

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA,  
POR PENMAN-MONTEITH, COM DADOS DE ESTAÇÃO METEOROLÓGICA  
CONVENCIONAL E AUTOMÁTICA**

**Paulo Cesar SENTELHAS<sup>1</sup>, Francisco Adriano de Carvalho PEREIRA<sup>2</sup>, Antonio Roberto PEREIRA<sup>3,5</sup>, Marcos Vinícius FOLEGATTI<sup>4,5</sup>, Nilson Augusto VILLA NOVA<sup>3,5</sup>**

**RESUMO**

Foram avaliados os efeitos da utilização de dados meteorológicos obtidos em estações convencional (EMC) e automática (EMA) na estimativa diária da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), pelo método de Penman-Monteith - padrão FAO, para fins operacionais. Os resultados mostraram haver tendência de melhores estimativas da ET<sub>o</sub> com dados da EMA em relação à EMC, sendo os erros médios absolutos da ordem de 0,49 e 0,96 mm.d<sup>-1</sup>, respectivamente, quando comparados aos valores de ET<sub>o</sub> obtidos em lisímetro de pesagem. As estimativas da radiação líquida e da velocidade do vento a 2m, na EMC, foram as principais fontes de discrepância na ET<sub>o</sub> calculada com dados das duas estações meteorológicas. Observou-se tendência do método de Penman-Monteith superestimar em 14% a ET<sub>o</sub>, no período úmido, e de subestimá-la em 10%, no período seco.

**PALAVRAS-CHAVE:** saldo de radiação, manejo da irrigação, lisímetro.

**INTRODUÇÃO**

Dentre os vários métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), na escala diária, a FAO adotou o de Penman-Monteith como padrão (Smith, 1991), devido aos excelentes resultados que apresentou em várias partes do mundo (Allen et al., 1989), embora seu uso exija informações meteorológicas nem sempre disponíveis, limitando-o principalmente a projetos de pesquisas (Pereira et al., 1997).

A evolução tecnológica das estações meteorológicas automáticas, e a sua popularização atual, têm facilitado a aquisição e a organização dos dados, e o uso desse método (Tanner, 1990).

---

<sup>1</sup> Dr., Professor Doutor. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP. C.P. 9, 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: pccsentel@carpa.ciagri.usp.br.

<sup>2</sup> Dr., Professor Assistente II. Departamento de Engenharia Agrícola, UFBA, Cruz das Almas, BA.

<sup>3</sup> Dr., Professor Associado. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP.

<sup>4</sup> Dr., Professor Associado. Departamento de Engenharia Rural, ESALQ/USP.

Exemplo é apresentado por Meyer & Hubbard (1992) para os Estados Unidos e Canadá, onde redes de estações automáticas operam com o objetivo de coletar dados necessários ao monitoramento da irrigação, de modo a torná-la mais eficiente.

Apesar das estações automáticas fornecerem dados com melhor caracterização das condições meteorológicas, em razão da aquisição contínua dos dados, elas nem sempre são disponíveis, havendo necessidade de utilização de dados meteorológicos provenientes de estações convencionais com menor representatividade, especialmente das condições médias.

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da utilização de dados provenientes de uma estação convencional e de outra automática, na estimativa da ETo pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados provenientes de dois tipos de estação meteorológica: uma convencional (EMC), instalada no Posto Agrometeorológico; e outra automática (EMA), instalada na Fazenda Areão, na ESALQ/USP, Piracicaba, SP (Lat.: 22°42'S, Long.: 47°38'W, Alt.: 546m), com aproximadamente 2km entre elas, ocupando a mesma cota de altitude. Na área da EMA (35 x 90m) também havia um lisímetro de pesagem, com célula de carga (modelo LCCA-2K da Omega Engineering), constituído de um tanque de cimento-amianto (0,65m de profundidade; 1,20m de comprimento, e 0,85m de largura), cultivado com grama em crescimento ativo. As medidas de ETo no lisímetro e os dados da EMA foram coletadas por um sistema de aquisição de dados (Campbell Scientific, modelo CR10), com leitura a cada segundo e médias a cada 30 min. No caso da EMC, os valores foram observados e cotados manualmente de diagramas do higrógrafo, anemógrafo e heliógrafo. Os elementos observados na EMC foram: temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR), insolação (n), e velocidade do vento a 10m ( $U_{10m}$ ), e na EMA foram: temperatura (T) e umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2m ( $U_{2m}$ ), e saldo de radiação (Rn).

