

# DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM DISPOSITIVO PARA AMPLIAR A PRECISÃO DE LEITURA DE EVAPORAÇÃO DE UM ATMÔMETRO MODIFICADO

PEREIRA, A.S.<sup>1</sup>; COELHO, R.D.<sup>2</sup>; FRIZZONE, J.A.<sup>3</sup>

**RESUMO:** O atmômetro modificado é um instrumento com que se mede a evaporação de água que se processa numa superfície porosa (cápsula de Bellani), coberta com uma lona especial de cor verde. Este trabalho tem, como objetivo desenvolver e avaliar um dispositivo para ampliar a precisão, de leitura desse instrumento. O dispositivo idealizado foi construído em plástico PVC e possibilitou uma precisão nas medidas de evaporação de 0,16 mm, superior a obtida com o aparelho comercial, com precisão de medida de 1,0 mm. Em ensaio de campo, verificou-se que o atmômetro modificado sem o dispositivo (precisão de medida de 1,0 mm) apresenta medidas precisas de evaporação para períodos médios de tempo iguais ou superiores a 3 dias. Os atmômetros com o dispositivo idealizado apresentam precisão satisfatória para todos os períodos de tempo (diários e médios de 2, 3 e 4 dias).

**Palavras-chave:** evaporação, atmômetro, estimativa, equipamento

## DEVELOPMENT AND EVALUATION OF A DEVICE TO AMPLIFY THE ACCURACY OF EVAPORATION MEASUREMENTS OF A MODIFIED ATMOMETER

**SUMMARY:** The modified atmometer is an instrument to measure the water evaporation through a porous porcelain plate (Bellani cup) covered with a special green canvas. The main purpose of this work was to develop and evaluate a device to amplify the accuracy in evaporation measurements of a modified atmometer. The idealized device was built with PVC plastic and providing 0.16 mm of accuracy in evaporation measurements, superior than the ones obtained from the atmometer without the device, with 1.0 mm of accuracy. The results of trial indicated that the modified atmometer without the device had satisfactory readings of evaporation only for average periods equal or higher than 3 days. The atmometers with the idealized device showed satisfactory precision in all periods of time (daily scale and average periods of 2, 3 and 4 days).

**Key words:** evaporation, atmometer, estimation, equipment

<sup>1</sup> Pesquisador da Embrapa Meio Ambiente. Caixa Postal 69. CEP: 13820-000. Jaguariúna (SP). E-mail: anderson@cnpma.embrapa.br

<sup>2</sup> Professor do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP. Caixa Postal 9. CEP: 13418-900. Piracicaba (SP)

<sup>3</sup> Professor do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP

Recebido pelo Comissão Editorial: 17.12.03

Aprovado pela Comissão Editorial: 02.04.04

## INTRODUÇÃO

Os atmômetros são instrumentos com que se mede a evaporação que se processa numa superfície porosa. Dentre os diversos tipos de atmômetros, destaca-se o evaporímetro de Piche, que utiliza papel poroso como superfície evaporante, e o atmômetro de

Livingston, que emprega cápsulas porosas esféricas para essa finalidade. Os atmômetros vêm sendo estudados durante muitas décadas para a estimativa do consumo de água pelas plantas. Suas medidas refletem diretamente as condições ambientais, permitindo medir os efeitos integrados da radiação solar, da temperatura,

da umidade relativa do ar e da velocidade do vento sobre a evaporação, e, assim, correlacionar-se com a evapotranspiração das culturas (Pereira, 1996).

O atmômetro modificado, idealizado por Altenhofen (1985), consiste, basicamente, de uma superfície evaporante, composta de uma cápsula porosa coberta com uma lona especial de cor verde, ligada a um reservatório, onde a evaporação é quantificada através da variação do nível de água, por intermédio de uma escala graduada em milímetros. Os atmômetros modificados destacam-se entre os demais modelos pela cobertura da cápsula porosa com a lona especial de cor verde, que tem, como objetivos básicos, oferecer uma reflexão da radiação solar e uma resistência ao fluxo de vapor de água semelhante a um dossel vegetativo cultivado sem restrição hídrica; fornecem-se, assim, subsídios para uma estimativa consistente da evapotranspiração das culturas.

