

Evapotranspiração do algodoeiro estimado pelo método do balanço de energia e pelo método de Penman-Monteith

Paulo Ferreira Souza, Osvaldo Borges Pinto Jr.,
José Holanda Campelo Jr.

*Programa de Pós-Graduação em Agricultura Tropical
Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT
e-mail: osvaldo.borges@gmail.com*

Resumo

O objetivo deste trabalho foi comparar a evapotranspiração da cultura de algodão medida por balanço de energia e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (*PM*). Foram utilizados os métodos de balanço de energia, especialmente razão de Bowen e o modelo de Penman-Monteith. Os valores de saldo de radiação variaram entre 8,54 W.m^2 e 642,06 W.m^2 , com um valor médio de 251,01 W.m^2 e a resistência da cultura foi de 7,01 s.m^{-1} a 333,33 s.m^{-1} e valor médio de 81,10 s.m^{-1} . A precipitação no período de cultivo foi de 347,20 mm durante 150 dias, com média diária de aproximadamente 2,31 mm. A evapotranspiração diária foi de 0,27; 3,44; 3,50; 1,46; 1,53 e 3,02 mm.dia^{-1} durante os 52, 62, 83, 97, 110 e 125 dias após o plantio (*DAP*), respectivamente. Os valores de evapotranspiração obtidos com método da razão de Bowen (*ETB*) foram correlacionados com valores estimados pelo modelo de Penman-Monteith (*PM*), com $R^2 = 0,97$. A evapotranspiração horária obtida por *PM* foi 21% menor quando comparada àquela obtida por *ETB*.

Palavras-chave: evapotranspiração do algodão, balanço de calor, Penman Monteith.

Abstract

This work objective was compare the evapotranspiration of the cotton crop measure by the balance of energy and estimate by the Penman-Monteith (*PM*) model. Methods to calculate energy balance, mainly Bowen ratio and Penman-Monteith (*PM*) model were applied. The values of radiation varied from 8,50 W.m^2 to 642,06 W.m^2 , with average of 251,01 W.m^2 . The crop resistance was 7.01 s.m^{-1} to 333,33 s.m^{-1} , with average 81.10 s.m^{-1} . The rainfall in the growing period was 347.20 mm during 150 days with a daily average approximately 2.31 mm. The daily evapotranspiration was 0,27; 3,44; 3,50; 1,46; 1,53 and 3,02 mm.day^{-1} during the 52, 62, 83, 97,

110 and 125 days after sowing (*DAP*), respectively. The results of evapotranspiration obtained for the Bowen ratio method (*ETB*) were correlated with the results estimated by the Penman-Monteith model (*PM*), with $R^2 = 0,97$. The time of evapotranspiration verified by *PM* was 21% lower than that by *ETB*.

Keywords: Evapotranspiration of cotton, heat balance, Penman Monteith

1. Introdução

A evapotranspiração é um processo simultâneo do deslocamento da água para atmosfera, por transpiração via planta e evaporação direta do solo. O conhecimento sobre a partição dos componentes do balanço de energia proporciona, em termos de camada limite superficial, informações importantes de estimativas sobre os fluxos atmosféricos e o processo de conservação de energia em uma superfície cultivada. No caso do algodão, os cultivos são feitos em linhas, a faixa de solo exposta entre essas linhas propicia maior reflexão da radiação solar incidente sobre esta faixa e, como consequência, gera uma perda significativa no saldo de radiação pela área de cultivo. Isso ocorre, principalmente, quando as plantas ainda estão em período crítico de competição, que geralmente fica em torno de 10 a 60 *DAP*. Nesse período, a área foliar do dossel não cobre totalmente a superfície do solo, havendo muitos déficits da taxa fotossintética pelas plantas e, ao mesmo tempo, o aparecimento de ervas daninhas concorrendo pela luz. Entretanto, isso possibilita estimar, através de aparelhos medidores, a radiação que chega à superfície do solo nas entrelinhas da cultura.

Através da radiação nos dosséis, é possível estimar o consumo de água pelas plantas, segundo metodologias propostas pelos autores Tanner (1960), Villa Nova (1973), Pedro et al (1983) Nishimura et al. (1985), Bergamaschi et al. (1988), e Verma et al (1976). Para diminuir os erros sobre o balanço de radiação local, é importante correlacionar diferentes métodos de estimativas da radiação e seus efeitos na fenologia das plantas.

