

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (FAO-56) COM O SALDO DE RADIAÇÃO MEDIDO E ESTIMADO EM JABOTICABAL, SP¹

C.A. VOLPE², A.R. CUNHA³

¹ Parte integrante de Pós-doutoramento pela FAPESP (processo nº 05/59535-4), ² Prof. Adjunto Depto. de Ciências Exatas, FCAV-UNESP, Jaboticabal, SP. E-mail: cavolpe@fcav.unesp.br,, Eng. Agr. Dr. Pós-Doutorando pela FAPESP, Depto. de Ciências Exatas, FCAV-UNESP, Jaboticabal, SP. E-mail: arcunha@fca.unesp.br

Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 – Aracaju - SE

RESUMO: Estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith (FAO-56), em base diária (24 h), utilizando dados de saldo de radiação (R_n) obtidos em saldo radiômetro sem cúpula (NR-Lite, Kipp & Zonen) e R_n estimado pela diferença entre o balanço de ondas curtas e longas (FAO-56) e pela equação de regressão linear entre R_n e radiação solar global (R_g), foram avaliadas para Jaboticabal, estado de São Paulo. Essas avaliações foram realizadas entre agosto de 2005 e abril de 2007. Os resultados indicam que o R_n estimado pela FAO-56 pode substituir o R_n medido por saldo radiômetro sem cúpula (NR-Lite, Kipp & Zonen) na estimativa da ET_o em base diária (24 h).

PALAVRAS-CHAVE: estação meteorológica automática, saldo radiômetro, elementos meteorológicos

ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION BY PENMAN-MONTEITH METHOD (FAO-56) WITH MEASURED AND ESTIMATED NET RADIATION IN JABOTICABAL, SP

ABSTRACT: Daily estimates of reference evapotranspiration (ET_o) by Penman-Monteith method (FAO-56) utilizing net radiation (R_n) data obtained in domeless net radiometer (NR-Lite, Kipp & Zonen) and estimated R_n by difference between incoming net short-wave radiation and the outgoing net long-wave radiation (FAO-56), and linear regression equation with global solar radiation, were evaluated at Jaboticabal, state of São Paulo. The experimental data were collected from August 2005 to April 2007. The results indicate that estimated R_n by FAO-56 it can substitute the measured R_n by domeless net radiometer (NR-Lite, Kipp & Zonen) in the estimating of ET_o on a daily basis (24 h).

KEYWORDS: automatic weather station, net radiometer, meteorological elements

INTRODUÇÃO: O método para quantificar o consumo de água pelas culturas usa o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o), que é a taxa de transferência de água para a atmosfera de uma superfície vegetada de referência. A equação de Penman-Monteith (FAO-56) estima a evapotranspiração de uma superfície gramada com altura de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência da superfície de 70 s m⁻¹. Corresponde a uma superfície com grama, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo toda a superfície do solo e sem restrição hídrica. A evapotranspiração da cultura (ET_c) é estimada multiplicando-se a ET_o por um coeficiente de cultura (K_c) específico (ALLEN et al., 1998). Muitos estudos indicam a superioridade da equação de Penman-Monteith para estimar a ET_o em diferentes tipos de clima (JENSEN et al., 1990). GÁVILAN et al. observaram o bom desempenho da equação de Penman-Monteith com o saldo de radiação estimado pela FAO-56. Eles compararam a ET_o medida em lisímetro

e estimada pela equação de Penman-Monteith (FAO-56) usando saldo de radiação (Rn) medido por dois diferentes tipos de saldo radiômetro (com e sem cúpula de polietileno) e estimado pelos procedimentos da FAO-56. As correlações foram boas em todos os casos. O melhor desempenho do método de Penman-Monteith (FAO-56) foi observado quando Rn foi estimado pela FAO-56, com superestimativa de apenas 1% e raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 0,43 mm/dia.