Pereira & Coelho (1992) estudando um atmômetro modificado da marca SEEI verificaram que as suas medidas de evaporação, com escala graduada em milímetros não possibilitaram uma quantificação precisa da evaporação em escala diária, fato esse confirmado por Pereira (1998), concluindo-se que a evaporação do atmômetro modificado da marca SEEI apresentou uma excelente correlação com a evapotranspiração de referência, medida em um lisímetro de pesagem, para o agrupamento dos dados em períodos de tempo igual ou superior a três dias, em função da compensação das flutuações diárias.

Pereira (1996) verificou que o atmômetro modificado SEEI não possibilitou medidas de evaporação com precisão em pequenos períodos de tempo, devido à dificuldade em visualizar precisamente a posição do menisco de água no tubo de vidro, entre as marcas sucessivas na escala do instrumento, graduada em milímetros, sugerindo que, para empregar-se o atmômetro modificado em programas de controle da lâmina irrigação,

necessita-se de medidas com precisão de décimo de milímetro.

Este trabalho tem, como objetivo, desenvolver um dispositivo que possibilite a quantificação precisa da evaporação do atmômetro modificado da marca SEEI, em escala diária.

## MATERIAL E MÉTODOS

O dispositivo para a ampliação da escala de leitura foi desenvolvido no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP. Na avaliação de campo, os atmômetros modificados foram instalados no interior do Posto Agrometeorológico do Departamento de Ciências Exatas da mesma Universidade, cujas coordenadas geográficas locais são: 22° 42' de latitude sul, 47° 38' de longitude oeste, a 580 metros de altitude.

O atmômetro modificado empregado foi o da marca SEEI, cuja ilustração esquemática é apresentada na Figura 1. Suas características construtivas principais são: Cápsula Porosa: cápsula de Bellani, com diâmetro de 65 mm; Lona verde: diâmetro de 170 mm, com barbante de nylon para o seu amarrado sobre a cápsula porosa; Tubo de Sucção: tubo de plástico, com 42 mm de comprimento e 4 mm de diâmetro interno, tendo acoplada uma válvula de retenção de água, para evitar o fluxo de água para o interior do reservatório, em decorrência de chuvas. A extremidade superior do tubo apresenta uma rolha de borracha para fazer a ligação entre o tubo de sucção e a cápsula porosa; Reservatório de água: formato cilíndrico, em PVC, com 75 mm de diâmetro externo, 65 mm de diâmetro interno e altura de 45 cm; Tubo de vidro transparente: diâmetro interno de 6 mm, acoplado ao reservatório para a medida do nível de água com uma escala graduada em milímetros, colada

ao lado do tubo de vidro.

Para aumentar a precisão das leituras de evaporação do atmômetro modificado, procurou-se desenvolver um dispositivo simples, de baixo custo, que não alterasse as características construtivas do atmômetro modificado comercializado e que pudesse ser facilmente construída e adotada pelos usuários.

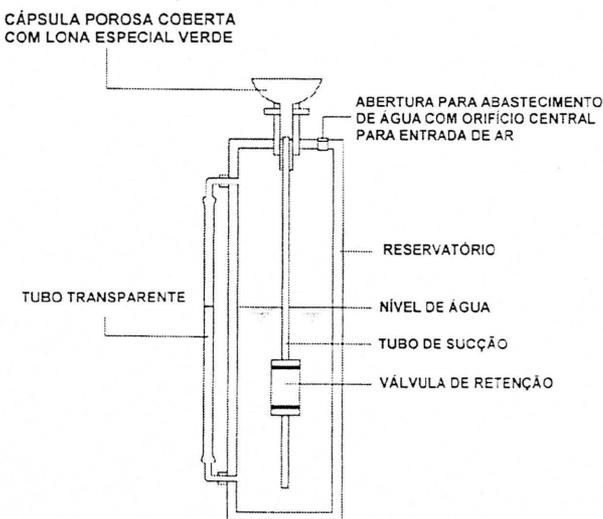
A evaporação do atmômetro modificado (EVAT) em  $L.m^{-2}$  ou milímetros (mm) é quantificada mediante a relação:

$$EVAT = \frac{VC}{ASE} \quad (1)$$

em que:

VC - volume de água consumido no reservatório, L;

ASE - área da superfície evaporante,  $m^2$ .



**Figura 1** - Ilustração esquemática do atmômetro modificado SEEI

O valor de VC é calculado por:

$$VC = ASTR \cdot \Delta H \quad (2)$$

em que:

ASTR - área molhada da seção transversal do reservatório,  $m^2$ ;

$\Delta H$  - variação da lâmina de água no reservatório evaporada durante um período de tempo t.