O método da razão de Bowen (1926), escolhido para comparar a estimativa da demanda hídrica local, envolve a partição do saldo de radiação nas densidades dos fluxos de calor latente de evapotranspiração e nas densidades de fluxo de calor sensível do ar e do solo, enquanto o modelo de Penman-Monteith (Monteith & Unsworth, 1990), além dessas características, acrescenta um parâmetro chamado *rc*, que relaciona o conteúdo de água do solo e densidade de raízes (Ortega-Farias, 1993). Em períodos com diferentes demandas atmosféricas de água, conhecimentos sobre esses métodos de estimativas de radiação e manejo de água nas culturas podem auxiliar o uso de práticas culturais, visando a aumentar a produtividade.

Este trabalho teve o objetivo de estimar os fluxos dos componen-

tes do balanço de energia pela razão de Bowen e comparar com estimativas pelo método de Penman Monteith, em uma parcela cultivada com algodão.

2. Material e métodos

Este estudo foi conduzido no período de março a junho, na área da Fazenda Experimental da FAMEV/UFMT, situada no município de Santo Antonio de Leverger, MT, nas coordenadas de 15° 47' S, e 56° 04' W, e altitude de 140 m, na microrregião da Baixada Cuiabana.

A cultura utilizada no experimento foi o algodoeiro (cultivar FMT 701), com plantio no dia 10/02/2007 e colheita no dia 10/07/2007, tendo 1 metro de espaçamento entre linhas e semeadura de 12 sementes por metro linear. Os equipamentos foram instalados dentro de uma cultura de Algodão. O monitoramento do experimento foi feito aos 52, 62, 83, 97, 110 e 125 DAP. Foi usada uma torre micrometeorológica, instalada no centro da cultivar, contendo: três termohigrográfos em três alturas diferentes (variando com a altura da cultura), três anemômetros tipo concha, um saldo radiômetro, placa de fluxo de calor no solo. A aquisição dos dados foi feita através de um coletor de dados (datalogger), modelo 21X (Campbell Scientific, Logan, UT, USA), a cada 10 min, a partir dos quais foram determinadas médias a cada 1 hora. As alturas monitoradas foram de 50, 100 e 150 cm. Os tratos culturais, adubações, controle de ervas daninhas e de pragas, foram efetuadas de acordo com recomendações técnicas para a região.

O balanço de energia foi determinado segundo a equação:

$$Rn = LE + H + G$$

A evapotranspiração da cultura (ETc) foi estimada através do método do balanço de energia baseado na Razão de Bowen, conforme expressão usada por (Rosenberg et al., 1983; Perez et al., 1999):

$$LE = \left[\frac{Rn - G}{1 + \beta} \right] \text{ e calor sensível; } H = \frac{\beta}{1 + \beta} Rn - G$$

sendo β a razão de Bowen, dada pela expressão: $\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}$

em que Rn é o saldo de radiação ($W.m^{-2}$), G fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$), LE fluxo de calor latente ($w. m^2$), H fluxo de calor sensível ($w. m^2$), γ a constante psicrométrica ($0,6635 \text{ Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$); ΔT a diferença de temperatura entre dois níveis acima do topo da cultura ($^\circ\text{C}$); Δe diferença parcial de vapor entre dois níveis acima do topo da cultura (Kpa)

A Etc, em $mm \text{ dia}^{-1}$, foi obtida ao se dividir a LE integrada a cada

60 min e acumulada durante o período em que $Rn-G > 0$, pelo calor latente de vaporização da água.

Para comparação de estimativa de evapotranspiração pelo método de Penman-Monteith, foram utilizados dados da torre coletados durante o ciclo do algodoeiro, também foram coletados: peso da matéria seca das raízes, do caule dos ramos, dos botões florais das folhas, das flores, das maçãs e dos capulhos, medidas da altura e densidade das plantas colhidas, umidade do solo em três profundidades (20, 40 e 60 cm).

A medida de índice de área foliar (IAF) das plantas foi estimada através de amostras digitalizadas de folhas retiradas de três plantas, com posterior cálculo da área com software Sigma Scan Pro 5.0, para obter uma equação de regressão previamente determinada entre essas medidas e área foliar medidas no local.

