

CRISTIANO TAGLIAFERRE

DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO® E DE DOIS MINIEVAPORÍMETROS
PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2006

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

T126d
2006

Tagliaferre, Cristiano, 1974-
Desempenho do irrigâmetro[®] e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência /
Cristiano Tagliaferre. – Viçosa : UFV, 2006.
xi, 99f. : il. ; 29cm.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Irrigação agrícola - Equipamento e acessórios -
Avaliação. 2. Evapotranspiração - Medição. 3. Evaporação
(Meteorologia). 4. Lisímetro. 5. Penman-Monteith,
Modelo de. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

CRISTIANO TAGLIAFERRE

DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO® E DE DOIS MINIEVAPORÍMETROS
PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA em: 21 de agosto de 2006.

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama
(Co-Orientador)

Prof. Luiz Cláudio Costa

Prof. Edvaldo Fialho dos Reis

Prof. Márcio Mota Ramos

Prof. Rubens Alves de Oliveira
(Orientador)

Aos meus pais Carlos Tagliaferre e Odila Maria Menon Tagliaferre e aos meus irmãos Elenita, José Carlos, Daniel, Jilson, Ângela e Elizabeth Tagliaferre.

OFEREÇO

À Rita de Cássia Silva, pelo amor, carinho e companheirismo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e oportunidade concedidas.

Aos meus pais e aos meus irmãos, pelo carinho, incentivo e apoio e pela compreensão nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Rubens Alves de Oliveira, pela amizade, orientação e confiança, imprescindíveis durante o Curso.

Aos meus Professores conselheiros Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon, Wilson Deniculi e Mauro Aparecido Martinez, pelas valiosas sugestões e pelos esclarecimentos.

À Rita de Cássia Silva, pelo companheirismo, incentivo, apoio e carinho.

Aos funcionários da Área Experimental de Irrigação e Drenagem Carlos Henrique, “Seu” Taíde e “Seu” Chico e aos laboratoristas Chicão e Eduardo, pelo apoio durante a montagem do experimento.

Ao meu fiel companheiro de experimento, o venezuelano Franklin José Valbuena Materan pela amizade e confiança.

Aos meus irmãos e grandes companheiros de república Giovanni de Oliveira Garcia, Fabrício Fagundes Pereira, Adésio Ferreira, Thiago Oliveira de Almeida, Napoleão Argolo Neto e Leandro, pelo valioso companheirismo e pela preciosa amizade, que também, de certa forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Aos Professores Sebastião Martins Filho, Julião Soares de Souza Lima e Edvaldo Fialho dos Reis, pela amizade e pelo apoio desde a iniciação científica até o término do doutorado.

Aos meus amigos Flávio Gonçalves de Oliveira, Delfran Batista, Flávia Mariani Barros, José Antônio, Roberto Avelino, Paola Lô Mônaco, Rafael Batista, Mozart Brasil, Cláudia Cabanellas, Márcia, Aldo Luiz Mauri, Flávio,

Carlos Augusto Brasileiro, Fernando, Dalmácio e Luiz “gaúcho”, pela valiosa amizade.

Ao meu amigo Roberto Cardoso Milagres, pela sua paciência, capacidade e dedicação para resolver os problemas que surgiram durante o experimento.

Aos estudantes de iniciação científica Thales, Alécio, Júlio, Ednaldo e Samuel, pela colaboração nos trabalhos experimentais.

A todos os meus amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, por, de alguma forma, terem contribuído para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

CRISTIANO TAGLIAFERRE, filho de Carlos Tagliaferre e Odila Maria Menon Tagliaferre, nasceu em Nova Venécia, ES, em 10 de junho de 1974.

Em setembro de 1996, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), em Alegre, ES, concluindo-o em outubro de 2001.

Em agosto de 2001, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em julho de 2003.

Em agosto de 2003, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Engenharia Agrícola da UFRV, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2006.