Dados das duas estações foram utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo, mm.d<sup>-1</sup>), pelo método de Penman-Monteith (Smith, 1991):

$$ETo = \frac{s}{(s + g^*)} \frac{(Rn - G)}{I} + \frac{g}{(s + g^*)} \frac{900U_{2m}\Delta e}{(T + 275)}$$

em que: s é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura média do ar, em kPa.°C<sup>-1</sup>; Rn é a radiação líquida, em MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>; G é o fluxo de calor no solo, em MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, sendo considerado igual a zero tanto na EMC como na EMA;  $\lambda = 2,45 \text{ MJ.kg}^{-1}$  é o calor latente de

---

<sup>5</sup> Bolsista do CNPq.

evaporação;  $\gamma^*$  é o coeficiente psicrométrico modificado, em  $\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ;  $\gamma = 0,0622 \text{ kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$  é o coeficiente psicrométrico; T é a temperatura média do ar, em  $^\circ\text{C}$ ;  $U_{2m}$  é a velocidade do vento a 2m, em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $\Delta e$  é o déficit de pressão de vapor, em kPa; e  $e_s$  é a pressão saturante de vapor à temperatura T, em kPa.

No caso da EMC, os valores de  $R_n$  foram estimados pelo balanço global de radiação (BGR), adotando-se o albedo da superfície gramada ( $r = 0,23$ ) sugerido por Smith (1991). A radiação solar global ( $Q_g$ ) foi estimada a partir da equação de Angström, com os coeficientes  $a = 0,25$  e  $b = 0,50$  determinados para Piracicaba (Ometto, 1981). O balanço de ondas longas foi estimado pela equação de Brunt, como sugerido por Smith (1991).

No caso da velocidade do vento, que na EMC é obtida a 10m e no método de Penman-Monteith é requerida a 2m, utilizou-se a conversão proposta por Smith (1991) para a cobertura padrão, como segue:  $U_{2m} = 0,748 U_{10m}$ , em que U é a velocidade média diária do vento, em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . O período analisado foi entre dezembro de 1995 e dezembro de 1996, em que selecionou-se 127 eventos, correspondentes às medidas de ETo no lisímetro. Valores medidos e estimados de ETo foram comparados através da análise de regressão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1a apresenta a relação entre ETo estimada a partir da EMC e medida em lisímetro. Verifica-se, pelo  $r^2 = 0,52$ , que houve elevada dispersão dos pontos e subestimativa de 20%, em média. Resultados semelhantes são relatados por Sedyama (1996). A dispersão dos pontos mostra que os desvios das estimativas variaram sistematicamente, chegando a um máximo de 50%,  $\pm 2,1 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , com erro médio absoluto de  $0,94 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  (Figura 1b).

A mesma relação é observada para as estimativas realizadas com dados da EMA (Figura 2a). Nota-se que tanto a precisão ( $r^2 = 0,75$ ) como a exatidão das estimativas ( $b = 0,9541$ ) foram maiores, mostrando a boa concordância entre os valores estimados e medidos de ETo. Isso é melhor visualizado na Figura 2b, em que se observa redução nos desvios relativos, no erro máximo igual a  $1,4 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ , e no erro médio absoluto de  $0,49 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ . A Figura 3a mostra a relação entre a ETo estimada com dados das duas estações meteorológicas, em que se verifica que, apesar da boa concordância existente, a ETo estimada com dados da EMA foi, em média, cerca de 18% maior que a ETo estimada com dados da EMC. Os desvios atingiram valores máximos de  $1,5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  (39%) e o erro médio absoluto  $0,68 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$  (Figura 3b). Essas diferenças são consideráveis quando se visa o manejo da irrigação.