Substituindo (2) em (1) temos:

$$EVAT = \frac{ASTR}{ASE} \cdot \Delta H \quad (1)$$

A relação (ASTR / ASE) é portanto um coeficiente de transformação entre a lâmina de água consumida no reservatório e a lâmina evaporada. No caso do atmômetro modificado estudado, com  $ASTR = ASE$ , essa relação é igual a 1, e assim a variação da lâmina de água no reservatório ( $\Delta H$ ) corresponde, em igual valor, à lâmina de água evaporada (EVAT).

Pelas equações 1, 2 e 3, observa-se que, para um mesmo volume de água consumido, conforme se diminui o valor de ASTR ou se aumenta ASE, o valor de  $\Delta H$  aumenta. Para o caso de  $\Delta H$  ser medido com escala graduada em milímetros, quanto maior for o valor desse parâmetro para um mesmo volume de água evaporada, menores serão os erros cometidos na quantificação da evaporação devido à imprecisão nas leituras na escala.

O procedimento adotado para o aumento da precisão na medida de evaporação do atmômetro modificado foi a diminuição da área da seção transversal do reservatório. Para tanto, foi instalado no interior do reservatório um tubo de PVC, com 60 mm de diâmetro externo (tubo de PVC predial de Diâmetro Nominal de 2"), fechado em sua extremidade inferior com uma chapa plástica colada, por onde através de um orifício, o tubo de sucção entra em contato com a água. Para que o conjunto não flutuasse no reservatório, ele foi preenchido com uma pequena quantidade de areia fina. A Figura 2 apresenta os detalhes construtivos do dispositivo.

Conforme pode ser visualizado na Figura 3, com a instalação do dispositivo, a área molhada da seção transversal do reservatório (ASTR) será aquela localizada entre a parede interna do reservatório de água e a parede

externa do tubo de PVC, acrescida da área molhada da seção transversal do tubo transparente, para a visualização do nível de água:

$$ASTR = ASTIR + ASTTV - ASTET \quad (4)$$

em que:

ASTIR - área molhada da seção transversal interna do reservatório;

ASTTV - área molhada da seção transversal interna do tubo de visualização;

ASTET - área total da seção transversal do tubo de PVC.



Figura 3 - Ilustração esquemática do atmômetro modificado, com o dispositivo para aumentar a precisão da medida da evaporação.

Considerando que o reservatório possui 65 mm de diâmetro interno, o tubo de visualização 6 mm de diâmetro interno e o tubo de PVC, 60 mm de diâmetro total, o valor de ASTR será de:

$$ASTR = 3318 \text{ mm}^2 + 28 \text{ mm}^2 - 2827 \text{ mm}^2 = 519 \text{ mm}^2 = 5,19 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (5)$$

A superfície evaporante possui 65 mm de diâmetro, portanto a sua área (ASE) é de 3318 mm<sup>2</sup> (3,318 x 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>). Aplicando-se a equação (3) temos que a lâmina de água evaporada em função da variação do nível de água no reservatório será dada por:

$$EVAT = \frac{519 \text{ mm}^2}{3318 \text{ mm}^2} \cdot \Delta H = 0,16 \cdot \Delta H \quad (6)$$

Assim, o valor de evaporação do atmômetro modificado com o aparelho para a ampliação da escala de leitura será obtido multiplicando-se a variação do nível de água no reservatório ( $\Delta H$ ) durante um período de tempo  $t$  pelo fator 0,16. Considerando uma precisão de leitura do nível de água de 1,0 mm, o atmômetro com escala de

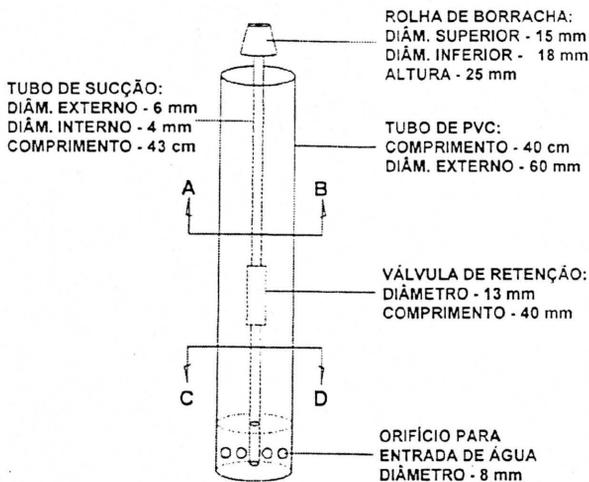
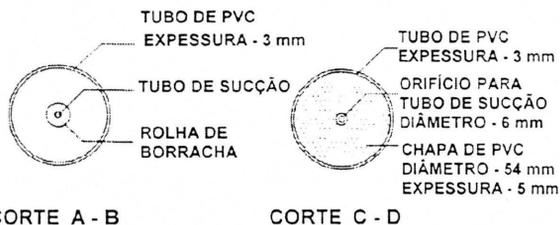