A estimativa de evapotranspiração será a equação (Monteith & Unsworth, 1990):

$$\lambda ET_{PM} = fc \frac{\Delta (Rn - G) + \frac{\rho C_p (e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)}$$

ET_{PM} evapotranspiração pelo modelo de Penman-Monteith (mm.h^{-1}); λ calor latente de vaporização (MJ Kg^{-1}); fc fator de conversão W.m^{-2} para mm.h^{-1} ($=0,0015 \text{ mm.h}^{-1}$); Δ Inclinação da curva de pressão de vapor no solo em função da temperatura ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Rn saldo de radiação (W.m^{-2}); G fluxo de calor no solo (W.m^{-2}); ρ é a densidade do ar (kg/m^3); C_p , calor específico à pressão constante ($\text{J.kg}^{-1}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$); $e_s - e_a$ déficit de pressão do vapor do ar para altura mediada (Kpa); r_a e r_c resistência aerodinâmica e do dossel (s.m^{-1}), respectivamente.

A r_a (s.m^{-1}) para condições de atmosfera neutra, Allen *et al* (1989)

$$r_a = \frac{\ln \left[\frac{z_m - d}{z_{0m}} \right] \ln \left[\frac{z_h - d}{z_{0h}} \right]}{K^2 u_2}$$

Z_m Medida da altura do vento (m); d altura do deslocamento do plano zero (m); Z_h altura medida da umidade relativa (m); K constante de Von Karman ($= 0,41$); u_2 velocidade do vento na altura z (m.s^{-1}); Z_{0m} compri-

mento da rugosidade que governa a transferência de momentum (m); Z_{0h} comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (m).

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

$$d = \frac{2}{3} h_c \quad \text{e} \quad z_{0m} = 0,123 h_c$$

O comprimento de rugosidade que governa a transferência de calor e de vapor (Z_{0h}) pode ser estimado de acordo com (Brutsaert, 1982):

$$z_{0h} = 0,1 z_{0m}$$

A inclinação (Δ) da curva de pressão de vapor em função da temperatura será a partir da equação de Allen et al (1989):

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

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

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

A pressão atual de vapor e_a é determinada pela equação psicrométrica:

$$e_a = e_{su} - \gamma (T_{BS} - T_{BU})$$

com T_{BS} Temperatura do bulbo seco ($^{\circ}\text{C.h}^{-1}$); T_{BU} Temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C.h}^{-1}$); γ coeficiente psicrométrico ($\text{Kpa}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Pressão atual de bulbo úmido e_{su} (Kpa):

$$e_{su} = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 * T_{BU}}{T_{BU} + 237,3}\right)$$

A r_c (s.m^{-1}) foi obtida segundo equação de Ortega-Farias (1993):

$$r_c = \frac{\rho C_p DPV}{\Delta (Rn - G)} F^{-1}$$

Sendo F conteúdo de água do solo normalizado (0 a 1), o valor F pode ser estimado utilizando a metodologia proposta por Noilhan e Planton (1989), na qual:

$$F = \frac{\theta_r^v - \theta_{pm}}{\theta_{cc} - \theta_{pm}}$$

A variação do F foi de 0,09 a 0,71.

O conteúdo de água no solo na zona das raízes, nas profundidades de 10-20, 20-40 e 40-60 cm, foram calculados pela média ponderada:

$$\theta_r^i = \frac{\theta_{1r1} + \theta_{2r2} + \theta_{3r3}}{r1 + r2 + r3}$$

Com θ_{1r1} , θ_{2r2} , θ_{3r3} conteúdo de água nas profundidades de 10-20, 20-40, 40-60, respectivamente, e r1, r2, e r3 porcentagens de raízes nas diferentes profundidades, e *i* período de coleta.

A determinação do conteúdo volumétrico de água nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, com metodologia descrita por Reichardt (1990).

A densidade das raízes levou em conta uma equação de regressão, relacionando tamanho de raízes e ciclo da cultura, estimada para as três profundidades do solo, segundo trabalho experimental com algodão feito por Coelho et al, (2003). A partir da equação de regressão, foi interpolado para os dias 52, 62, 83, 97, 110 e 125 DAP, os valores variaram entre 0,40 e 0,86. Também, para ajuste da equação, foi feita a correlação entre altura das plantas e densidade de raízes. A capacidade de campo (θ_{cc}) com pressão de 1/3 bar nas diferentes profundidades 0-20, 20-40 e 40-60 cm foi 0,138527, 0,149222, 0,153558 e ponto de murcha (θ_{pm}) e a 15 bar 0,084257, 0,095346, 0,092263, respectivamente, obtidas através de amostras de solo de estruturas indeformadas, utilizando a câmara de pressão de Richards (1947).

