteúdo de água do solo nas profundidades de 0,20 e 0,40 m, e r_1 e r_2 as porcentagens das densidades das raízes nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, cujos valores foram 0,8 e 0,2 respectivamente.

Os valores do conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) e no ponto de murcha (θ_{pm}), correspondentes às tensões de 0,033 MPa e 1,5 MPa, na camada de 0-0,40 m, foram $0,279 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,212 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente. Eles foram obtidos em laboratório, determinados em amostras de solo com estrutura indeformada, utilizando-se a câmara de pressão de Richards (Reeve & Carter, 1991).

4.5 Balanço de Energia – razão de Bowen

Para a realização do balanço de energia foi instalada uma torre no centro da área contendo dois sensores de medidas da temperatura e da umidade relativa do ar, e um perfil de anemômetros a $z_1 = 0,35$ m, $z_2 = 0,70$ m e $z_3 = 1,05$ m acima do dossel da cultura. Além desses sensores, instalou-se um piranômetro, para a medida da radiação global, um saldo radiômetro, para as medições do saldo de radiação, um sensor para a medição da direção do vento, um termômetro infravermelho, para a medida da temperatura da superfície, e um pluviógrafo, para a medida da precipitação pluvial, sendo que estes sensores foram instalados na mesma torre, numa altura de 1,5 m da superfície do solo. Para a medida do fluxo de calor no solo, foram instalados fluxímetros em dois locais numa profundidade $z_1 = 0,05$ m, juntamente com um sensor de umidade do solo na mesma profundidade, além de duas sondas

térmicas instaladas horizontalmente nas profundidades de $z_1 = 0,02$ m e $z_2 = 0,08$ m. Todas as medidas citadas foram armazenadas como médias a cada 30 minutos (30 intervalos de um minuto), à exceção da pluviosidade quando foi calculado seu valor total no período de 30 minutos, em um sistema de aquisição de dados CR 10X da Campbell Scientific.

O fluxo de calor na superfície do solo (G), foi dado de acordo com Kustas et al. (2000):

$$G = G_p + \frac{\Delta T_s CD}{t} \quad (2)$$

sendo G_p a medição do fluxo de calor pelo fluxímetro, ΔT_s a variação na temperatura média do solo ($^{\circ}\text{C}$) durante o período de medição, C a capacidade térmica volumétrica do solo ($\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), D a profundidade do fluxímetro (m) e t a duração do período de medição (s).

O valor de C foi estimado somando-se as capacidades caloríficas dos vários constituintes do solo, ponderados de acordo com suas frações de volume, com base em de Vries (1966):

$$C = 1,92f_m + 2,51f_o + 4,18\theta \quad (3)$$

sendo: f_m a fração de volume dos minerais, f_o a fração de volume da matéria orgânica e θ a umidade volumétrica do solo.

O balanço de energia foi determinado segundo a razão de Bowen e a equação geral do balanço de energia foi descrita da seguinte forma (Perez et al., 1999):

$$R_n = G + H + LE \quad (4)$$

sendo R_n 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}).

A partição da energia disponível entre fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível pode ser obtida pelo método do balanço de energia (razão de Bowen), que se baseia na razão das densidades de fluxo de H e L podendo ser determinada pela relação entre a temperatura do ar e pressão parcial de vapor em dois níveis mediante a expressão citada por Perez et al. (1999):

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (5)$$

sendo γ a constante psicrométrica ($0,066 \text{ kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); ΔT e Δe as diferenças de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e pressão parcial de vapor (kPa), entre os níveis 1 e 2.

A partir das medições, realizadas a cada 30 minutos, do saldo de radiação (R_n), do fluxo de calor do solo (G) e das diferenças de temperatura do ar (ΔT) e de pressão de vapor (Δe), juntamente com a equação simplificada do balanço de energia (Eq. 4), utilizando-se a razão de Bowen (β) (Eq. 5), procedeu-se o cálculo dos fluxos de calor latente (LE) (Eq. 6) e calor sensível (H) (Eq.7):

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (6)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (Rn - G) \quad (7)$$

A taxa de evapotranspiração (mm) foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente pelo calor latente de vaporização (L), considerado como constante (2,45 MJ kg⁻¹). Esse valor constante se refere a uma temperatura de 20°C, embora L seja uma função fraca da temperatura.

4.5 Estimativa da evapotranspiração (ET_{PM}) pelo método de Penman-Monteith com a r_c de Ortega-Farias (1993)

A evapotranspiração de uma cultura pode ser expressa de acordo com a seguinte equação (Monteith & Unsworth, 1990):

$$LET_{PM} = fc \cdot \frac{\Delta(Rn - G) + \frac{\rho c_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (8)$$

sendo fc um fator de conversão de W m⁻² para mm h⁻¹ (0,0015), L o calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹); ET_{PM} a evapotranspiração calculada do modelo de Penman-Monteith numa base horária (mm h⁻¹); Δ a inclinação da curva de pressão de vapor em função da temperatura (kPa °C⁻¹); Rn o saldo de radiação (W m⁻²); G o fluxo de calor no solo (W m⁻²); ρ a densidade do ar (kg m⁻³); c_p o calor específico do ar à pressão constante (1013 J kg⁻¹ °C⁻¹); (e_s-e_a) o déficit de pressão de vapor do ar para a altura de referência medida (kPa); γ a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹) e r_c e r_a as resistências do dossel e aerodinâmica (s m⁻¹), respectivamente.