ÍNDICE

	Páginas
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS.....	7
CAPÍTULO I – DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO® NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA.....	9
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	14
4. CONCLUSÕES.....	23
5. REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO II – INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DA BORDADURA E DA PROFUNDIDADE DOS NÍVEIS DE ÁGUA NA EVAPORAÇÃO OBTIDA NOS MINIEVAPORÍMETROS OPERANDO COM IRRIGÂMETRO MODIFICADO.....	25
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
4. CONCLUSÕES.....	38
5. REFERÊNCIAS.....	38
CAPÍTULO III – DESEMPENHO DE MINIEVAPORÍMETROS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH – FAO 56.....	40
1. INTRODUÇÃO.....	40
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	42
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4. CONCLUSÕES.....	65
5. REFERÊNCIAS.....	66
CAPÍTULO IV – DESEMPENHO DE MINIEVAPORÍMETROS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO MODIFICADO.....	68
1. INTRODUÇÃO.....	68
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	70
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	79
4. CONCLUSÕES.....	96
5. REFERÊNCIAS.....	96

RESUMO

TAGLIAFERRE, Cristiano, D. S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. **Desempenho do Irrigâmetro[®] e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Co-orientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon e Mauro Aparecido Martinez.

Este estudo foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o desempenho do Irrigâmetro e dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 na estimativa da evapotranspiração de referência. O Irrigâmetro é um aparelho evapo-pluviométrico a ser utilizado no manejo da irrigação. O minievaporímetro UFV-1 é constituído por um recipiente cilíndrico de PVC, com diâmetro externo de 250 mm e interno de 244 mm, altura de 320 mm e fundo localizado a 255 mm da borda. Por sua vez, o minievaporímetro UFV-2 é dotado, também, de um evaporatório igual ao do UFV-1, possuindo, no entanto, outro recipiente cilíndrico de PVC de mesma altura, com diâmetro externo de 450 mm e espessura igual a 5 mm, o qual também armazena água, formando uma bordadura. Em cada minievaporímetro, a manutenção do nível constante da água no interior do evaporatório e a medição da lâmina evaporada foram feitas com o uso de Irrigâmetro modificado conectado a cada um deles. Os experimentos foram conduzidos na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em Viçosa, MG. O Irrigâmetro foi avaliado com um evaporatório de 60 mm de diâmetro e profundidade de nível de água igual a 35 mm da borda. Para analisar o efeito de diferentes profundidades do nível de água na taxa de evaporação nos dois minievaporímetros, o experimento foi montado em esquema fatorial 4 x 2 (quatro níveis de água e dois tipos de minievaporímetros), no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. A evaporação nos minievaporímetros foi obtida nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda. Os dados de evapotranspiração obtidos no Irrigâmetro foram comparados com os de evapotranspiração de referência (ET_0) obtidos com o uso do método de Penman-Monteith – FAO 56. A evaporação obtida nos minievaporímetros foi relacionada com a (ET_0) estimada pelo método de Penman-Monteith – FAO 56 e com a determinada no lisímetro de lençol freático constante, para obter os coeficientes

que possibilitaram estimar a evapotranspiração de referência em períodos de um, três, cinco e sete dias. A transformação da evaporação em evapotranspiração de referência foi feita por meio da multiplicação dos valores médios dos coeficientes dos minievaporímetros, obtidos em cada nível de água e em cada intervalo de tempo estudado, com os valores de evaporação. Os resultados de evapotranspiração de referência obtidos com o Irrigâmetro e com os minievaporímetros foram comparados com os dos métodos de Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A, Hargreaves-Samani (1985) e lisímetro de drenagem. Os resultados mostraram que: (a) o Irrigâmetro apresentou desempenho adequado, comparativamente ao método de Penman-Monteith – FAO 56, para estimar a ET_0 nas escalas de um, três, cinco e sete dias; (b) o Irrigâmetro pode ser recomendado para o manejo da água na agricultura irrigada; (c) a bordadura com água reduziu a evaporação no minievaporímetro UFV-2 em $1,10 \text{ mm d}^{-1}$, em média, nas diferentes profundidades dos níveis de água estudados, comparativamente ao minievaporímetro UFV-1; (d) à medida que aumentou a profundidade do nível de água no evaporatório dos dois tipos de minievaporímetros, a evaporação diminuiu e se aproximou do valor obtido no tanque Classe A; (e) o aumento na profundidade dos níveis de água nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, de 30 para 75 mm, reduziu a evaporação de 5,45 para 4,9 mm d^{-1} e de 4,29 para 3,81 mm d^{-1} , respectivamente; (f) os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado apresentaram desempenho adequado, comparativamente ao método de Penman-Monteith – FAO 56 e lisímetro de lençol freático constante, para estimar a ET_0 nos intervalos de tempo e profundidades dos níveis de água estudados; (g) o minievaporímetro UFV-1 exibiu valores dos coeficientes iguais a 0,51; 0,53; 0,55; e 0,56, enquanto no minievaporímetro UFV-2 eles foram iguais a 0,65; 0,68; 0,72; e 0,74, respectivamente, nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com o método de Penman-Monteith – FAO 56; (h) o minievaporímetro UFV-1 apresentou valores dos coeficientes iguais a 0,47; 0,49; 0,51; e 0,52, enquanto no minievaporímetro UFV-2 eles foram iguais a 0,59; 0,63; 0,65; e 0,67, respectivamente, nas profundidades dos níveis de água

iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com o lisímetro de lençol freático constante; e (i) os métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani e Radiação superestimaram a ET_0 obtida pelos métodos adotados como padrão, em todos os intervalos de tempo analisados, verificando-se comportamento contrário do lisímetro de drenagem e do tanque Classe A.

ABSTRACT

TAGLIAFERRE, Cristiano, D. S., Universidade Federal de Viçosa, August 2006. **Performance of the Irrigâmetro[®] and two minievaporimeters to estimate reference evapotranspiration.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-Advisers: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon and Mauro Aparecido Martinez.

The objective of this study was to evaluate the performance of the Irrigâmetro[®] and the minievaporimeters UFV-1 and UFV-2 to estimate reference evapotranspiration. Irrigâmetro[®] is an evapo-pluviometric equipment to be used in irrigation management. Minievaporimeter UFV-1 consists of a PVC cylindrical container, with 250 mm outer diameter and 244 mm inner diameter, 320 mm height and bottom 255 mm distant from the edge. In contrast, the minievaporimeter UFV-2, which also has an evaporator identical to model UFV-1, having, however, another cylindrical PVC container of same height, 5-mm thick, with 450mm outer diameter, which also stores water, forming a fetch border. In each mini-evaporimeter, the maintenance of the constant water level inside the evaporator and the measurement of the amount of water evaporated were carried out using a modified Irrigâmetro[®] connected to each one of them. The experiments were conducted at the Irrigâmetro[®] Research and Development Unit of the Agricultural Engineering Department of the Federal University of Viçosa (UFV), Viçosa, MG. The Irrigâmetro[®] was evaluated with an evaporator of 60-mm diameter and water depth at 35 mm from the edge. To analyze the effect of different water depths on the evaporation rate in the minievaporimeters, the experiment was arranged in a 4 x 2 factorial (four water depths and two types of mini-evaporimeters) complete randomized design, with three replications. The evaporation in the minievaporimeters was obtained at the water depths of 30, 45, 60 and 75 mm from the edge. The evapotranspiration data obtained from the Irrigâmetro[®] were compared with the reference evapotranspiration (ET₀) obtained with the Penman-Monteith method - FAO 56. The evaporation from the minievaporimeters was related with the (ET₀) estimated by the Penman-Monteith method - FAO 56 and with the (ET₀) determined in the constant water table lysimeter to obtain the coefficients that allowed the estimation of reference evapotranspiration in intervals of one, three, five and seven days. The