A aplicação da equação de Penman-Monteith (FAO-56) requer medidas de saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento a 2 m de altura. Entretanto, existem procedimentos para as estimativas do saldo de radiação, do fluxo de calor no solo, da pressão atmosférica e do déficit de pressão de vapor d'água. Procedimentos para as estimativas desses parâmetros são descritos por diferentes autores (DOORENBOS & PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998), mas, em muitos casos, em virtude de serem equações simples e empíricas, a acurácia do método para estimar Rn afeta a determinação de ETo. A incerteza na estimativa de ETo pode ser minimizada pelas mensurações, substituindo as estimativas de variáveis e parâmetros (BATCHELOR, 1984). O Rn está incluído entres os elementos de clima que apresentam as maiores dificuldades de medidas com exatidão (BROTZGE & CRAWFORD, 2003). Instrumentos como os saldo radiômetros são os mais utilizados para a medida de Rn; são relativamente de alto custo, e não são freqüentemente usados em redes de estações meteorológicas (LLASAT & SNYDER, 1998).

Diversos trabalhos têm sido realizados para avaliar ETo medida ou estimada, em várias bases de tempo, com Rn medidos por diferentes instrumentos ou estimados por diferentes métodos (SANTIAGO et al., 2002, PEREIRA et al., 2002, GÁVILAN et al., 2006; VOLPE & OLIVEIRA, 2006).

O objetivo do presente estudo é avaliar e comparar as estimativas da ETo, em base diária (24 h), pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) usando: a) Rn medido por saldo radiômetro sem cúpula de polietileno (NR-Lite, Kipp & Zonen); b) Rn estimado pela soma do balanço de ondas curtas e longas, com as variáveis medidas (FAO-56); c) Rn estimado pela equação de regressão linear entre Rn e Rg.

MATERIAL E MÉTODOS: O estudo foi realizado na Estação Agroclimatológica da Área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas (latitude: 21° 14' 05" S; longitude: 48° 17' 09" W; e altitude: 615,01 m), localizada na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, UNESP, Campus de Jaboticabal, SP. Os dados experimentais foram coletados de agosto de 2005 a abril de 2007, em superfície com grama (*Paspalum notatum* L.) de 0,56 ha (80 x 70 m), a qual foi usada como superfície de referência para a estimativa de ETo.

Uma estação meteorológica automática controlada por um microprocessador programável CR10 (Campbell Scientific) foi instalada sobre a superfície de referência. A estação consistia de sensores para medidas da temperatura e umidade relativa do ar (CS500, Vaisala), a 1,5 m da superfície, radiação solar global (Li-Cor) e velocidade do vento a 2m da superfície (anemômetro Met-One). O saldo de radiação foi medido por um saldo radiômetro sem cúpula (NR-Lite, Kipp & Zone). As medidas do saldo de radiação foram corrigidas para os efeitos do vento de acordo com a recomendação do fabricante. O fluxo de calor no solo foi obtido por placa de fluxo (HFT3) instalado à profundidade de 3,5 cm. A pressão atmosférica e a insolação foram obtidas em estação meteorológica convencional instalada na mesma área gramada. O Rn foi estimado: a) de acordo com os procedimentos da FAO-56 (ALLEN et al., 1998), substituindo-se no balanço de ondas longas a correção da nebulosidade por $(0,1+0,9n/N)$; b) pelas equações de regressão linear com a radiação solar global (Rg) (ANDRÉ & VOLPE, 1988):

- Primavera-verão: $Rn=0,67+0,78Rg$

- Outono-inverno: $R_n = -3,85 + 0,94R_g$
Onde, R_g , em $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, é a radiação solar global.

A ETo, em base diária (24 h), estimada com R_n medido foi comparada com ETo estimada com R_n estimado através dos dois procedimentos, usando análise de regressão linear simples. Para análise de erro foram calculados: a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) e erro relativo (RE) (WILLMOTT et al., 1985).