Para estimativa da resistência aerodinâmica, para condições de atmosfera neutra, Allen et al. (1989) recomenda a seguinte equação:

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{0m}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{0h}} \right]}{k^2 u_2} \quad (9)$$

sendo z_m a altura de medição da velocidade do vento (m); z_h a altura de medição da umidade relativa (m); d a altura de deslocamento do plano zero (m); z_{0m} o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (m); z_{0h} o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (m); k a constante de von Karman (0,41) e u₂ a velocidade do vento na altura z (m s⁻¹).

A altura de deslocamento do plano zero (d) e o comprimento de rugosidade que governa a transferência de momentum (z_{0m}) foram estimados da altura da cultura (h_c) por meio das seguintes equações (Brutsaert, 1982):

$$d = \frac{2}{3} h_c \quad z_{om} = 0,123h_c \quad (10)$$

Já o comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (z_{oh}) pode ser estimado por (Brutsaert, 1982):

$$z_{oh} = 0,1z_{om} \quad (11)$$

A inclinação (Δ) da curva de pressão de vapor em função da temperatura (kPa °C⁻¹) foi obtida a partir da equação (Allen et al., 1998):

$$\Delta = \frac{4098 * e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (12)$$

sendo T a temperatura do ar (°C), medida no nível $z_3 = 1,05$ m.

A pressão de saturação de vapor, e_s (kPa), foi obtida de acordo com a equação (Murray, 1967):

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 * T}{T + 237,3}\right) \quad (13)$$

A partir dos dados de umidade relativa do ar (UR, %) no nível de medição de 1,05 m e dos valores calculados de pressão de saturação de vapor (e_s) foram calculados os valores de pressão atual de vapor (e_a) em kPa, pela seguinte equação:

$$e_a = UR * e_s / 100 \quad (14)$$

A r_c foi obtida pela equação proposta por Ortega-Farias (1993):

$$r_c = \frac{\rho_a \cdot c_p \cdot DPV}{\Delta \cdot (Rn - G)} \cdot F^{-1} \quad (15)$$

sendo F o conteúdo de água do solo normalizado (0 a 1).

O valor F pode ser estimado utilizando a metodologia proposta por Noilhan & Planton (1989):

$$F = \frac{\theta_r^i - \theta_{pm}}{\theta_{cc} - \theta_{pm}} \quad (16)$$

O valor F nesse estudo variou de 0,95 a 0,04.

4.7 Desempenho do modelo

A fim de avaliar as estimativas da evapotranspiração calculadas pelo modelo de PM (ET_{PM}) com a formulação de r_c proposta por Ortega-Farias (1993), esses valores foram comparados aos valores de evapotranspiração obtidos do método do balanço de energia –

razão de Bowen (ET_B). Esta comparação incluiu a razão (b) entre ET_{PM} e ET_B , o teste Z para checar se o valor de b foi significativamente diferente de 1, além do erro padrão (SE) e do índice de concordância Id de Willmott et al. (1985), o qual é dado pela seguinte equação:

$$Id = 1 - \frac{\sum (M_i - E_i)^2}{\sum ((|E_i - M|) + (|M_i - M|))^2} \quad (17)$$

sendo E_i os valores calculados pelo modelo de Penman-Monteith, M_i os valores estimados pelo método da razão de Bowen e M a média dos valores estimados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se, no período de 04/04/2002 a 14/06/2002 (23 a 94 DAP), um total de chuvas de 281,3 mm, sendo esse total bem distribuído durante todo o período. Verifica-se, ainda, que dos 72 dias de estudo em 26 não ocorreram precipitação pluvial, mas em 39 dias, as precipitações foram de até 10 mm e somente 7 dias choveram mais que 10 mm, sendo que o pico foi de 33 mm (87 DAP), ou seja, no dia 07/06/2002. Observou-se, ainda, que em somente 22 dias ocorreram precipitações maiores que 4 mm, ou seja, 48% dos dias com precipitações. O conteúdo de água do solo na camada de 0-0,40 m variou em função da disponibilidade de chuvas, sendo os menores valores, em torno de $0,214 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, encontrados aos 38 dias após o plantio (DAP) e os maiores valores, $0,275 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, aos 56 DAP (Figura 1).