Figura 2 - Detalhes construtivos do dispositivo para ampliar a precisão nas medidas de evaporação pelo atmômetro modificado.

leitura ampliada possibilita uma precisão de 1,0 mm x 0,16 = 0,16 mm na medida da evaporação, contra o valor de 1,0 mm no aparelho com escala comercial.

Na avaliação do dispositivo foram utilizados quatro atmômetros modificados da marca SEEI, sendo três aparelhos contendo o dispositivo para ampliação da precisão de leitura e um aparelho sem o dispositivo.

Para verificar a significância da variação entre as medidas de evaporação coletadas nos atmômetros foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, aplicado para a análise de duas amostras independentes, conforme metodologia apresentada por Campos (1983). As análises foram feitas por meio da combinação entre as medidas diárias dos atmômetros com escala de leitura ampliada e entre esses com o atmômetro com escala de leitura comercial, gerando um total de 6 combinações.

Posteriormente foram realizadas comparações entre os valores de evaporação coletados em diferentes períodos de tempo: escala diária e períodos médios de 2, 3 e 4 dias. As comparações realizadas envolveram correlações entre a evaporação obtida com os aparelhos de escala de leitura ampliada versus o aparelho com escala de leitura comercial. Teoricamente, quando a demanda evaporativa da atmosfera é infinitamente pequena, considera-se que a evaporação dos atmômetros tende a zero (Pereira, 1996). Assim, utilizou-se nas comparações entre os valores de evaporação dos atmômetros nos diferentes períodos de tempo, um modelo de regressão linear com coeficiente linear de ajuste igual a zero, empregando-se a seguinte expressão geral:

$$Y = b \cdot X \quad (7)$$

em que:

Y - evaporação média dos atmômetros modificados com escala de leitura ampliada (ATMEA);

b - coeficiente angular de ajuste;

X - evaporação do atmômetro modificado com escala de leitura comercial (ATMEC).

Para o ajuste do modelo adotado (eq. 7) às variáveis estudadas empregou-se o método dos mínimos quadrados, conforme descrito por Zar (1974) e Gomes (1970). Para verificar as medidas de dependência entre as variáveis empregou-se o coeficiente de correlação ( $r^2$ ). Na análise de adequação dos modelos na previsibilidade das variáveis dependentes, foram construídos diagramas de dispersão entre os valores observados e respectivos valores estimados, traçando-se uma reta que representa a correlação perfeita entre os citados valores, conhecida na literatura como reta 1:1 ou de 45°. Quanto menor a dispersão dos pontos ao redor da reta 1:1, melhor é a previsibilidade do modelo. Para se quantificar a homogeneidade da dispersão em relação à reta 1:1 empregou-se o teste de concordância de Willmott (1981):

$$d = \left\{ 1 - \left[ \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right] \right\} \quad (8)$$

em que:

$P_i$  - valores previstos;

$O_i$  - valores observados.

$$P'_i = P_i - O_m \quad (9)$$

$$O'_i = O_i - O_m \quad (10)$$

em que:

$O_m$  - média dos valores observados

O valor "d" varia de 0 a 1, sendo o valor 1 indicador de uma dispersão nula ou perfeitamente uniforme dos dados previstos em relação aos estimados, ao redor da reta 1:1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se durante o ensaio que nos dias de ocorrência de chuva os aparelhos apresentaram resultados inconsistentes, devido a entrada de água nos reservatórios, o que evidencia o mal funcionamento das válvulas de retenção. Em alguns dias, ocorreu pousio de pássaros nos aparelhos, constatado pela presença de marcas de barro ou fezes nas lonas verde, o que ocasionou uma grande redução nas leituras, quando comparado aos aparelhos sem pousio de pássaros naqueles dias. Assim, os dias com ocorrência de chuvas ou pousio de pássaros foram descartados nas análises realizadas, bem como os períodos médios calculados envolvendo esses dias.

