

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PELO
MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH (FAO-56) COM SALDO DE RADIAÇÃO
MEDIDO POR DIFERENTES SENSORES¹**

**ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA
POR PENMAN-MONTEITH (FAO-56) CON RADIACIÓN NETA
MEDIDA POR DIFERENTES SENSORES¹**

**ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION
BY PENMAN-MONTEITH METHOD (FAO-56) WITH MEASURED NET
RADIATION FOR DIFFERENT SENSORS¹**

Antonio Cunha Ribeiro Da*, Clovis Volpe Alberto e Francisco Escobedo João*****

¹Financiamento dos instrumentos utilizados para a realização do referido trabalho.
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

* Eng. Agr. Dr. Pós-Doutorando Pela FAPESP, FCAV-UNESP Depto. de Ciências Exatas, Jaboticabal, SP. E-mail: arcunha@fca.unesp.br.

** Professor. FCAV-UNESP. Jaboticabal, Adjunto Depto. de Ciências Exatas, SP. E-mail: cavolpe@fcav.unesp.br.

*** Prof. Adjunto Depto. de Recursos Naturais/Ciências Ambientais, FCA-UNESP, Botucatu, SP. E-mail: escobedo@fca.unesp.br.

RESUMEN

Se comparó estimaciones de la evapotranspiración de referencia (ET_o) por Penman-Monteith (FAO-56) utilizando radiación neta (R_n) datos obtenidos en tejen una malla sensores del radiación neta NR-Lite (Kipp y Zonen), Q-7,1 (REBS) y CNR1 (Kipp y Zonen), en el período de 28/09 a 22/11/2001 en Botucatu, UNESP, SP. Se verificaron las estimaciones de ET_o y se comparación a través de los indicadores estadísticos: coeficiente de determinación (R²) y índice de acuerdo (d). Con las constantes de calibración original el sensor NR-Lite y Q-7,1 subestimaron de una manera significativa en los período de la luz del día y nocturno, y por consiguiente ET_o también fue subestimado. Con el uso de una nueva calibración constante el sensores al que NR-Lite y Q-7,1 empezaron sobrestima de manera no significativa, respecto al sensor CNR1, podría usarse así para las medidas de balance de energía con exactitud. La estimación de ET_o diario para la ecuación de Penman-Monteith (FAO-56) obtuvo empezando de R_n medido por sensor Q-7,1 al que más se acercó de los valores encontraron de ET_o en la función de R_n medida por los sensor CNR1.

Palabras Clave: Evapotranspiración; balance de energía; radiación neta.

SUMMARY

It was compared estimates of reference evapotranspiration (ET_o) by Penman-Monteith method (FAO-56) utilizing net radiation (R_n) data obtained in net radiometer NR-Lite (Kipp and Zonen), Q-7.1 (REBS) and CNR1 (Kipp and Zonen), in the period from 09/28 to 11/22/2001 in Botucatu, UNESP, SP. The estimates of ET_o were verified and compared through the statistical indicators: determination coefficient (R²) and agreement index (d). With the constants of original calibration the sensor NR-Lite and Q-7.1 underestimated in a significant way in the daylight periods and nocturnal, and consequently ET_o was also underestimated. With the use of one new calibration constant the sensor NR-Lite and Q-7.1 started to overestimates of way no significant, in relation to sensor CNR1 (reference), could be used like this for measures of energy balance with accuracy. The estimate of daily ET_o for the equation of Penman-Monteith (FAO-56) obtained starting from R_n measured by sensor Q-7.1 it went to that more he approached of the found values of ET_o in function of R_n measured by the CNR1.

Key Words: Evapotranspiration; balance de energía; radiación neta.

RECIBIDO: agosto 30, 2007

ACEPTADO: octubre 11, 2007

INTRODUÇÃO

A aplicação da equação de Penman-Monteith (FAO-56) requer medidas de saldo de radiação (R_n), fluxo de calor no solo, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica e velocidade do vento a 2 m de altura (Allen *et al.*, 1998). O R_n está incluído entres os elementos de clima que apresentam as maiores dificuldades de medidas com exatidão (Brotzge e Crawford, 2003).

Os saldos radiômetros são os instrumentos mais utilizados para a medida de R_n , com diversos trabalhos realizados para avaliar a ETo medida e/ou estimada, em várias escalas de tempo, em função de R_n medidos por diferentes instrumentos (Gávilan *et al.*, 2006; Volpe e Oliveira, 2006).