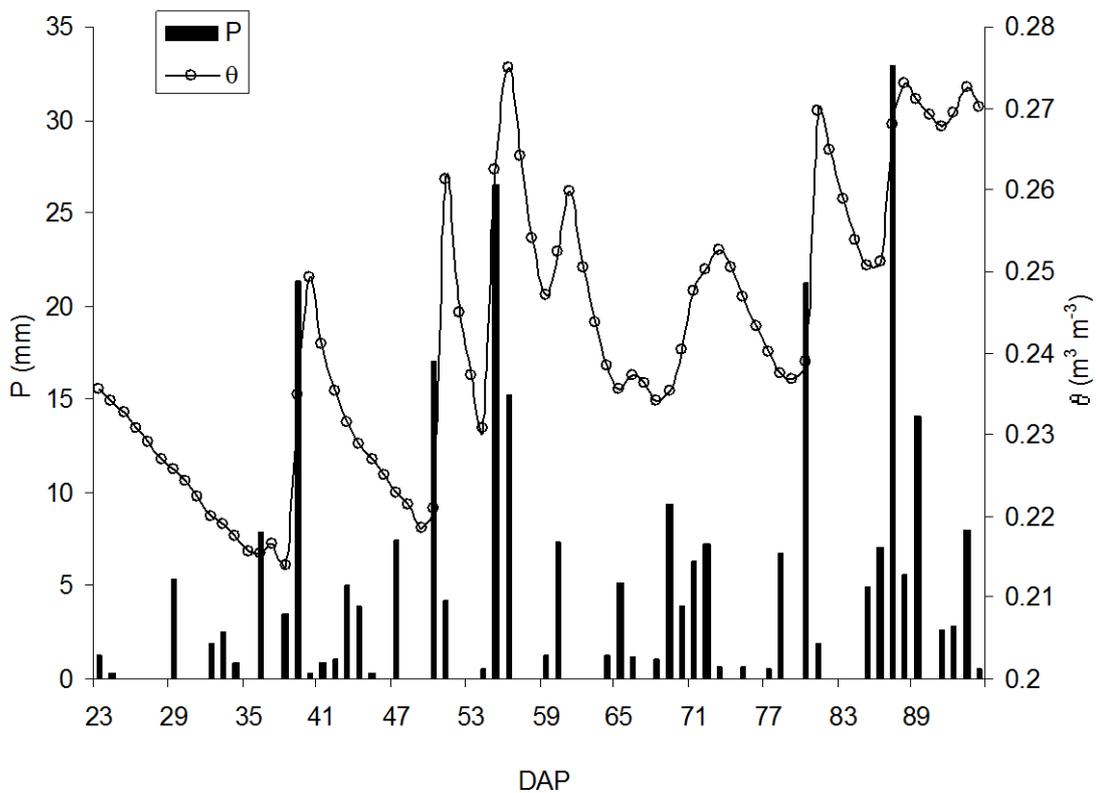


Figura 1. Valores diários de precipitação pluvial (P) e conteúdo de água no solo (θ) na camada de 0-0,40 m de profundidade durante o período experimental.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da comparação entre os valores da evapotranspiração horária e diária estimada pelo método do balanço de energia - razão de Bowen e calculada pelo modelo de Penman-Monteith, com a r_c proposta por Ortega-Farias (1993). Observa-se que os valores de evapotranspiração do feijão caupi, tanto horários quanto diários, obtidos pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e pelo modelo de Penman-Monteith com uma resistência do dossel variável (ET_{PM}), apresentaram-se muito próximos, com valores elevados de Id e b e valores baixos de SE .

O valor do erro padrão (SE) para os valores horários foi igual a $0,02 \text{ mm h}^{-1}$ ou $13,6 \text{ W m}^{-2}$. Os resultados do teste Z mostraram que o valor b ($0,81$) foi estatisticamente diferente da unidade no nível de confiança de 95%, indicando que os valores de ET_{PM} tenderam a ser menores que os valores de ET_B numa escala horária. Ortega-Farias et al. (2004) encontraram resultados semelhantes aos dessa pesquisa, com um valor de SE igual a $0,06 \text{ mm h}^{-1}$ e b diferente de 1, numa cultura de soja sob variadas condições de umidade do solo e atmosféricas.

Tabela 1. Estatísticas do desempenho do modelo de Penman-Monteith com a r_c proposta por Ortega-Farias (1993)

	ET horária	ET diária
SE^1	$0,02 \text{ mm h}^{-1}$	$0,45 \text{ mm d}^{-1}$
Id^1	0,99	0,89
b^1	0,81	0,94
Teste Z^2	F	V

1 SE = erro padrão; Id = índice de concordância de Willmott et al. (1985); b = razão entre ET_{PM} (modelo de Penman-Monteith) e ET_B (método da razão de Bowen).

2 V = hipótese verdadeira ($b=1$), F = hipótese falsa ($b \neq 1$)

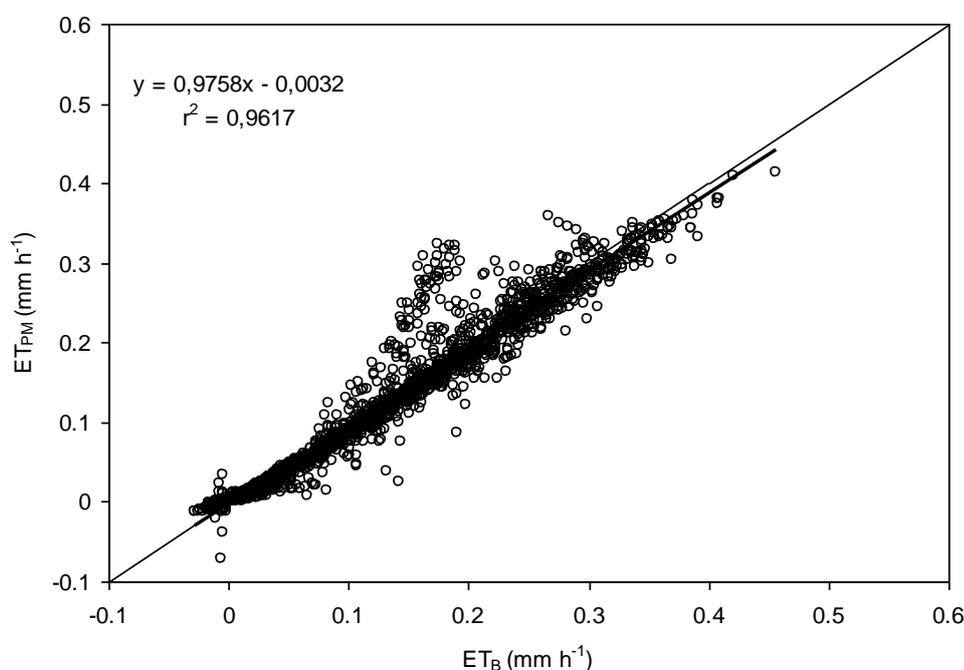


Figura 2. Comparação dos valores horários de evapotranspiração do feijão caupi obtidos pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{PM}) e pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B).

