

# **AVALIAÇÃO DE DOIS TIPOS DE EVAPORÍMETROS NA ESTIMATIVA DA DEMANDA EVAPORATIVA DO AR (ET) NO INTERIOR DE CASA-DE-VEGETAÇÃO, EM LAVRAS – MG**

**ADÃO WAGNER PÊGO EVANGELISTA<sup>1</sup>  
GERALDO MAGELA PEREIRA<sup>2</sup>**

**RESUMO** – No interior de uma casa-de-vegetação, em Lavras, MG, conduziu-se um experimento, objetivando-se avaliar a demanda evaporativa do ar (ET) estimada pelos métodos do tanque Classe A e do atmômetro modificado da Soilcontrol, modelo JR 120, com a estimada pelo método de Penman-Monteith. Pelos resultados verifica-se que os métodos do tanque Classe A e do atmômetro

modificado obtiveram boa correlação com o método de Penman-Monteith para períodos diários, com valores de "r" de 0,94 e 0,97, respectivamente, e ainda que os dois tipos de evaporímetros apresentaram, em média, valores maiores de ET em relação ao método de Penman-Monteith.

**TERMOS PARA INDEXAÇÃO:** Manejo de água, ambiente protegido.

## **DETERMINATION OF EVAPORATIVE DEMAND OF THE AIR (ET) UNDER GREENHOUSE CONDITIONS BY USING TWO TYPES OF EVAPORIMETERS, IN LAVRAS - MG**

**ABSTRACT** – An experiment was carried out under greenhouse conditions in Lavras, MG, aiming at evaluating the evaporative demand of the air (ET), estimated by of Class A pan and modified atmometer of Soilcontrol model JR 120 the methods, using the Penman-Monteith methodology. The results show that

the methods of the Class A pan and the modified atmometer showed a good correlation with the method of Penman-Monteith for diary periods, showing "r" values of 0.94 and 0.97, respectively, and yet the two types of evaporimeters presented higher values of  $ET_0$  on the average when compared to Penman-Monteith method.

**INDEX TERMS:** Water management, greenhouse.

### **INTRODUÇÃO**

O teor de água na planta é, provavelmente, o fator mais importante a ser controlado, com o objetivo de maximizar a produção e a qualidade dos produtos agrícolas. Em plantas cultivadas em casa-de-vegetação, é possível controlar não somente o suprimento de água, mas também o seu consumo, por meio de sistemas de controle ambiental, podendo-se alterar os parâmetros atmosféricos responsáveis pela transpiração das plantas, como a umidade relativa, a temperatura do ar e a radiação solar global.

As necessidades hídricas das plantas cultivadas em casa-de-vegetação continuam sendo objeto de estudo, em razão de ter o microclima em ambiente protegido características próprias, principalmente no que diz respeito ao perfil de velocidade do ar acima da cultura, ní-

vel de radiação solar, concentração de vapor d'água e temperatura. Portanto, nesse ambiente, é importante avaliar o desempenho dos modelos para a estimativa da evapotranspiração.

O método de Penman-Monteith combina o método do balanço de energia com um termo aerodinâmico. Por apresentar resultados consistentes, o modelo vem sendo preferencialmente utilizado para a estimativa da demanda evaporativa do ar no interior de casa-de-vegetação. Nesse método, em casas-de-vegetação, em razão de o perfil vertical de velocidade do vento não assumir a forma logarítmica, a resistência aerodinâmica ao processo de difusão do calor sensível é estimada a partir de equações de transferência de calor e massa por convecção (ZOLNIER, 1999).

1. Doutorando em Engenharia Agrícola - Área de concentração em Irrigação e Drenagem da Universidade Federal de Viçosa - UFV, 36.570.000, Viçosa, MG. awpego@alunos.ufv.br.

2. Engenheiro Agrícola, D.Sc., Professor Adjunto, Departamento de Engenharia da UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS/UFLA, Caixa Postal 37, 37200-000 – Lavras, MG.