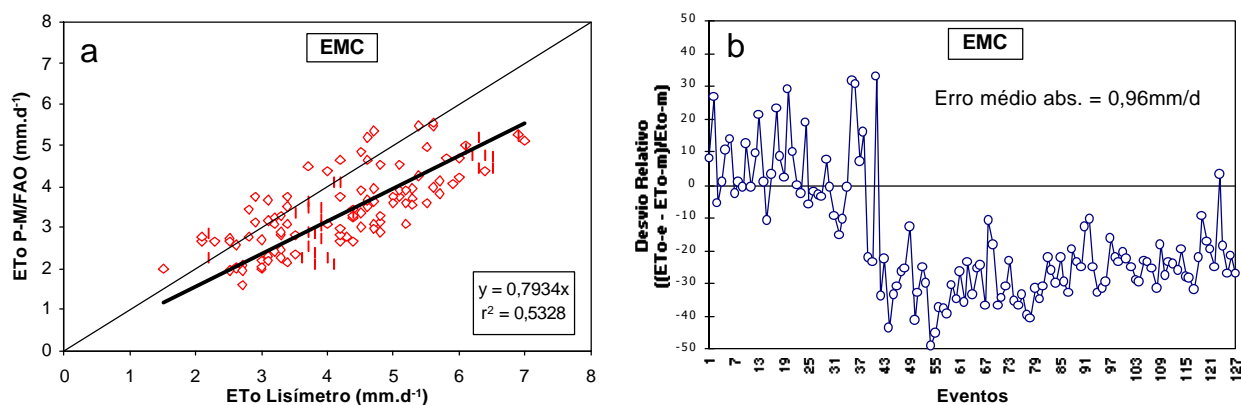


Figura 1. Relação entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO, com dados da EMC e medida em lisímetro (a), e desvio relativo (%) da ETo (b).

Analisando-se separadamente os períodos úmido e seco, observa-se tanto para a ETo estimada com dados da EMC (Figura 4a) como da EMA (Figura 4b), diferentes tendências. Em média, para o período úmido, no qual foram melhor satisfeitas as condições de contorno para minimizar a advecção, houve superestimativa da ordem de 2,8%, para a EMC e de 14% com dados da EMA, fato que tem sido observado com esse método em vários locais (Sedyama, 1996). Essa superestimativa é, basicamente, provocada pela função que descreve a relação entre as resistências da cobertura e aerodinâmica à transferência de vapor, que para valores de  $U_{2m}$  acima de  $1,1\text{m.s}^{-1}$  é subestimada grosseiramente (Pereira et al., 1995).

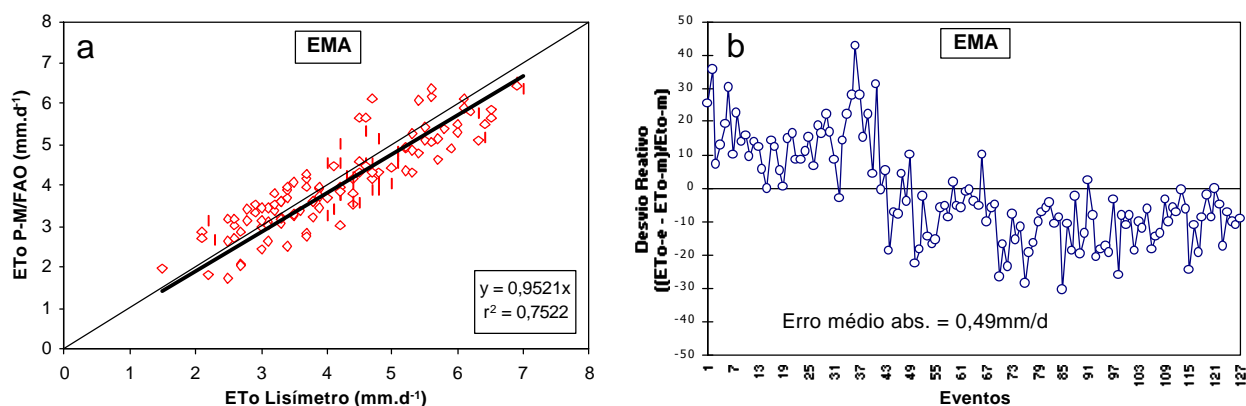


Figura 2. Relação entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO, com dados da EMA e medida em lisímetro (a), e desvio relativo (%) da ETo (b).

No período seco, a tendência foi de subestimativa da ordem de 27%, para a EMC, e 10%, para a EMA. Resultados semelhantes são apresentados por Stanhill (1961), que também observou subestimativa da ordem de 4%, quando aplicou o método de Penman em condições de clima árido. Tal fato, esta associado às condições de contorno exigidas para que a ETo ocorra, sendo o tamanho

da área tampão extremamente importante neste contexto, haja visto que a advecção de calor sensível contribui significativamente para o aumento da evapotranspiração medida, que em período secos deixa de ser de referência e passa a ser denominada de oásis (Pereira et al., 1997).