A comparação dos valores horários entre os métodos (Figura 2) indicou que poucos valores de ET_{PM} tenderam a ser maior do que os valores de ET_B para valores variando de 0,15 a 0,20 $mm\ h^{-1}$, sendo que na grande maioria dos dados, os valores de ET_{PM} e ET_B tenderam a ficar muito próximo da linha 1:1, com um coeficiente de determinação igual a 0,9617.

O coeficiente de determinação (r^2) traz apenas informações sobre a precisão do modelo estatístico obtido, porém nada revela sobre a sua exatidão. Assim, por meio da determinação de um índice de concordância proposto por Willmott et al. (1985), observou-se alta exatidão para o modelo de estimativa da evapotranspiração, usando a r_c proposta por Ortega-Farias (1993), a qual foi expressa pelo valor Id da ordem de 0,99 (Tabela 1).

Com o intuito de se avaliar a capacidade do modelo de Penman-Monteith em reproduzir a evapotranspiração do feijão caupi sob diferentes conteúdos de água do solo, foram feitas comparações diárias do dia 04/04/2002 ao dia 14/06/2002, ou seja, de 23 a 94 DAP (dias após o plantio). A Figura 3 mostra que os valores diários calculados pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{PM}) foram muito próximos dos valores estimados pelo método do balanço de energia (ET_B), com um valor de SE igual a 0,45 $mm\ d^{-1}$ (Tabela 1). O teste Z indicou que a razão b para os dados diários (0,94) foi estatisticamente igual a 1, sugerindo a igualdade entre ET_{PM} e ET_B . Ortega-Farias et al. (2004), numa cultura de soja, encontraram resultados semelhantes, com SE igual a 0,47 $mm\ d^{-1}$ e valor b de 0,97, o qual não foi diferente de 1. Já Ortega-Farias et al. (2000), numa cultura de tomate, encontraram um SE de 0,51 $mm\ d^{-1}$, com a razão b sendo diferente de 1. O valor do Id foi um pouco menor para os dados diários (0,89), como pode ser visto da Tabela 1, mas ainda apresentando uma alta exatidão.

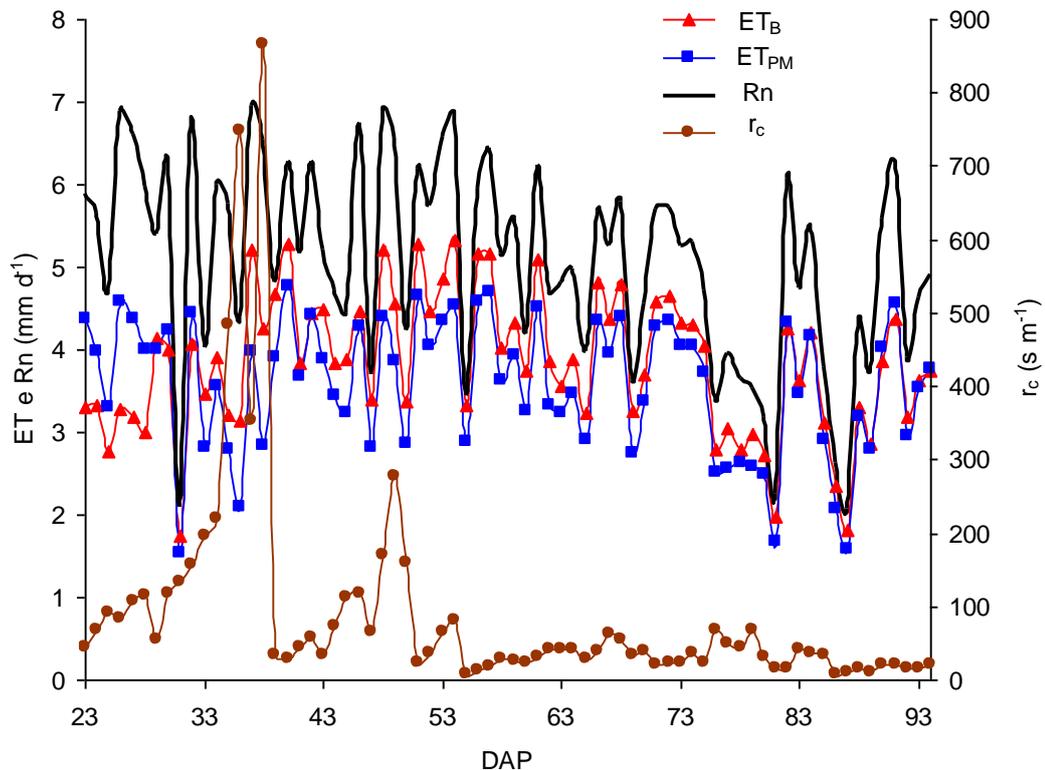


Figura 3. Evapotranspiração diária obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e pelo método de Penman-Monteith (ET_{PM}), saldo de radiação (Rn) e resistência do dossel (r_c) durante o período de 04/04/2002 a 14/06/2002 (23-94 DAP).