transformation of evaporation into reference evapotranspiration was carried out by multiplying the mean values of minievaporimeter coefficients (from each water depth and each studied interval) by the evaporation values. The reference evapotranspiration results from the Irrigâmetro[®] and minievaporimeters were compared with the results from the FAO-24 Modified Penman, FAO-24 Radiation, Class A pan, Hargreaves-Samani (1985) and drainage type lysimeter. The results indicated that: (a) the Irrigâmetro[®] provided suitable performance compared with the Penman-Monteith method - FAO 56 to estimate ET_0 at the intervals of one, three, five and seven days; (b) the Irrigâmetro[®] can be recommended for water management in irrigated agriculture; (c) the water border reduced evaporation in the minievaporimeter UFV-2 by 1.1 mm d^{-1} , on average, at the different studied water depths compared to the minievaporimeter UFV-1; (d) as the water depth in the evaporator of the two minievaporimeters increased, the evaporation decreased and became closer to the value obtained in the Class A pan; (e) increase in water depths of minievaporimeters UFV-1 and UFV-2 from 30 to 75 mm reduced evaporation from 5.45 to 4.9 mm d^{-1} and from 4.29 to 3.81 mm d^{-1} , respectively; (f) the minievaporimeters UFV-1 and UFV-2 operating with modified Irrigâmetro[®] provided suitable performance, compared to the Penman-Monteith method - FAO 56 and constant water table lysimeter, to estimate ET_0 in the intervals and the studied water depths; (g) minievaporimeter UFV-1 gave coefficient values equal to 0.51; 0.53; 0.55; and 0.56, while the minievaporimeter UFV-2 gave coefficient values equal to 0.65; 0.68; 0.72; and 0.74, respectively, at the water depths 30, 45, 60 and 75 mm from the edge, in comparison with the Penman-Monteith method - FAO 56; (h) minievaporimeter UFV-1 gave coefficient values equal to 0.47; 0.49; 0.51; and 0.52, while the minievaporimeter UFV-2 gave values equal to 0.59; 0.63; 0.65; and 0.67, respectively, at the water depths 30, 45, 60 and 75 mm from the edge, in comparison with the constant water table lysimeter; and (i) the methods Modified Penman, Hargreaves-Samani and Radiation overestimated the ET_0 obtained by the adopted standard methods in all the analyzed intervals, showing behavior opposite to the drainage lysimeter and Class A pan.

INTRODUÇÃO GERAL

A água é indispensável à vida, sendo um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. A sua escassez está aumentando a competição entre os diferentes usuários, como indústria, abastecimento humano e agricultura.

No Brasil, a agricultura irrigada é a maior consumidora de água, dentre as diversas atividades humanas. Na maioria das áreas irrigadas, a ausência de manejo racional da água resulta em aplicação excessiva, com desperdício de água e energia. Práticas adequadas de irrigação contribuem para aumentar a produtividade das culturas, melhorar a qualidade dos produtos agrícolas, minimizar o uso da água e preservar os recursos hídricos.

O manejo racional da irrigação consiste em determinar o momento de irrigar e o tempo de funcionamento de um equipamento de irrigação, ou a sua velocidade de deslocamento, com a finalidade de aplicar a quantidade de água necessária ao pleno desenvolvimento da cultura.

A determinação do consumo de água de uma cultura é fundamental no manejo da água de irrigação, podendo ser obtida a partir de medidas efetuadas no solo, na planta e nos elementos climáticos. Os métodos baseados em medidas no solo se fundamentam na determinação do seu teor de água; os que utilizam medidas na planta consideram o monitoramento do seu potencial hídrico e avaliações da resistência estomática e da temperatura da folha, dentre outros; já os métodos baseados nos elementos climáticos consideram, desde simples medições da evaporação da água num tanque, como o Classe A, até complexas equações para a estimativa da evapotranspiração (ROCHA et al., 2003). A determinação da evapotranspiração tem sido mais usada por causa da sua maior praticidade e da menor exigência de mão-de-obra no manejo da irrigação.

A evapotranspiração de referência pode ser determinada de diferentes maneiras. De acordo com Burman et al. (1983), ela pode ser obtida a partir de métodos diretos, incluindo os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo, ou de métodos indiretos envolvendo medidas de elementos climáticos. Conforme Jensen et al. (1990), nos métodos indiretos estão enquadrados os modelos de Penman, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Priestley-

Taylor e Hargreaves, entre outros, e também os evaporímetros, como o tanque Classe A e o atmômetro modificado.