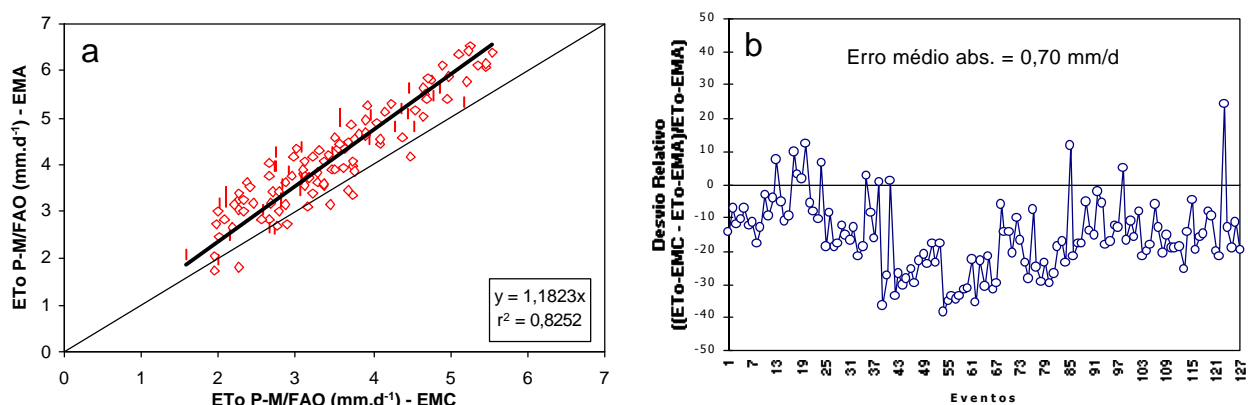


Figura 3. Relação entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, padrão FAO, com dados da EMC e da EMA (a) e desvio relativo (%) da ETo (b).

As discrepâncias observadas nas estimativas de ETo utilizando-se dados da EMC e da EMA, se justificam devido, especialmente, às diferenças nas variáveis meteorológicas obtidas pelas duas estações. De acordo com Sentelhas et al. (1997), ao se comparar os dados de uma EMC aos de uma EMA, as maiores discrepâncias foram observadas, principalmente, na temperatura média do ar, na umidade relativa média do ar, e na radiação solar global, devido à precisão dos sensores e à frequência de amostragem no cálculo das médias. As variações nesses elementos, fundamentais à utilização do método de Penman-Monteith, proporcionam diferenças nos valores estimados de ETo, como observa-se na Figura 3. As diferenças relatadas por Sentelhas et al. (1997) também foram aqui observadas, como mostra a Figura 5. Essas diferenças foram mais pronunciadas nos elementos estimados, caso da  $R_n$ , com  $b = 1,23$ ,  $r^2 = 0,66$ , e da  $U_{2m}$ , com  $b = 1,04$ ,  $r^2 = 0,57$ . No caso da T e UR médias, as discrepâncias foram menores, mostrando não haver grande influência desses elementos nas diferenças encontradas nas estimativas de ETo, com dados das duas estações meteorológicas. Para a T média do ar o valor de b foi de 0,97, o  $r^2$  foi de 0,97, e para a UR média esses valores foram 0,99 e 0,81, mostrando-se semelhantes aos resultados encontrados por Sentelhas et al. (1997).

Esses resultados indicam melhores estimativas da ETo quando da utilização de dados da EMA em relação à EMC, o que se deve, à necessidade de estimar  $R_n$  e  $U_{2m}$  na EMC, tornando-se as principais fontes de erro na estimativa da ETo por Penman-Monteith, com dados da EMC.

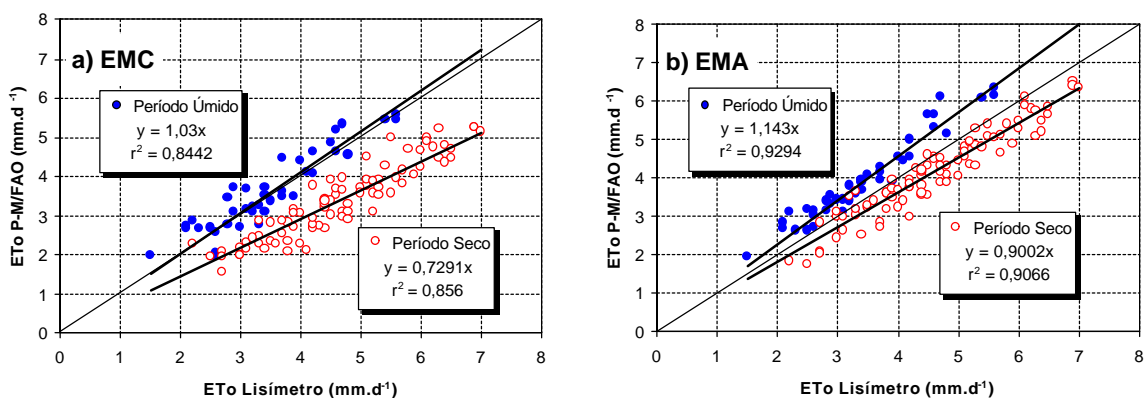


Figura 4. Relação entre a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, com dados da EMC (a) e EMA (b), e medida em lisímetro, para período úmido e seco.