Na Figura 3 também são apresentados os dados diários do saldo de radiação (R_n) e da resistência do dossel (r_c) durante o período estudado, na qual os valores médios diários de R_n e r_c foram calculados utilizando-se os valores das 06:00 às 17:00 h. Os valores da R_n oscilaram entre 6,96 e 2,08 mm d^{-1} com valor médio de 5,08 mm d^{-1} , enquanto os valores de r_c oscilaram entre 865 s m^{-1} e 8,5 s m^{-1} , com valor médio de 89 s m^{-1} . É interessante notar que dias, como 07/05/2002 (56 DAP), apresentaram um elevado saldo de radiação, mesmo com precipitações elevadas. O que explica esse fato é que a maior parte da precipitação (76%) nesse dia ocorreu no período das 0:00 às 06:00 h, tendo o restante das precipitações (24%) ocorrido no período das 18:00 às 21:30 h. Quanto à resistência do dossel (r_c) verifica-se que ela seguiu as variações das condições atmosféricas e, principalmente, das condições de umidade do solo; sendo os valores mais elevados ocorrendo no período de menor conteúdo de água do solo.

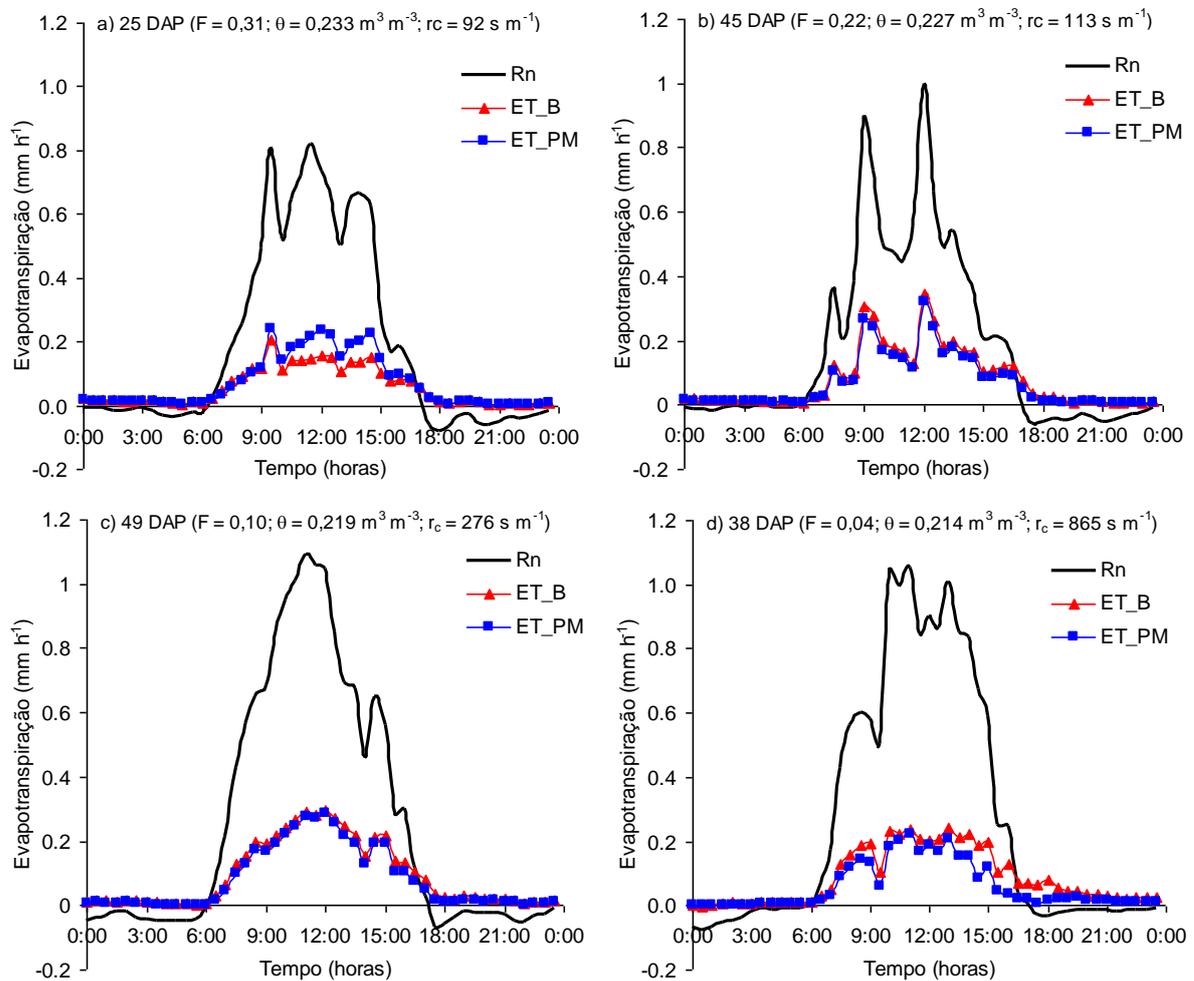


Figura 4. Evapotranspiração horária obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e pelo método de Penman-Monteith (ET_{PM}) para quatro dias representativos da fase vegetativa do feijão caupi.