De acordo com Allen et al. (1998), o modelo de Penman-Monteith – FAO 56 apresenta estimativas confiáveis e consistentes de ET_0 , sendo considerado aquele de melhor desempenho entre os métodos combinados. A equação proposta por esses autores é baseada numa formulação teórica de conceitos físicos:

$$ET_0 = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

em que:

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

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

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

T = temperatura média do ar a 2 m de altura, $^{\circ}C$;

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$;

e_s = pressão de saturação de vapor, kPa;

e_a = pressão parcial de vapor, kPa;

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

γ = coeficiente psicrométrico, $kPa\ ^{\circ}C^{-1}$.

O método de Penman é classificado como um método combinado, de acordo com Jensen et al. (1990), pois associa os efeitos do balanço de energia e dos termos aerodinâmicos na estimativa da evapotranspiração. Doorenbos e Pruitt (1977) modificaram a equação de Penman (1963), dando maior sensibilidade em função do vento, ajustando-se o fator c , com base nas condições climáticas locais e assumindo-se $G = 0$, em períodos diários, ou seja:

$$ET_0 = c \left[W R_n + (1 - W) 0,27 (1 + 0,00625 U_2) (e_s - e_{s(t)}) \right] \quad (2)$$

em que:

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

c = fator de correção da FAO;

W = fator de ponderação que depende da temperatura;

R_n = saldo de radiação, $mm\ d^{-1}$;

U_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, km d^{-1} ;

e_s = pressão de saturação de vapor à temperatura média diária, mbar; e

$e_{s(t)}$ = pressão de saturação de vapor à temperatura média de ponto de orvalho, mbar.

O fator de correção (c) da FAO foi ajustado por Allen e Pruitt (1991):

$$\begin{aligned} c = & 0,892 - 0,0781U_d + 0,00219U_d R_s + 0,000402UR_{\max} R_s + \\ & 0,000196(U_d / U_n)U_d UR_{\max} + 0,0000198(U_d / U_n)U_d UR_{\max} R_s + \\ & 0,00000236U_d UR_{\max} R_s - 0,0000086(U_d / U_n)^2 U_d UR_{\max} - \\ & 0,0000000292(U_d / U_n)U_d (UR_{\max})^2 R_s - 0,0000161UR_{\max} (R_s)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

em que,

U_d = velocidade média do vento durante o fotoperíodo, m s^{-1} ;

U_n = velocidade média do vento durante nictoperíodo, m s^{-1} ;

UR_{\max} = umidade relativa máxima diária, %;

R_s = radiação solar global à superfície, mm d^{-1} ; e

$U_d/U_n = 2$, valor recomendado por Doorenbos e Pruitt (1977), no caso da indisponibilidade de dados.

O fator de ponderação (W) pode ser calculado pela equação:

$$W = \Delta (\Delta + \gamma)^{-1} \quad (4)$$

em que Δ é a declividade da pressão de saturação de vapor e γ o coeficiente psicrométrico.

O método proposto por Hargreaves-Samani (1985) para estimativa da evapotranspiração de referência é uma alternativa para situações em que não se têm dados medidos de radiação solar à superfície, umidade relativa e velocidade do vento:

$$ET_0 = 0,0023 (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} (T_{\text{med}} + 17,8) Ra \quad (5)$$

em que:

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

T_{\max} = temperatura máxima do dia, $^{\circ}\text{C}$;

T_{\min} = temperatura mínima do dia, $^{\circ}\text{C}$;

T_{med} = temperatura média do dia, $^{\circ}\text{C}$; e

Ra = radiação extraterrestre, mm d⁻¹.

O método da radiação é usado para estimar a evapotranspiração de referência utilizando apenas dados de radiação solar. É indicado para situações em que não se dispõe de medidas confiáveis de velocidade do vento e umidade relativa. A estimativa da ET₀ por esse método é feita empregando-se a equação:

$$ET_0 = r (W R_s) \quad (6)$$

O fator de correção (r) depende da umidade relativa do ar e da velocidade média do vento, e seus parâmetros foram obtidos por Frevert et al. (1983), conforme a equação:

$$r = 1,066 - 0,00128 UR_{med} + 0,045 - 0,0002 U_d UR_{med} - 0,0000315 (UR_{med})^2 - 0,001103 (U_d)^2 \quad (7)$$

em que UR_{med} é a umidade relativa média do período, %.