O objetivo do presente estudo foi avaliar e comparar as estimativas da ETo , em escala diária, pelo método de Penman-Monteith (FAO-56) usando: a) R_n medido por saldo radiômetro sem cúpula de polietileno (NR-Lite, Kipp e Zonen, 2000); b) R_n medido por saldo radiômetro sem cúpula de polietileno (CNR1, Kipp e Zonen, 2000) e c) R_n medido por saldo radiômetro com cúpula de polietileno (Q-7.1, REBS).

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos na Estação de Radiometria do Departamento de Recursos Naturais da Faculdade de Ciências Agrônomicas, UNESP, Botucatu, SP (latitude: 22°51'S, longitude: 48°26'W e altitude: 786 m).

O monitoramento simultâneo dos saldos radiômetros para as estimativas de ETo foi no período de 28/09 a 22/11/2001, utilizando-se dos seguintes sensores: a) saldo radiômetro sem cúpula de polietileno - CNR1 (Kipp e Zonen, 2000), usado como referência de medida; b) saldo radiômetro sem cúpula de polietileno - NR-Lite (Kipp e Zonen); c) saldo radiômetro com cúpula de polietileno - Q-7,1 (REBS).

Utilizou-se um sensor CNR1 novo, um NR-Lite com 3 anos de uso contínuo, e um Q-7.1 com 5 anos de uso e com cúpulas de polietileno novas. Todos sensores foram instalados a 1 m de altura em superfície gramada e conectados a um "Micrologger CR23X" da Campbell Scientific com varredura a cada 5 segundos e saída dos valores médios a cada 5 minutos.

Os equipamentos utilizados neste estudo, com seus respectivos dados de elemento sensor, constante de calibração, tipo de cúpula, espectro, erro e fabricante, constam na Tabela 1.

Utilizou-se o sensor da Kipp e Zonen modelo CNR1 como padrão pela sua acuracidade alta em relação à outros saldos radiômetros ((Kipp e Zonen, 2000).

Para o cálculo da ETo foi utilizado o método de Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN *et al.*, 1998).

As verificações das estimativas da ETo foram feitas através dos seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de determinação (R^2) e índice de concordância (d), segundo Willmott *et al.* (1985).

TABELA 1. Saldos radiômetros utilizados com seus respectivos elemento sensor, constante de calibração original, cúpula, espectro e erro. Botucatu, UNESP, SP.

Saldo radiômetro/ Elemento sensor	Constante calibração (original)	Cúpula	Espectro	Erro(%)
CNR1 (Kipp&Zonen)/ Termopilha	12,25 mV/W/m ²	CM3: vidro CG3: silício	0,3-3 µm 5-50 µm	±2,5
NR-Lite (Kipp&Zonen)/ Termopilha	14,6 mV/W/m ²	Camada de teflon	0,3-30 µm	±5-10
Q-7.1 (REBS)/Termopilha	D: 9,14 W/m ² /mV N:11,43 W/m ² /mV	Polietileno de 0,25 mm	0,25-60 µm	±6 ±1

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A ETo estimada a partir do saldo NR-Lite subestimou em 12,16% em relação ao saldo referência (CNR1), enquanto que o saldo Q-7.1 subestimou em 1,24%, utilizando as constantes originais de calibração. Já quando se utilizou as constantes de calibração alterada, o NR-Lite subestimou em 0,5%, enquanto que o saldo Q-7.1 subestimou em 0,7% (Tabela 2).

TABELA 2. Valores médios da ETo diária estimada por Penman-Monteith (FAO-56) com Rn medidos por diferentes sensores com constantes de calibração original (O) e alterada (A). Botucatu, UNESP, SP.

Saldos Radiômetros (Rn)	ETo ^(O) (mm d ⁻¹)	ETo ^(A) (mm d ⁻¹)
CNR1 (Kipp & Zonen - Ref.)	4,03 ^(a)	4,03 ^(a)
NR-Lite (Kipp & Zonen)	3,54 ^(b)	4,01 ^(a)
Q-7.1 (REBS)	3,98 ^(c)	4,00 ^(a)

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre ao nível de 1% pelo teste t.

Pelas diferenças encontradas entre as medidas dos saldos radiômetros NRLite e Q-7.1, ficou demonstrado mais proximidade nas medidas de ETo proveniente do Q-7.1 em relação à referência (CNR1), quando se usou a constante de calibração original, o que nos leva a crer que o saldo Q-7.1 apresentou-se adequado para as estimativas de ETo (Tabela 3).