Os valores de evapotranspiração horária durante quatro dias da fase vegetativa do feijão caupi, estimados pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e calculados pelo método de Penman-Monteith (ET_{PM}) são apresentados nas Figuras 4a-d.

Observa-se que aos 45 e aos 49 DAP (Figuras 4b e 4c), ocorreu dos valores de ET_{PM} serem muito próximos dos valores de ET_B , com Id de 0,9906 e 0,9922, respectivamente. Esse fato é muito importante, pois os dias 26/04/2002 e 30/04/2002, (45 e 49 DAP, respectivamente) apresentaram-se com condições atmosféricas diferentes, como pode ser deduzido dos dados do saldo de radiação (R_n). Já aos 38 DAP (Figura 4d), os valores de ET_{PM} não foram tão próximos dos valores de ET_B , apresentando um Id de 0,9379 e um SE de $0,0205 \text{ mm h}^{-1}$ ($13,77 \text{ W m}^{-2}$). Esse fato deve ter sido por causa do baixo conteúdo de água do solo ($\theta = 0,214 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), o que ocasionou um elevado valor de resistência do dossel ($r_c = 865 \text{ s m}^{-1}$) e o mais baixo valor do conteúdo de água do solo normalizado ($F = 0,04$). Aos 25 DAP (Figura 4a) ocorreu dos valores de ET_{PM} serem maiores do que os valores de ET_B , fato esse só ocorrido em onze dias de todo período estudado, se concentrando no início do período de estudo (23-29 DAP). Isso deve ter ocorrido em virtude de uma menor cobertura do solo pela cultura do feijão caupi, já que nesses dias a percentagem de cobertura do solo era da ordem de 32% e a altura da cobertura vegetal era de 0,23 m (dados não demonstrados). Nesse dia (25 DAP) o SE foi de $0,0164 \text{ mm h}^{-1}$ ou $11,16 \text{ W m}^{-2}$, mas mesmo assim apresentou uma elevada exatidão entre ET_B e ET_{PM} com um Id de 0,9552.