A estimativa da ET pode ser feita por atmômetros, instrumentos que têm por finalidade a determinação da demanda evaporativa do ar. São vários os tipos existentes, entre os quais se ressalta o desenvolvido por Altenhofen (1985), que consiste em uma cápsula porosa recoberta com um produto especial de cor verde, interligada a um reservatório de água destilada por um tubo de sucção. Pereira (1998), estudando o desempenho do atmômetro da SEEI, verificou que esse aparelho estima satisfatoriamente a ET. Outro equipamento bastante utilizado para determinação indireta da demanda evaporativa do ar é o tanque Classe A, em que a ET é determinada multiplicando-se a evaporação do tanque por um coeficiente de correção (coeficiente do tanque, “ $K_p$ ”) a ser determinado para as condições locais, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977).

Prados (1986), avaliando vários métodos de determinação da ET no interior de casa-de-vegetação, concluiu que o método do tanque Classe A com coeficiente do tanque ( $K_p$ ) igual a 1 (um) estima melhor a ET. Lopes Filho (2002), avaliando a evaporação ocorrida em três tanques evaporimétricos (tanque Classe A, minitanque metálico e minitanque de plástico) no interior de casa-de-vegetação, com o objetivo de estimar a demanda evaporativa do ar, obteve para os meses de fevereiro, março, abril e maio valores de coeficiente do tanque Classe A ( $K_p$ ) de 0,78, 0,71, 0,57 e 0,47, respectivamente.

Assim sendo, objetivou-se com o presente trabalho avaliar os métodos do tanque Classe A e do atmômetro da Soilcontrol, na estimativa da demanda evaporativa do ar (ET) no interior de casa-de-vegetação, comparando-se os resultados com os obtidos pelo método de Penman-Monteith.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Setor de Oleicultura da Universidade Federal de Lavras, UFLA, situada na região sul do Estado de Minas Gerais, Brasil, a 21° 14' latitude sul e 45° de longitude oeste, a uma altitude média de 910 m. A temperatura média diária anual do ar é de 19,3°C e o total anual de precipitação pluvial é de 1.530 mm (BRASIL, 1992).

O experimento foi desenvolvido no período de 1º de fevereiro a 31 de maio de 1999, em casa-de-vegetação tipo “capela”, construída com estrutura de madeira com dimensões de 10 x 35 m, coberta por um filme de polietileno transparente de baixa densidade (PEBD) e espessura de 0,15 mm.

Os parâmetros atmosféricos no interior da casa-de-vegetação foram obtidos por meio de uma estação agrometeorológica automática portátil da Elle International, modelo MM 900, equipada com sensores de determinação da velocidade do vento, radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar.

A evaporação foi avaliada por meio de um tanque Classe A (TCA) e a demanda evaporativa do ar, por meio da média entre três atmômetros. O tanque Classe A utilizado foi o recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Os coeficientes de tanque ( $K_p$ ) utilizados durante o experimento, foram os recomendados por Prados (1986),  $K_p = 1,0$  e os apresentados por Lopes Filho (2002) para o interior de casa-de-vegetação. Por fim, o atmômetro utilizado no experimento foi o da Soilcontrol, modelo JR-120 (Figura 1). Trata-se de um evaporímetro portátil tipo Jones/Rothwell aperfeiçoado, cuja superfície evaporante é uma cápsula de cerâmica com microporosidade especial, recoberta com um produto de cor verde, para promover a absorção da faixa de ondas curtas da radiação solar. O local onde os evaporímetros e a estação agrometeorológica foram instalados foi cultivado com grama batatais (*Paspalum notatum* Flügge).

Os atmômetros foram instalados utilizando-se um suporte de fixação de madeira, e a cápsula porosa ficou a uma altura de 1,5 m do solo, conforme recomendado pelo fabricante.

Utilizaram-se os valores dos coeficientes de tanque para estimar a demanda evaporativa do ar (ET) pelo método do tanque Classe A, e o valor da ET obtida pelo método do atmômetro modificado, foi obtido subtraindo-se duas leituras de dias consecutivos.

Considerou-se, neste trabalho, a média diária da ET para a avaliação dos evaporímetros e o método de Penman-Monteith (PEREIRA et al., 1997), o qual foi comparado com os demais.