Com isso, surgiu a necessidade de analisar as medidas oriundas dos saldos, pois a maior contribuição para o saldo total diário é oriundo do período diurno, de alta energia, e quando analisamos o total diário de Rn, não identificamos a origem das diferenças.

Analisando por períodos, diurno e noturno, com constantes de calibração original, observamos (Tabela 4) que o NR-Lite subestimou em 18,5% o saldo de radiação diurno em relação ao sensor referência (CNR1), enquanto o Q-7.1 subestimou em 7,5%. No período noturno, o NR-Lite subestimou em 26,2% o saldo de radiação diurno, enquanto o Q-7,1 subestimou em 27,7%. No Rn total houve uma subestimativa do NR-Lite de 17,4% e de 4,5% do Q-7,1 em relação ao CNR1.

TABELA 3. Indicadores estatísticos na comparação entre a ETo diária estimada por Penman-Monteith (FAO-56) com Rn medidos por diferentes sensores com constantes de calibração original (O) e alterada (A). Botucatu, UNESP, SP.

ETo diária (Rn)	R ²	d
CNR1 x NR-Lite ^(O)	0,7278	0,9877
CNR1 x Q-7.1 ^(O)	0,9613	0,9992
CNR1 x NR-Lite ^(A)	0,9569	0,9961
CNR1 x Q-7.1 ^(A)	0,9681	0,9994

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre ao nível de 1% pelo teste t.

TABELA 4. Valores médios de Rn diurno, noturno e total obtidos por diferentes sensores com constantes de calibração original. Botucatu, UNESP, SP.

Sensores	Saldo de radiação (W m ⁻²)		
	Diurno Total		Noturno
CNR1	476,22 ^(a)	-59,79 ^(a)	416,43 ^(a)
NR-Lite	388,07 ^(b)	-44,10 ^(b)	343,97 ^(b)
Q-7,1	440,73 ^(c)	-43,20 ^(c)	397,53 ^(c)

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre ao nível de 1% pelo teste t.

Isso indica que o sensor Q-7,1 apresentou-se mais acurado em relação ao NR-Lite no período diurno e no total diário, sendo que apesar dos saldos NR-Lite e Q-7,1 subestimarem no período noturno, isso não é significativo em função do peso maior ser dado ao período diurno que é de alta energia.

Após a calibração dos saldos NR-Lite e Q-7.1, observou-se que não houveram diferenças significativas nos períodos diurno e noturno, e também no total diário (Tabela 5).

TABELA 5. Valores médios de Rn diurno, noturno e total obtidos por diferentes sensores com constantes de calibração alterada (diurna e noturna). Botucatu, UNESP, SP.

Sensores	Saldo de radiação (W m ⁻²)		
	Diurno Total		Noturno
CNR1	476,22 ^(a)	-59,79 ^(a)	416,43 ^(a)
NR-Lite	476,52 ^(a)	-59,73 ^(a)	416,79 ^(a)
Q-7,1	476,41 ^(a)	-59,71 ^(a)	416,70 ^(a)

^(a) Médias seguidas da mesma letra não diferem entre ao nível de 1% pelo teste t.

CONCLUSÕES

- A estimativa da ETo diária pela equação de Penman-Monteith (FAO-56) obtida a partir do Rn medido por sensor REBS Q-7.1, com 5 anos de uso contínuo, com cúpulas novas e constante de calibração original, foi a que mais se aproximou dos valores encontrados de ETo em função do Rn medido pelo CNR1, usado como referência. Após a recalibração dos sensores NR-Lite e Q-7,1 as medidas de ambos ficaram mais adequadas, melhorando ainda mais as medidas do Q-7,1.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R. G. *et al.* 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma: FAO, 300p. (Irrigation and Drainage, n.56).
- Brotzge, J. A. and K. C. Crawford. 2003. Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and Bowen ratio measurement systems. *Journal of Hydrometeorology*, v.4, n.160-178.
- Gávilan, P. *et al.* 2006. Measurement vs. Estimating net radiation: impact on Penman-Monteith reference evapotranspiration estimates. **In:** International Conference On Experiences With Automatic Weather Station, 4. Lisboa. CD-Rom.

Kipp and Zonen. 2000. Instruction manual CNR1 net-radiometer. Delft Holand, 42p.

Volpe, C. A. and A. D. Oliveira. 2006. 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...

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