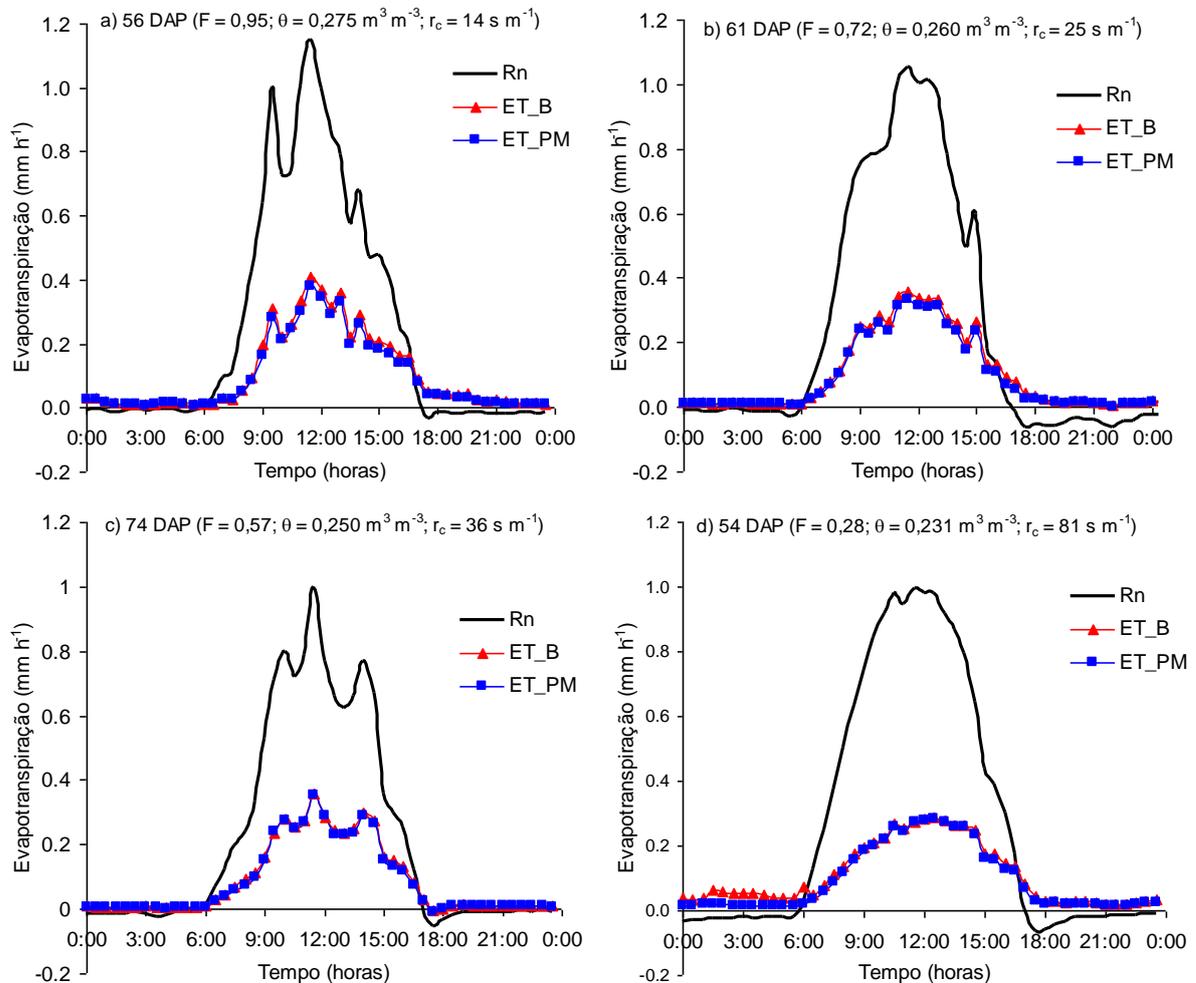


Figura 5. Evapotranspiração horária obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e pelo método de Penman-Monteith (ET_{PM}) para quatro dias representativos da fase reprodutiva do feijão caupi.

Nas Figuras 5a a 5d são apresentados os valores horários do saldo de radiação e da evapotranspiração, estimada pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e calculada pelo modelo de Penman-Monteith, com a resistência do dossel variável (ET_{PM}), durante quatro dias da fase reprodutiva. Observa-se que os valores de ET_B e ET_{PM} foram muito próximos, independentemente das condições atmosféricas e do conteúdo de água do solo.

Todos os dias apresentaram uma alta exatidão entre os valores de ET_B e ET_{PM} com Id maiores que 0,99, à exceção de 54 DAP (Figura 5d), sendo o dia 25/05/2002 (74 DAP) o que apresentou a maior exatidão, com Id de 0,9989 e SE de $0,005 \text{ mm h}^{-1}$ (Figura 5c). No dia 05/05/2002 (54 DAP) houve uma tendência dos valores de ET_B serem maiores que os de ET_{PM} durante o período de 01:00 até às 06:00 horas, contudo, esse dia ainda apresentou um Id de 0,9891.

Durante a fase reprodutiva a cultura utiliza quantidade de água bem maior nos seus processos fisiológicos que nas fases anteriores; o valor médio da razão ET_B/Rn nessa fase foi de 0,82 e da razão ET_{PM}/Rn foi de 0,74, enquanto na fase vegetativa foi de 0,71 para a razão ET_B/Rn e de 0,67 para a razão ET_{PM}/Rn ; deste modo, ocorre aumento da evapotranspiração da fase vegetativa para a fase reprodutiva, o que fica bem ilustrado neste trabalho. Por esses dados conclui-se que, nesta fase fenológica, considerando a razão ET_B/Rn , cerca de 82% do saldo de radiação foram utilizados no processo de evapotranspiração. San José et al. (2003) encontraram, durante a fase reprodutiva do feijão caupi cultivado nas condições das savanas tropicais da Venezuela, valores médios da razão $LE/(Rn-G)$ de 0,79, ou seja, 79% da energia disponível foram utilizados para o processo de evapotranspiração da cultura.

Na Figura 6 são apresentados os dados horários do saldo de radiação e da evapotranspiração estimada por meio do método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e calculada por meio do modelo de Penman-Monteith (ET_{PM}) durante um dia da fase de maturação fisiológica (6a) e de um dia da fase de senescência (6b) do feijão caupi.

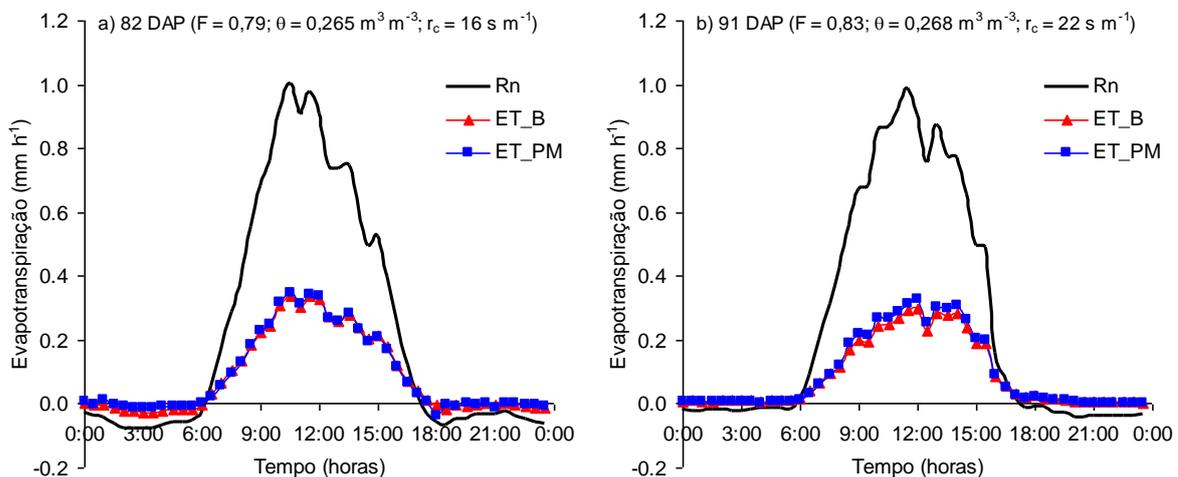


Figura 6. Evapotranspiração horária obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_B) e pelo método de Penman-Monteith (ET_{PM}) para um dia representativo (a) da fase de maturação fisiológica e (b) da fase de senescência (b) do feijão caupi.