Para efeitos de padronização, trabalhou-se com as médias de CC e PMP 0,1471 e 0,0906, respectivamente.

Foram consideradas para análise de precisão as comparações entre os valores estimados pelo método de Penman-Monteith (PM), com valores observados pela razão de Bowen (ETB), utilizando índice de concordância de Wilmott (1981).

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2}}$$

em que P_i é o valor estimado e O_i é o valor observado, O é a média dos valores observados. A faixa dos valores d varia entre 0 (zero), para nenhuma concordância, e 1 para uma concordância perfeita.

Também foi levada em conta a quantificação do desempenho do

método através do coeficiente “c” de Camargo & Sentelhas (1997), a partir do coeficiente de correlação e do índice de Wilmott, como segue.

$$C=r.d$$

Valor de c	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 0,41	Péssimo

3. Resultados e discussão

A determinação da evapotranspiração na cultura foi estimada em função do método de balanço de energia e do método de Penman-Monteith, nos dias 04/04, 13/04, 04/05, 18/05 01/05, 15/06, sendo 52, 62, 83, 97, 110 e 125 dias após plantio (DAP), respectivamente.

Durante o período, ocorreu uma precipitação total de 437 mm, em 25 dias. As precipitações variaram entre 1,7mm (dia 03/03/2007) a 48 mm (dia 09/04/2007), respectivamente, aos 21 e 58 DAP.

O solo, pelas características regionais (Baixada Cuiabana), apresentou baixa capacidade de retenção de água. As amostras que forneceram maiores conteúdos de água nas profundidades de 0 a 60 cm foram coletados nos períodos que antecederam precipitações próximas aos dias de coleta.

A evapotranspiração média diária estimada entre os dois métodos foi 0,27; 3,44; 3,50; 1,46; 1,53 e 3,02 mm.dia⁻¹ durante os 52, 62, 83, 97, 110 e 125 (DAP), respectivamente.

Os valores de evapotranspiração horários foram estimados no período das 8 às 17 horas. Os valores de saldo de radiação variaram entre 8 W.m⁻² e 642 W.m⁻², com um valor médio de 251 W.m⁻² e a resistência da cultura foi de 7,01 s.m⁻¹ a 333,33 s.m⁻¹ e valor médio de 81,10 s.m⁻¹.

Na Figura 1, estão as médias horárias de evapotranspiração do algodoeiro, indicando pequena variação entre os dois métodos. Os valores entre a PM e ETB tiveram uma variação maior para ETB, de 0,031 mm.h⁻¹ a 0,673 mm.h⁻¹, em relação a PM que variou 0,0181 mm.h⁻¹ até 0,642 mm.h⁻¹, subestimando em 21% PM em relação a ETB. Foram assumidos como padrão os

valores de evapotranspiração obtidos pelo método da razão de Bowen.

Sendo assim, os dois conjuntos de dados confrontados entre si apresentaram um coeficiente de correlação (r) de 0,98, índice de Willmott (d) de 0,96. O coeficiente “ c ” foi 0,94, apresentando um “ótimo” desempenho.

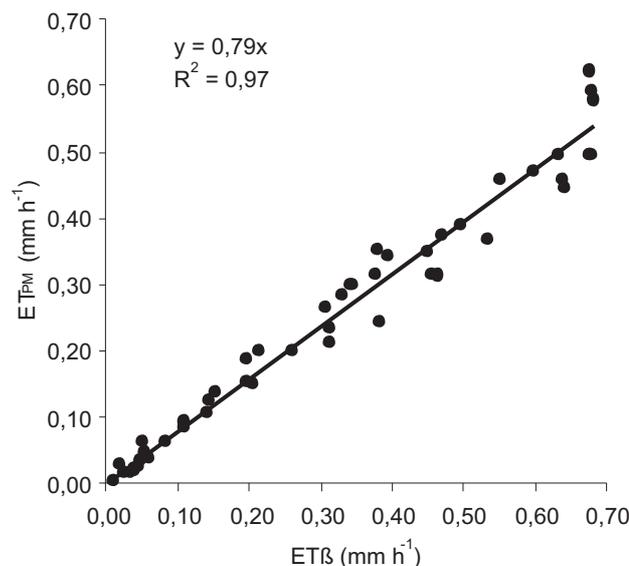


Figura 1. Comparação dos valores das médias horárias da evapotranspiração estimada pelos dois métodos.