FIGURA 1 – Vista geral do atmômetro modificado.

#### Método de Penman-Monteith

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{s(R_n - G) + M \cdot \rho \cdot c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{s + \gamma \left( 1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \right) \quad (1)$$

em que,

$ET_0$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm d}^{-1}$ ;

$\lambda$  = calor latente de evaporação,  $\text{MJ kg}^{-1}$ ;

$S$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$R_n$  = saldo de radiação,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;

$G$  = fluxo de calor no solo,  $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ ;

$M$  = fator de conversão,  $86.400 \text{ s d}^{-1}$ ;

$\rho$  = massa específica do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ ;

$c_p$  = calor específico do ar à pressão constante,  $\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$e_s$  = pressão de saturação de vapor,  $\text{kPa}$ ;

$e_a$  = pressão atual de vapor,  $\text{kPa}$ ;

$r_a$  = resistência aerodinâmica,  $\text{s m}^{-1}$ ;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ , e

$r_c$  = resistência da cultura,  $\text{s m}^{-1}$ .

O saldo de radiação e o fluxo de calor no solo foram estimados como sugerido por Pereira et al. (1997).

#### Resistência aerodinâmica

A resistência aerodinâmica ( $r_a$ ) foi estimada de acordo com o regime de transferência de calor sensível nas proximidades das plantas, podendo ser forçada, livre ou combinada. No processo combinado, tanto a velocidade do ar quanto a temperatura são relativamente importantes no processo de transferência de calor. A determinação do modo de transferência de calor predominante na casa-de-vegetação foi obtida pela expressão (INCROPERA e DEWITT, 1996):

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g\beta L(T_{sv} - T_\infty)}{u_\infty^2} \quad (2)$$

sendo,

$Gr$  = número de Grashof, adimensional;

$Re$  = número de Reynolds, adimensional;

$g$  = aceleração da gravidade,  $\text{m s}^{-2}$ ;

$\beta$  = coeficiente de expansão térmica volumétrica,  $\text{K}^{-1}$ ;

$L$  = comprimento característico da folha,  $\text{m}$ ;

$|T_{sv} - T_\infty|$  = valor absoluto da diferença de temperatura entre a superfície vegetal e o ar acima da cultura,  $\text{K}$ , e

$u_\infty$  = velocidade do ar no ambiente da casa-de-vegetação,  $\text{m s}^{-1}$ .

Quando estão presentes os regimes de convecção forçada ( $Gr/Re^2 \ll 1$ ) ou convecção livre ( $Gr/Re^2 \gg 1$ ),  $r_a$  é avaliada pelas equações clássicas de transferência

de calor. Sob condições de convecção combinada, os efeitos da velocidade do ar e da diferença de temperatura entre a cultura e o ar devem ser considerados conjuntamente (CHAPMAN, 1984). Em regime de convecção forçada, a resistência ao processo de transferência de calor sensível é obtida por:

$$r_a = \frac{\left(\frac{L}{\alpha u_\infty}\right)^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{6}}}{1,328 IAF} \quad (3)$$

em que:

$\alpha$  = difusividade térmica,  $m^2 s^{-1}$ ;

Pr = número de Prandtl, adimensional, e

IAF = índice de área foliar, adimensional.

O IAF da grama foi estimado pela equação (ALLEN et al., 1989):

$$IAF = 24h_c \quad (4)$$

em que  $h_c$  é a altura média da grama (m).

Quando a convecção livre domina, o processo de transferência de calor e massa  $r_a$  é obtido pela equação:

$$r_a = \frac{\left(\frac{Pr L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}}{0,81 IAF (g\beta |t_c - t_a| Pr L)^{\frac{1}{4}}} \quad (5)$$

Finalmente, quando os dois mecanismos de transferência de calor são relativamente importantes, a resistência aerodinâmica é obtida pela equação:

$$r_a = \frac{\left(\frac{Pr L}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}}}{0,81 IAF (g\beta |t_c - t_a| Pr L + 6,92 Pr u_\infty^2)^{\frac{1}{4}}} \quad (6)$$

Durante todo o período do experimento, o regime de transferência de calor sensível dominante foi a convecção forçada, ou seja ( $Gr/Re^2 \ll 1$ ), assim, a resistência aerodinâmica foi estimada utilizando-se a equação 03.