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que:

- a ETo é melhor estimada por Penman-Monteith, utilizando-se dados da EMA;
- a diferença observada entre a ETo estimada com dados da EMA em relação à estimada com dados da EMC é da ordem de 18%;
- as principais fontes de discrepância entre a ETo estimada com dados da EMC e da EMA são as estimativas da  $R_n$  e da  $U_{2m}$  na EMC;
- considerando-se que os dados meteorológicos obtidos pela EMA refletem melhor a condição do ambiente, observou-se que o método de Penman-Monteith superestimou a ETo em 14% no período úmido e a subestimou-a em 10% no período seco, o que se deve a fatores como a função que descreve a relação entre as resistências da cobertura e aerodinâmica à transferência de vapor, no período úmido, e a dimensão da área tampão para minimizar a advecção, no período seco.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, p.650-662, 1989.
- MEYER, S.J.; HUBBARD, K.G. Nonfederal automated weather stations and networks in the United States and Canada: a preliminary survey. **Bulletin American Meteorological Society**, v.73, n.4, p.449-457, 1992.

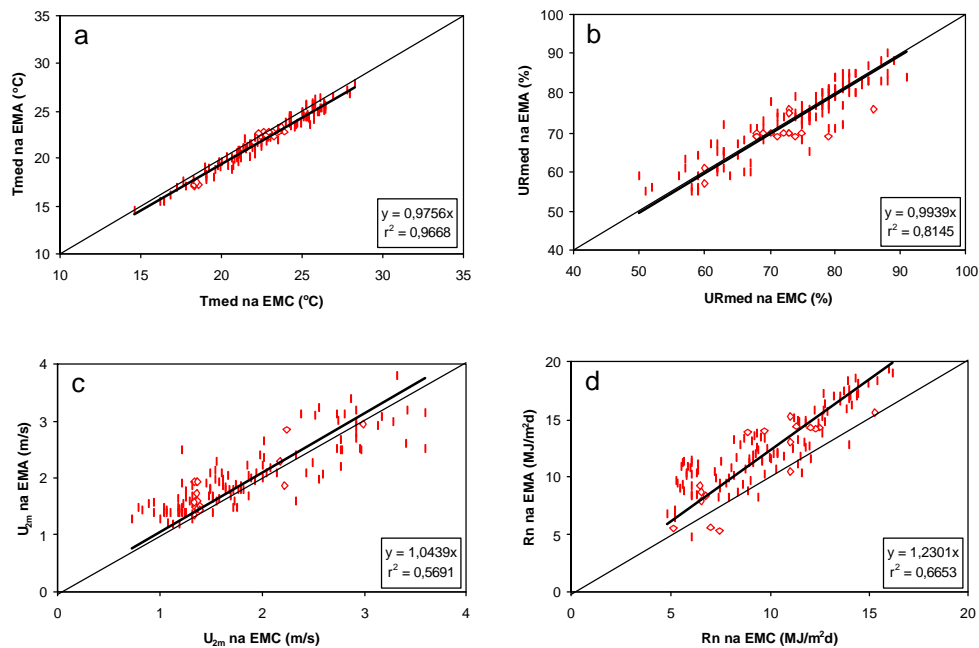


Figura 5. Relação entre os elementos meteorológicos observados na EMC e na EMA, na escala diária: a) temperatura média do ar; b) umidade relativa média do ar; c) velocidade média do vento a 2m; d) radiação líquida.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres. 1981. 440p.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.S.; BARBIERI, V. A model for the class A pan coefficient. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam v.76, p.75-82, 1995.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ. 1997. 183p.

SEDIYAMA, G.C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.i-xii, 1996.

SENTELHAS, P.C.; MORAES, S.O.; PIEDADE, S.M.S et al.. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.215-221, 1997.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO. 1991. 45p.

STANHILL, G. A comparison of methods of calculating potential evapotranspiration from climatic data. **Israel Journal of Agricultural Research**, v.11, n.3-4, p.159-171, 1961.

TANNER, B.D. Automated weather stations. **Remote Sensing Reviews**, v.51, p.73-98, 1990.