Nas Figuras 2 e 3, para os valores de radiação transformados em evapotranspiração em mm.h⁻¹, a média dos dias medidos foi de 0,3765 mm.h⁻¹, com valores oscilando entre 0,0127 mm.h⁻¹ e 0,9631 mm.h⁻¹, nos dias 04/04 e 13/04, menor e maior valor de radiação, respectivamente.

Quanto à radiação líquida (R_n), comparados aos dois métodos, independente das condições atmosféricas e do conteúdo de água do solo, ela demonstrou uma ótima exatidão das duas equações para estimar a evapotranspiração do algodoeiro.

Os valores apontam que a R_n destinou 64% para evapotranspiração pelo método de PM, enquanto que para o método de ETB, a radiação líquida destinou 80 % da energia.

Nas Figuras 4 e 5, são apresentadas as médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro. Comparando PM e ETB com a radiação líquida (R_n), observa-se que, no dia 04/04, aos 52 DAP, houve pouca evapotranspiração, ocorrendo, com isso, valores distintos quando comparados com Bowen e Penman-Monteith.

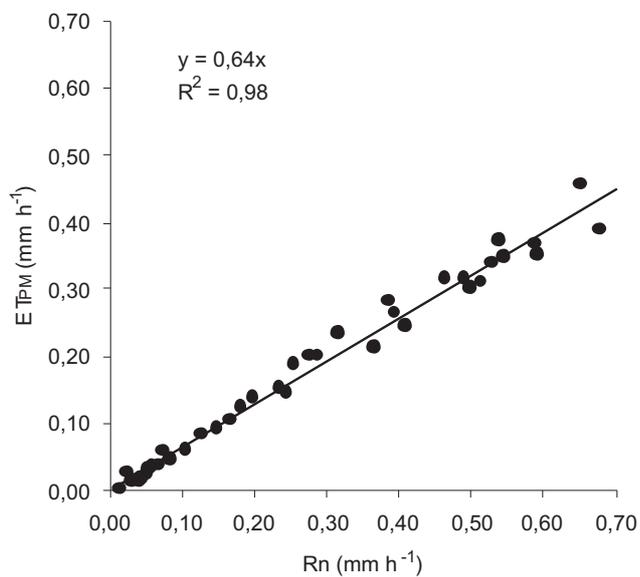


Figura 2. Razão entre a radiação líquida e o método de Penman-Monteith.

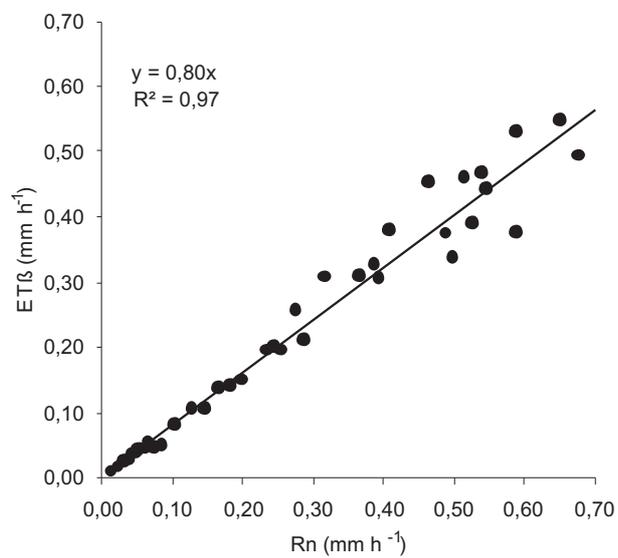


Figura 3. Razão entre a radiação líquida e o método de Bowen.

Esse período foi quando os dados demonstraram menor taxa de radiação e elevado valor médio de resistência do dossel 334 s.m^{-1} . O conteúdo de água proporcionou um $F= 0,26$, devido à pouca cobertura no solo, principalmente nas entrelinhas, favorecendo o murchamento das folhas, visto que a perda d'água transpirada pela planta sempre foi maior que a evaporada pelo solo. Existem pesquisas em culturas de algodoeiros comprovando sua tolerância a baixos teores de água no solo (Kiehl, 1979; Souza et. al., 1999).

No dia 13/04 (62 DAP), a taxa de evapotranspiração apresentou-se maior que nos outros dias, também apresentou maior saldo de radiação medido, principalmente em torno do meio dia, no entanto, as curvas de evapotranspiração, nas três situações (Rn, PM e ETB), foram semelhantes no decorrer do dia.