Na Tabela 1 são apresentados os contrastes realizados entre as medidas dos 3 atmômetros modificados com escala de leitura ampliada (ATMEA-1, ATMEA-2 e ATMEA-3) e do atmômetro modificado com escala de leitura comercial (ATMEC) para a aplicação do teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov, o valor da máxima divergência (D) e a significância dos contrastes.

Verifica-se que os contrastes entre os atmômetros com escala de leitura ampliada (ATMEA) não foram significativos, ou seja, foram estatisticamente iguais. De maneira oposta, os contrastes envolvendo os atmômetros modificados com escala de leitura ampliada (ATMEA) em relação ao atmômetro com escala de leitura comercial (ATMEC) foram significativos, comprovando o efeito do tratamento de ampliação da escala nas medidas de evaporação.

Como os 3 atmômetros com escala de leitura ampliada não apresentaram diferença significativa nos valores de evaporação medidos, trabalhou-se nas demais análises com o valor médio da evaporação obtida com os 3 aparelhos. A Tabela 2 apresenta os parâmetros

**Tabela 1** - Contrastes entre as medidas dos 3 atmômetros modificados com escala de leitura ampliada (ATMEA-1; ATMEA-2 e ATMEA-3) e com o atmômetro modificado com escala de leitura comercial (ATMEC). Valor da máxima divergência do teste de Kolmogorov-Smirnov (D) e a significância dos contrastes ao nível de 5% de probabilidade.

CONTRASTES	VALOR "D"	SIGNIFICÂNCIA (5% de probabilidade)
ATMEA-1 x ATMEA-2	0,070	não significativo
ATMEA-1 x ATMEA-3	0,054	não significativo
ATMEA-1 x ATMEC	0,219	significativo
ATMEA-2 x ATMEA-3	0,063	não significativo
ATMEA-2 x ATMEC	0,227	significativo
ATMEA-3 x ATMEC	0,227	significativo

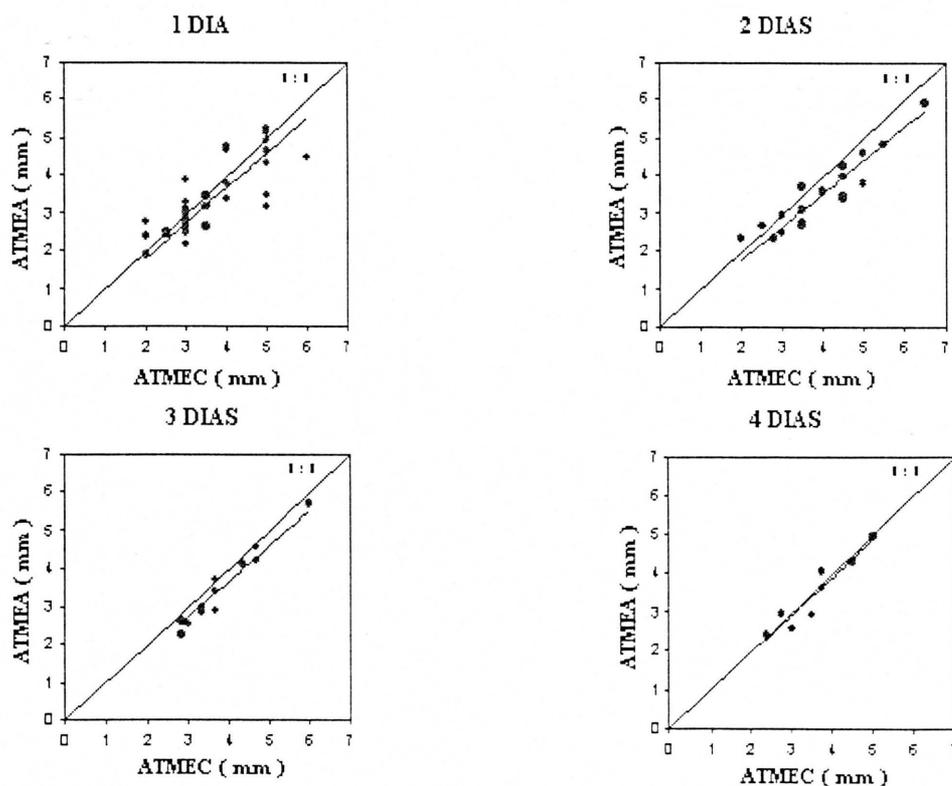
estatísticos referentes aos ajustes do modelo linear entre os valores de evaporação do atmômetro modificado com escala de leitura ampliada e a evaporação do atmômetro modificado com escala de leitura comercial. A Figura 4 ilustra os diagramas de dispersão e as retas de ajuste das variáveis nos diferentes períodos.