Observa-se nessas Figuras que os valores de ET_B e ET_{PM} foram muito próximos. Aos 82 (Figura 6a) e 91 DAP (Figura 6b), os valores de Id foram de 0,9985 e 0,9967, respectivamente, ou seja, ambos apresentaram uma alta exatidão.

Vê-se, ainda, que durante a fase de maturidade fisiológica, dia 02/06/2002 (82 DAP), a evapotranspiração continua elevada, fato que ocorre tanto por causa da maior cobertura do solo pela vegetação, quanto pela quantidade de água precipitada nos dias 31/05/2002 e 01/06/2002, que totalizou 23 mm. Os valores de evapotranspiração aos 82 DAP são maiores que aos 91 DAP, pelo fato de que aos 82 DAP (Figura 6a) a cultura ainda utilizava água para os seus processos fisiológicos, enquanto aos 91 DAP (Figura 6b) ela já se encontrava em senescência, e esses valores de evapotranspiração devem ser principalmente da evaporação da água do solo.

6 CONCLUSÕES

O modelo de Penman-Monteith, com uma resistência do dossel variável proposta por Ortega-Farias (1993), pode ser usado para se estimar a evapotranspiração do feijão caupi, cultivado nas condições edafoclimáticas do Brejo Paraibano. O modelo apresentou uma elevada exatidão, para todas as fases fenológicas do feijão caupi, tanto na escala horária (Id de 0,99) quanto na diária (Id de 0,89), num amplo intervalo de condições atmosféricas e de conteúdo de água do solo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.4, p.650-662, 1989.

ALLEN, R.G. et al. Crop evapotranspiration - guidelines for predicting crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, n.56, p.1-300, 1998.

BOHM, W. **Methods of studying root systems**. Berlin: Springer, 1979. 188 p.

BRASIL. **Levantamento exploratório**: reconhecimento de solos do Estado da Paraíba. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo, Divisão de Agrologia, SUDENE, 1972. 670 p.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Reidel: Dordrecht, 1982. 299 p.

de VRIES, D.A. Thermal properties of soils. In: van WIJK, W.R. (ed.). **Physics of Plant Environment**. Amsterdam: North-Holland, 1966. p.210-233.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

JARVIS, P.G. The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Philosophical Transactions of the Royal Society London, Series B, Biological Sciences**, Londres, v.273, n.927, p.593-610, 1976.

KUSTAS, W.P. et al. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.103, n.3, p.249-264, 2000.

- LIMA, J.R.S. et al. Comparação da sonda de nêutrons e de sensores tipo TDR na medição do conteúdo de água do solo e na estimativa da evapotranspiração do feijão caupi pelo método do balanço hídrico. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, 2., 2005, Santos. **Anais...**Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 2005. 1 CD-ROOM
- MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M. **Principles of environmental physics**. 2.ed. Londres: Edward Arnold, 1990. 291 p.
- MURRAY, F. W. On the computation of saturation vapor pressure. **Journal Applied of Meteorology**, Boston, v.6, n.3, p.203-204, 1967.
- NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parameterization of land surface process for meteorological models. **Monthly Weather Review**, Washington, v.177, n.3, p.536-549, 1989.
- OLIOSO, A.; CARLSON, T.N.; BRISSON, N. Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.81, n.1-2, p.41-59, 1996.
- ORTEGA-FARIAS, S. **A comparative evaluation of the residual energy balance, Penman, and Penman-Monteith estimates of daytime variation of evapotranspiration**. 1993. 137f. PhD (Thesis), Oregon State University, Corvallis, Oregon, 1993.
- ORTEGA-FARIAS, S. et al. Estimación de la evapotranspiration real diaria de un cultivo de tomates usando la ecuación de Penman-Monteith.. **Ciencia Investigación Agraria**, Santiago, v.27, n.2, p.91-96, 2000.
- ORTEGA-FARIAS, S. et al. Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. **Irrigation Science**, Berlin, v.23, n.1, p.1-9, 2004.
- ORTEGA-FARIAS, S.; ACEVEDO, C.; FUENTES, S. Calibration of the Penman-Monteith method to estimate latent heat flux over a grass canopy. **Acta Horticulture**, Leuven, v.537, n.1, p.129-133, 1999.
- PEREZ, P. J. et al. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.97, n.3, p.141-150, 1999.
- RANA, G. et al. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.86, n.3-4, p.215-224, 1997.
- RANA, G.; KATERJI, N. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. **Theoretical and Applied Climatology**, Hamburgo, v.60, n.1-4, p.141-149, 1998.
- RANA, G.; KATERJI, N.; PERNIOLA, M. Evapotranspiration of sweet sorghum: A general model and multilocal validity in semiarid environmental conditions. **Water Resources Research**, Washington, v.37, n.12, p.3237-3246, 2001.

REEVE, M.J.; CARTER A.D. Water release characteristic. In: SMITH K.A. et al. **Soil analysis: physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991. p.111-160.

SAN JOSÉ, J.J. et al. Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L) Walp) cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.116, n.3-4, p.197-219, 2003.

TACONET, O. et al. Seasonal estimation of evaporation and stomatal conductance over a soybean field using surface IR temperatures. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.73, n.3-4, p.321-337, 1995.

TENNANT, D. A test of modified line intersects method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Danvers, v.63, n.6, p.995-1001, 1975.

WILLMOTT, C.J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.5, p.8995-9005, 1985.