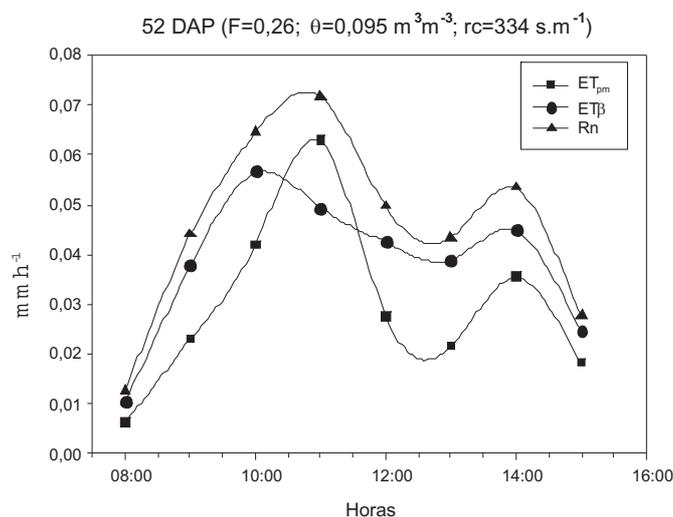


Figura 4. Médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro aos 52 DAP.

Na Figura 6, dia 04/05/07 (83 DAP), observa-se que ETB apresentou valores de evapotranspiração maiores em relação a PM, demonstrando uma diferença de $0,1301 \text{ mmh}^{-1}$, superestimando em 30% ETB em relação a PM. Isso pode ter acontecido devido ao pouco conteúdo de água no solo e mudança de temperatura próxima à superfície da cultura.

Na Figura 7, dia 18/04/07 (97 DAP), os valores ETB e PM apresentaram pouca evapotranspiração, devido à presença de nuvens na área experimental. Somente a partir das 12 horas aumentou o saldo de radiação (média $146 \text{ W.m}^{-2}\text{h}^{-1}$), proporcionando aumento na taxa de evapotranspiração.

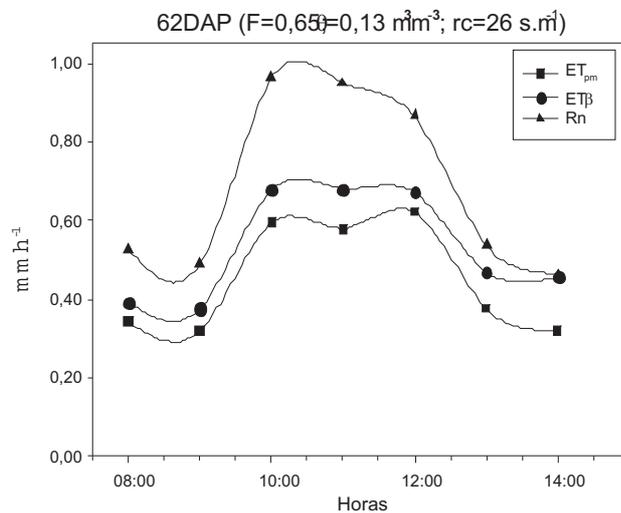


Figura 5. Médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro aos 62 DAP.

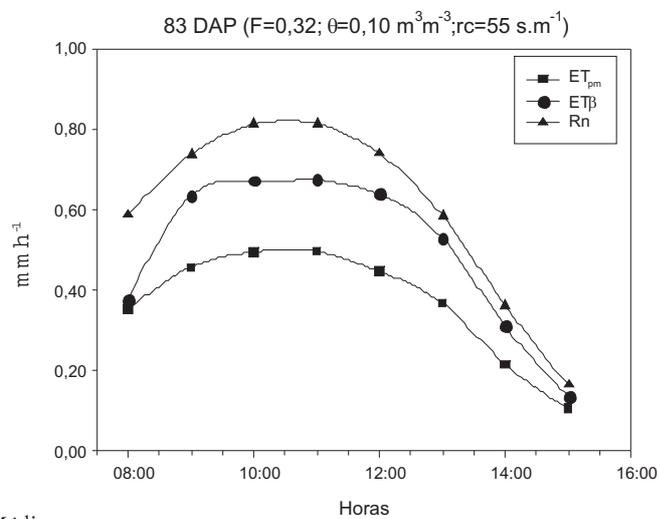


Figura 6. Médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro aos 83 DAP.