Observa-se um aumento gradual do coeficiente de ajuste "b", aproximando-se do valor 1 (valor que indica perfeita relação entre as leituras dos aparelhos), como também o aumento dos valores dos coeficientes de correlação ( $r^2$ ) e de Willmott (d). Para o período de 1 dia, não há correlação satisfatória, conforme pode ser visualizado na Figura 4, já que ocorre grande dispersão entre as variáveis, nesse período. Para o período de 2 dias, a correlação aumenta, porém ainda apresenta dispersão. No período médio de 3 dias, tem-se uma boa correlação entre as medidas, evidenciada pelos altos valores de ( $r^2$ ) e (d), como também do coeficiente de ajuste "b", com valor igual a 0,92. Para o período de 4 dias, a correlação é ainda mais consistente. Portanto a evaporação medida no atmômetro modificado, com

escala de leitura comercial (ATMEC), apresenta precisão equivalente ao atmômetro modificado, com escala de leitura ampliada (ATMEA), para períodos maiores ou iguais a 3 dias, ou seja, o efeito da ampliação da escala de leitura do atmômetro modificado é significativo para períodos de tempo de 1 e 2 dias. Isso ocorre porque, nos períodos de 1 e 2 dias, ocorrem maiores subestimativas ou superestimativas de evaporação, pelo atmômetro modificado com escala de leitura comercial (ATMEC), devido à sua maior imprecisão nas medidas. Nos períodos de 3 e 4 dias, ocorrem compensações dessas imprecisões (as superestimativas compensando as subestimativas) e, dessa forma, não ocorre efeito significativo da ampliação da escala de leitura nesses períodos.

**Tabela 2** - Número de dados (n), coeficiente de ajuste (b), coeficiente de correlação ( $r^2$ ) e índice de concordância de Willmott (d) determinados para as correlações entre a evaporação do atmômetro modificado com escala de leitura ampliada (ATMEA) e a evaporação do atmômetro modificado com escala de leitura comercial (ATMEC) nos diferentes períodos de tempo.

PERÍODO MÉDIO (dias)	COEFICIENTE			
	n	(b)	$r^2$	d
1	33	0,91	0,59	0,90
2	20	0,88	0,79	0,90
3	12	0,92	0,94	0,98
4	9	0,97	0,91	0,97



**Figura 4** - Diagramas de dispersão e retas de ajuste entre a evaporação média dos atmômetros modificados, com escala de leitura ampliada (ATMEA), e a evaporação do atmômetro modificado, com escala de leitura comercial (ATMEC), para os diferentes períodos de tempo.

## CONCLUSÕES

O dispositivo desenvolvido para ampliar a precisão de leituras de evaporação do atmômetro modificado da marca SEEI apresentou excelente desempenho e possibilitou a quantificação precisa da evaporação, para períodos diários e médios de 2 dias;

Para períodos médios de tempo de 3 e 4 dias, a utilização do dispositivo não apresentou efeito significativo na melhoria da precisão das medidas de evaporação.

## AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho e à Empresa SEEI – Serviços Especializados em Engenharia de Irrigação - São Paulo, SP, pela concessão dos atmômetros modificados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTENHOFEN, J. A modified atmometer for on-farm evapotranspiration determination. In: **Conference on Advances in Evapotranspiration**. Chicago, 1985. **Proceedings**, Chicago: ASAE, 1985. p.177-184.
- CAMPOS, H. **Estatística experimental não paramétrica**, 4. ed. Piracicaba: ESALQ, 1983.
- GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1970. 431p.
- PEREIRA, A.S.; COELHO, R.D. Determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) através de atmômetros modificados em condições tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21., Santa Maria. 1992. **Anais**. Santa Maria: SBEA/UFSM, 1992. p.637-647.
- PEREIRA, A.S. Avaliação do desempenho de um atmômetro modificado na estimativa da evapotranspiração potencial. Piracicaba, 1996. 90p. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- PEREIRA, F.A.C. Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em relação a um lisímetro de pesagem. Piracicaba, 1998. 87p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, n.2, p.184-194, 1981.
- ZAR, J.H. **Biostatistical analysis** 2.ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984. 718p.