### Resistência da cultura

A resistência da cultura foi estimada pela equação (FYNN et al., 1993):

$$r_c = \frac{140,9 + 703 \exp(-0,013R_i)}{IAF} \quad (7)$$

em que  $R_i$  é a radiação incidente,  $W m^{-2}$ .

A metodologia adotada para comparação dos resultados se fundamenta no erro-padrão da estimativa (SEE), calculado como:

$$SEE = \left(\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

sendo:

SEE = erro-padrão da estimativa,  $mm d^{-1}$ ;

$y$  = média de  $ET_0$  obtida pelo método de Penman-Monteith,  $mm d^{-1}$ ;

$\hat{y}$  =  $ET_0$  estimada pelos demais métodos,  $mm d^{-1}$ , e

$n$  = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (SEE), do coeficiente de correlação ( $r$ ) e do coeficiente angular ( $b$ ) das respectivas regressões.

A precisão é dada pelo coeficiente de correlação, que indica o grau de associação entre duas características a partir de uma série de observações. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados. Matematicamente, essa aproximação é dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra "d" (WILLMOTT et al., 1985); seus valores variam de zero, para nenhuma concordância, a 1 (um), para a concordância perfeita.

O índice é obtido pela seguinte expressão (WILLMOTT et al., 1985):

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum ((|P_i - O_i|) + (|O_i - O|))^2} \quad (9)$$

em que,

$d$  = índice de concordância ou ajuste;

$O_i$  =  $ET_0$  obtida pelo método de Penman-Monteith,  $mm d^{-1}$ ;

$P_i$  =  $ET_0$  estimada pelos demais métodos,  $mm d^{-1}$ , e

$O$  = média dos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith,  $mm d^{-1}$ .

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do período de observações, os valores de demanda evaporativa do ar ( $ET$ ) estimados pelo mé-

todo do tanque Classe A e do atmômetro modificado foram superiores aos valores de ET determinados pelo método de Penman-Monteith.

Analisando-se a Tabela 1, observa-se que as correlações entre os valores de ET, obtidas pelo método do tanque Classe A com  $k_p = 1$  ( $r = 0,97$ ), do método do tanque Classe A empregando os coeficientes de tanque propostos por Lopes Filho ( $r = 0,99$ ) e do atmômetro modificado ( $r = 0,94$ ) com o método de Penman-Monteith, foram altas; entretanto, verifica-se também que os valores de ET estimados pelos métodos do tanque Classe A com  $K_p = 1$  e do atmômetro modificado foram superiores aos valores obtidos pelo método de Penman-Monteith, principalmente o método do atmômetro modificado, que superestimou muito o valor da demanda evaporativa do ar (ET) e, ainda, que o método do tanque Classe A, com  $K_p = 1$ , apresentou valor médio para o índice de ajuste ( $d = 0,58$ ) e alto valor para o erro-padrão da estimativa ( $SEE = 1,70$ ) quando comparado com o método de Penman-Monteith. No entanto, quando utilizaram-se os coeficientes de tanque apresentados por Lopes Filho (2002) na estimativa da ET, pelo método do tanque Classe A, observou-se um aumento considerável na performance do método, apresentando um alto valor para o índice de ajuste ( $d = 0,97$ ) e baixo valor para o erro-padrão da estimativa ( $SEE = 0,33$ ), quando comparado com o método de Penman-Monteith.

Dessa forma, a utilização do coeficiente de tanque igual a 1 ( $k_p = 1,0$ ), conforme proposto por Prados (1986), contribuiu para a baixa precisão do

método do tanque classe A. Esse resultado confirma a hipótese de Chiew e McMahon (1992), em que a principal causa da superestimativa na estimativa da ET, utilizando-se o tanque Classe A, pode estar relacionada com o valor do coeficiente  $k_p$ . Esse fator de correção varia em função do tamanho da área-tampão, cobertura do solo, umidade relativa e velocidade do vento. Segundo Pereira et al. (2002), o fato de o valor da evaporação obtido no tanque ser exagerado em relação à perda efetiva de uma cultura é fisicamente explicado pela pequena dimensão do tanque, como também pelas suas paredes laterais, que ficaram diretamente expostas à radiação solar e pela água no tanque não oferecer impedimento ao processo evaporativo, estando disponível, mesmo durante os períodos secos.