Nas Figuras 8 e 9, já na fase reprodutiva da cultura, dia 01/06 e 15/06, (110 e 125 DAP) respectivamente, os dados apresentaram um formato idêntico de inclinação. Houve uma queda na evapotranspiração da cultura

nas três situações (Rn, PM e ETB), apontando decréscimo do saldo de radiação a partir das 10 horas, devido à presença de nuvens sobre a área do experimento.

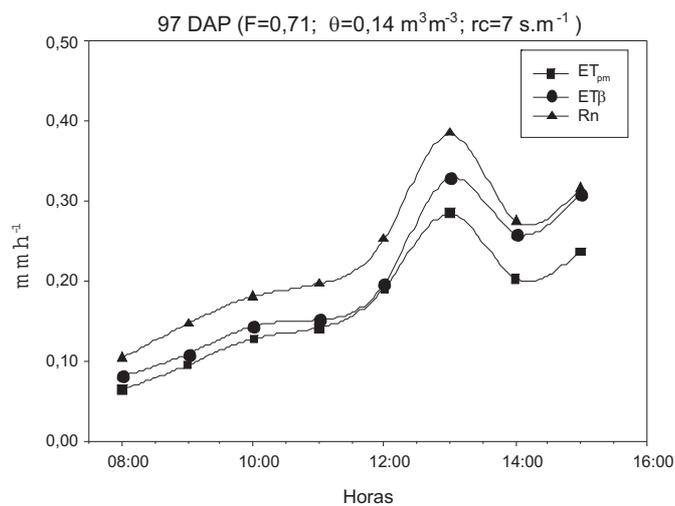


Figura 7. Médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro aos 97 DAP.

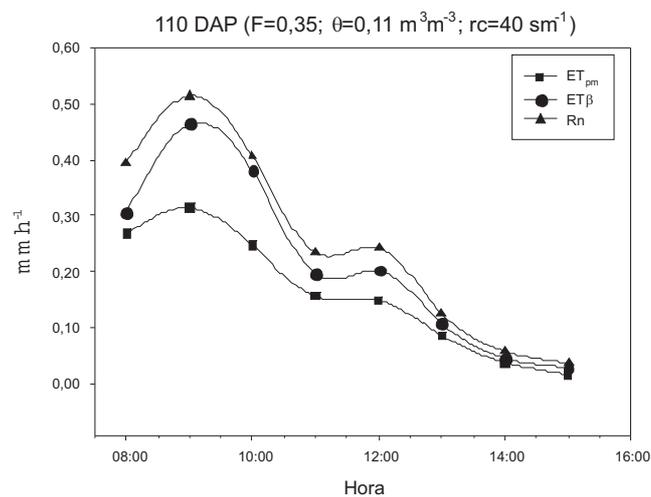


Figura 8. Médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro aos 110 DAP.

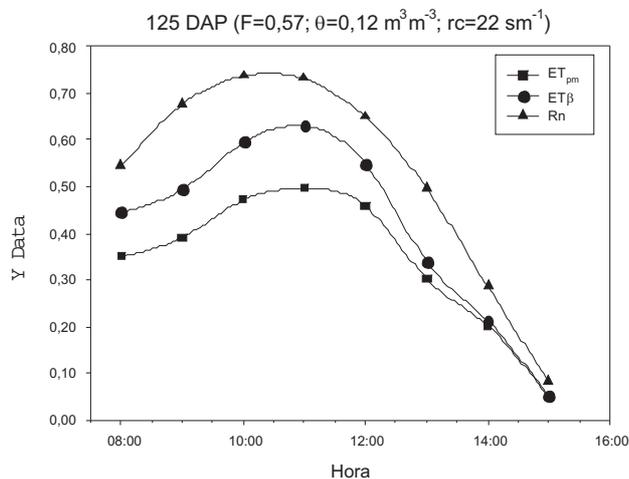


Figura 9. Médias horárias de evapotranspiração da cultura do algodoeiro aos 125 DAP.

Foi observado que o conteúdo de água no solo teve pouca influência em relação à resistência do dossel (rc), que foi afetada principalmente pelas condições atmosféricas. Quanto ao armazenamento de água no solo, é importante ressaltar que os estudos foram feitos em profundidade em que ocorrem maiores concentrações de raízes com capacidade mais absorvente. Entretanto, pode-se observar que o sistema radicular do algodoeiro explora camadas mais profundas, mas a água contida abaixo dessas regiões de amostragem pode ser absorvida pelo sistema radicular da planta até as folhas.