RESULTADOS E DISCUSSÃO: Observa-se na Tabela 1 e Figura 1, através dos coeficientes de determinação, que houve boa correlação entre a ETo, em base diária, estimada com o R_n medido e a ETo estimada com R_n estimado pelos dois procedimentos utilizados.

O R^2 foi de 0,93 e a RMSE de $0,04\ mm\ d^{-1}$, para a ETo com R_n estimado por procedimentos da FAO-56, e R^2 de 0,92 e RMSE de $0,98\ mm\ d^{-1}$, para ETo com R_n estimado pela equação de regressão linear simples com R_g . O RE foi, respectivamente, - 0,93%, para R_n estimado pela FAO-56, e 22,74%, para R_n estimado pela regressão linear com R_g .

O valor médio da ETo com R_n medido foi de $4,3\ mm\ d^{-1}$, e com R_n estimado pela FAO-56 foi também de $4,3\ mm\ d^{-1}$, enquanto que a ETo com R_n estimado pela regressão linear foi de $5,2\ mm\ d^{-1}$. Dessa forma, a razão média ETo (R_n estimado) / ETo (R_n medido) foi 1,00 quando R_n foi estimado pela FAO-56, e de 1,22, quando R_n foi estimado pela regressão linear.

Portanto, quando se estima ETo com R_n estimado, tem melhor desempenho o R_n estimado pela equação da FAO-56, em comparação com o R_n estimado pela regressão linear com R_g . Praticamente, pode-se substituir o R_n medido com saldo radiômetro sem cúpula (NR-Lite, Kipp & Zonen) pelo R_n estimado pelos procedimentos da FAO-56, nas estimativas da ETo; pois, o RE encontrado foi de 0,93%. Por outro lado, não é recomendável o uso da equação de regressão com R_g na estimativa de ETo, pois o RE é cerca de 23%. Isso se explica porque a equação de regressão foi obtida há 20 anos, com R_n medido por Thermal Radiometer, modelo TCN-188, sem cúpula, com ventilação, e R_g com piranômetro Eppley de termopilha com 50 junções, modelo 8-48.

A maioria dos saldos radiômetros, geralmente, usa um sensor de termopilha coberto por uma cúpula de polietileno para eliminar a ventilação natural e reduzir a convecção térmica proveniente do corpo do radiômetro. Em virtude das desvantagens quanto à manutenção e operação que o saldo radiômetro com cúpula apresenta, foi desenvolvido o saldo radiômetro sem cúpula NR-Lite (Kipp & Zonen), no qual a cúpula é substituída por um revestimento de Teflon preto (COBOS & BAKER, 2003).

Tabela 1. Resumo da estatística para a comparação entre a ETo diária estimada por Penman-Monteith (FAO-56) com R_n medido e estimado.

Método	N	ETo c/ R_n medido FAO56 ¹ ($mm\ d^{-1}$)	ETo c/ R_n estimado <hr/> ETo c/ R_n medido	a	b	R^2	RMSE ($mm\ d^{-1}$)	RE (%)
FAO56 ²	621	4,3	1,00	-0,35	1,08	0,93	0,04	0,93
FAO56 ³	621	4,3	1,22	-0,08	0,83	0,92	0,98	22,74

Obs: N = número de observações; a e b constantes da reta de regressão ($y=a+bx$); FAO-56¹ = estimativa de ETo com R_n medido; FAO-56² = estimativa de ETo com R_n estimado pela FAO-56; FAO-56³ = estimativa de ETo com R_n estimado por regressão linear com R_g .