O método do atmômetro modificado apresentou baixo índice de ajuste ( $d = 0,27$ ) e alto valor do erro-padrão da estimativa ( $SEE = 4,81$ ), resultados diferentes dos encontrados por Pereira (1998), em que o atmômetro modificado da SEEI estimou com precisão a ET; portanto, o atmômetro modificado utilizado nesse experimento necessita de um coeficiente de correção ou de modificações estruturais, para melhorar o seu desempenho na estimativa da ET, em condições de casa-de-vegetação. Ressalta-se que a avaliação do atmômetro modificado SEEI, realizado por Pereira (1998), ocorreu em condições de ambiente externo (céu aberto).

**TABELA 1** – Resumo das análises estatísticas entre os métodos avaliados e o método de Penman-Monteith e média diária dos valores de ET, determinados pelos métodos do T.C.A e do atmômetro modificado, dentro da casa-de-vegetação.

Método	A	B	SEE	R	D	ET <sub>0</sub> (mm d <sup>-1</sup> )
Penman Monteith	-	-	-	-	-	1,90
T.C.A.*	-0,13	1,18	0,33	0,99	0,97	2,12
T.C.A. (Kp=1)	1,44	1,01	1,70	0,97	0,58	3,37
Atmômetro	4,16	0,99	4,81	0,94	0,27	6,06

\* Calculado utilizando-se os coeficientes de tanque propostos por Lopes Filho (2002).

### CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos e as condições em que foi conduzido o presente trabalho, conclui-se que:

a) Os métodos do tanque Classe A ( $K_p = 1$ ) e do Atmômetro modificado Soilcontrol não estimaram com precisão a ET, superestimando seus valores.

b) A utilização de coeficientes de tanque propostos por Lopes Filho aumentou consideravelmente a performance do método do tanque Classe A.

c) Os piores resultados foram os obtidos com o atmômetro modificado Soilcontrol.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, July/Aug. 1989.
- ALTENHOFEN, J. A modified atmometer for on-farm evapotranspiration determination. In: CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, 1985, Chicago. **Proceedings...** Saint Joseph: ASAE, 1985. p. 177-184.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normais climatológicas 1961-1990**. Brasília, 1992.
- CHAPMAN, A. J. **Heat transfer**. 4. ed. New York: Macmillan, 1984. 608 p.
- CHIEW, F. H. S.; McMAHON, T. A. An Australian comparison of Penman's potential evapotranspiration estimates and class A evaporation pan data. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, n. 6, p. 101-112, Dec. 1992.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- FYNN, R. P. A.; AL-SHOOSHAN; SHORT, T. H.; McMAHON, R. W. Evapotranspiration measurement and modeling for a potted chrysanthemum crop. **Transaction of the ASAE**, Saint Joseph, v. 36, n. 6, p. 1907-1913, Nov./Dec. 1993.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 4. ed. New York: [s.n.], 1996. 886 p.
- LOPES FILHO, P. P. **Utilização de diferentes tanques evaporímetros em ambiente protegido**. 2002. 79 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2002.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.
- PEREIRA, F. A. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) em relação a um lisímetro de pesagem**. 1998. 87 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1998.
- PRADOS, N. C. **Contribución al estudio de los cultivos enarenados en Almeria: necesidades hídricas y extracción del nutrientes del cultivo de tomate de crecimiento indeterminado en abrigo de polietileno**. Almeria: Ed. España, 1986. 195 p.
- WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, Sept. 1985.
- ZOLNIER, S. **Dynamic misting control techniques for poinsettia propagation**. 1999. 343 f. Thesis (Ph.D in Agronomy) - University of Kentucky, Kentucky, 1999.