Os dados nos dias medidos não confirmaram condições de advecção na cultura, isto é, \hat{a} tendendo a -1 , pois o transporte de calor sensível do ar mais quente para superfícies mais frias pode tornar a equação de Bowen inválida. Alguns autores já demonstraram que o limite de confiança dessa equação é quando \hat{a} se aproxima de $-0,5$ (Pereira et al., 1997; Tanner, 1960).

A estimativa de evapotranspiração cultura pela razão de Bowen quando não sofre influência de fluxos convectivos é de grande importância, pois ajuda no ajuste de equações empíricas, como a de Penman-Monteith, e, com isso, ajuda também a estabelecer relações entre o consumo de água nas culturas (Pereira et al., 1997).

Os valores de PM e ETB subestimaram os de saldo de radiação em 36% e 20% respectivamente. Entretanto, deve-se levar em consideração que os estudos foram feitos durante o dia, na dependência de maior radia-

ção aproveitada, desprezando acréscimos de evapotranspiração em período noturno, a partir de quando a energia obtida pela radiação tem disponibilidade mínima utilizada pela cultura.

4. Conclusão

As Curvas de evapotranspiração (mm.h^{-1}) pelos métodos PM e ETB nas horas medidas, quando comparados, apresentaram mesma tendência.

Este trabalho mostrou que os dados medidos da evapotranspiração do algodoeiro podem ser calculados pela fórmula de Penman-Monteith, utilizando a resistência do dossel (r_c) de Ortega-Farias, apresentando ótima exatidão para estimar o consumo de água do algodoeiro.

5. Referências

- ALLEN, R.G., WRIGHT, J.L., BURMAN, R.S. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison v. 81 p. 650-62, 1989
- ANGUS, D.E., WATTS, P.J. Evapotranspiration-how good is the Bowen ratio method. In: SHARMA, M.L. ed. **Evapotranspiration from plant communities**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1984. p.133-150.
- BERGAMASCHI, H., OMETTO, J.C., VIEIRA, H.J. et al. Deficiência hídrica em feijoeiro II. Balanço de energia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.23, n.7, p.745-757, 1988.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v.27, p.779-787, 1926.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere**. Holanda, D. Reidel, 1982. 299 p.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- COELHO, M.B.; MATEOS, L. & VILLALOBOS, F.J. Modeling root growth and the soil-plant-atmosphere continuum of cotton crops. **Agricultural Water Management**. Spain, 60: p.99-118, 2003.

- FUCHS, M., TANNER, C.B. Error analysis of Bowen ratios measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.7, p.329-334, 1970.
- KIEHL, E. S. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 1979. 262 p.
- MONTEITH, J. L., UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**. 2ª ed., London: Edward Arnold, 291 p. 1990.
- NISHIMURA, T., ALMEIDA, A., ANDRÉ, R.G.B. et al. Balanço de energia numa cultura de milho (*Zea mays* L.). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, IV, 1985, Londrina, PR. Anais, Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1986. 344p. p.83-92.
- NOILHAN, J. PLANTON, S. **A simple parameterization of land surface process for meteorology**, Boston, v.6, n.3, p.203-204, 1967.
- 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.
- PEDRO JR., M.J., VILLA NOVA, N.A. Estimativa da resistência ao transporte de vapor d'água em uma cultura de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 18, p. 691-694, 1983.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Editora Manole Ltda. São Paulo, Brasil. 188 p, 1990.
- RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, construction and use. **Agronomy Engineering**, Madison, n. 28, p. 451-454, 1947.
- ROSENBERG, N. J., BLAD, B. L., VERMA, S. B. **Microclimate: The biological environment**. Nebraska, 1983.495p.
- SOUZA, C. C. de; OLIVEIRA, F. A. de; SILVA, I. de F. da; ANDRADE, A. P. de. Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada na cultura do algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 125-130, 1999.
- TANNER, C.B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. **Soil Science of America Proceedings**, Madison, v.24, n.1, p.1-9, 1960.
- TANNER, C.B., LEMON, E.R. Radiant energy utilized in evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.54, p.207-212, 1962.

VERMA, S.B., ROSEMBERG,N.J., BLAD,B.L. Resistance-energy balance model for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, p. 776-782, 1976.

VILLA NOVA, N.A. Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz. Piracicaba, 1973, 89p. **Tese** (Livre Docência), Escola Superior de Agronomia Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1973.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, 2, 184-194, 1981.

Submetido: 08/dezembro/2010
Aceito: 30/março/2011