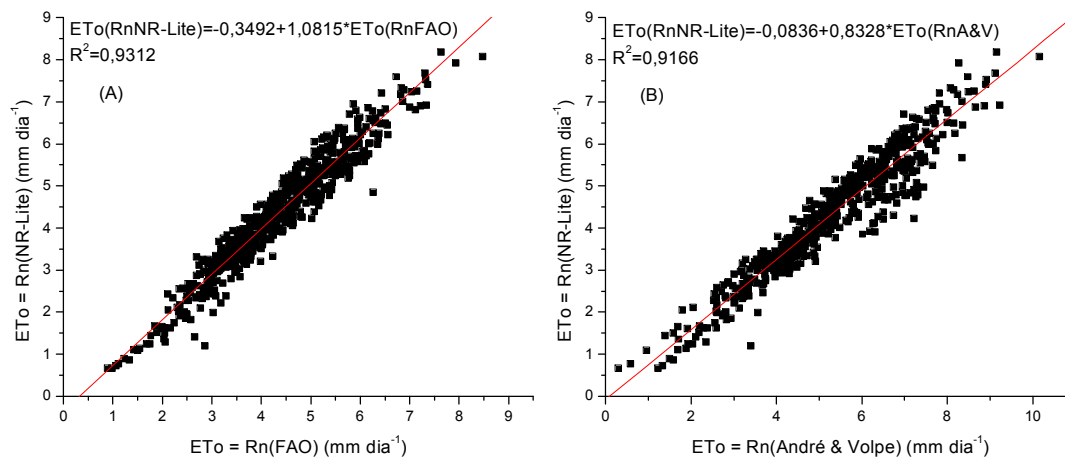


Figura 1. Regressão linear simples entre ET_0 com R_n medido e R_n estimado pela FAO-56 (A) e estimado por equação de regressão linear com R_g (B).

CONCLUSÕES: Na estimativa de ET_0 , em base diária, pela equação de Penman-Monteith (FAO-56) o R_n medido por saldo radiômetro sem cúpula (NR-Lite, Kipp & Zonen) pode ser substituído pelo R_n estimado de acordo com os procedimentos da FAO-56, com um erro relativo de aproximadamente 1%, quando a radiação solar global, o fluxo de calor no solo, a insolação, a temperatura e umidade relativa do ar, a velocidade do vento e a pressão atmosférica são medidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Roma: FAO, 1998. 300p. (Irrigation and Drainage, n.56)
- ANDRÉ, R.G.B., VOLPE, C.A. Estimativa do saldo de radiação em Jaboticabal (SP). **Revista de Geografia**, v.7, p.1-8, 1988.
- BATCHELOR, C.H. The accuracy of evapotranspiration estimated with the FAO modified Penman equation. **Irrigation Science**, v.5, p.223-233, 1984.
- BROTZGE, JA., CRAWFORD, K.C. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement systems. **Journal of Hydrometeorology**, v.4, n.160-178, 2003.
- COBOS, D.R., BAKER, J.M. Evaluation and modification of a domeless net radiometer. **Agronomy Journal**, v.95, p.177-183, 2003.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Crop water requirements.** FAO Irrigation and Drainage Paper n.24, Roma, 1977. 179p.
- GÁVILAN, P. et al. Measurement vs. Estimating net radiation: impact on Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIENCES WITH AUTOMATIC WEATHER STATION, 4. 2006, Lisboa. **CD-ROM...** 2006.
- JENSEN, M.E., BURMAN, R.D., ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements.** ASCE n.70, ASCE, New York, 1990. 332p.
- LLASAT, M.C., SNYDER, R.L. Data errors effects of net radiation na evapotranspiration estimations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.91, p.209-221, 1998.
- PEREIRA, A.R., SENTELHAS, P.C., FOLEGATTI, M.V. Substantiation of the daily FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and conventional weather stations. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p.251-257, 2002.
- SANTIAGO, A. V. et al. Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56), nas escalas mensal e decenal. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, n.1, p.57-66, 2002.

VOLPE, C.A., OLIVEIRA, A.D. Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration using data of conventional and automatic weather stations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPERIENCES WITH AUTOMATIC WEATHER STATION, 4. 2006, Lisboa. **CD-ROM...** 2006.

WILLMOTT, C. J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v. 10, n. C5, p. 8995-9005, 1985.