A radiação solar (R_s) em um período de 24 horas foi calculada usando-se a fórmula de Angstron, que utiliza a radiação extraterrestre e a relação entre as horas reais e as máximas possíveis de insolação forte (n/N), conforme a expressão:

$$R_s = \left[0,25 + 0,50 \left(\frac{n}{N} \right) R_a \right] \quad (8)$$

O método baseado em tanques de evaporação, como o Classe A, mede o efeito integrado da radiação, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa sobre a evaporação de uma superfície de água-livre:

$$ET_0 = K_p EV \quad (9)$$

em que:

ET₀ = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

K_p = coeficiente do tanque; e

EV = evaporação da água medida no tanque Classe A, mm d⁻¹.

O valor de K_p varia com as condições de contorno do tanque, ou seja, tamanho e natureza da área de bordadura, condições de umidade relativa do ar e

velocidade do vento. O coeficiente do tanque Classe A em superfície coberta com grama foi ajustado por Allen e Pruitt (1991), expresso pelo modelo:

$$K_p = 0,108 - 0,000331 U_2 + 0,0422 \ln(\text{bordadura}) + 0,1434 \ln(\text{URmed}) - 0,000631 [\ln(\text{bordadura})]^2 \ln(\text{URmed}) \quad (10)$$

Dentre os métodos diretos para determinar a ET_0 , o mais preciso é o lisímetro de pesagem, sendo de custo elevado e restrito às instituições de pesquisas para calibração regional de métodos indiretos.

Aboukhaled et al. (1986) consideraram a lisimetria de grande utilidade nos estudos de evapotranspiração e consumo de água pelas culturas. Apesar de ser uma ferramenta-padrão, em estudos de evapotranspiração em geral os lisímetros apresentam alguns inconvenientes. Sedyama (1996) relatou que é muito difícil manter as condições internas dos lisímetros iguais ou semelhantes às condições externas e vice-versa. Assim, a estimativa da ET_0 a partir de equações físico-matemáticas, como a equação de Penman-Monteith – FAO 56, tem recebido bastante atenção entre os técnicos, engenheiros e cientistas, em virtude de as estações automáticas fornecerem medidas em tempo quase real, além da praticidade e da facilidade para obtenção de dados.

No manejo da irrigação, apesar de estações meteorológicas automáticas serem práticas e precisas na medição de elementos climáticos envolvidos no processo da evapotranspiração, elas são caras e geralmente necessitam de cálculos e programas computacionais para a estimativa da ET_0 , tendo o seu uso limitado a grandes áreas irrigadas. No entanto, tem-se procurado determinar o consumo de água das culturas por meio de métodos de baixo custo que estimam a evapotranspiração de referência, com base na estimativa da evaporação da água contida num recipiente, como o tanque Classe A, aliado a coeficientes específicos, dependentes do clima, do tipo de tanque e do tamanho da bordadura circundante, como relataram Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998).

Diversos autores relataram a metodologia usada para a determinação da evapotranspiração de referência a partir da evaporação medida no tanque Classe A. No entanto, são escassas as informações sobre a influência da variação do nível da água dentro do tanque no processo da evaporação, assim como o efeito da bordadura na parede do tanque, evitando-se a incidência direta da radiação

solar sobre ela e, com isso, reduzindo a transferência de calor da parede para a massa de água.

Por sua simplicidade, o tanque Classe A tem sido objeto de inúmeras adaptações, principalmente no que diz respeito ao sistema de medições, visando torná-lo mais preciso, mais barato e prático. Algumas dessas modificações podem ser encontradas em Assis (1978), Amorim Neto (1981) e Villa Nova et al. (2005).

No Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa foi desenvolvido recentemente, por uma equipe de pesquisadores, um aparelho denominado Irrigâmetro, a ser utilizado no manejo da água de irrigação. O Irrigâmetro combina o método de estimativa da evapotranspiração com a disponibilidade de água no solo para a cultura. Possui um evaporatório e três escalas, que são usadas para realizar o manejo da irrigação: (a) a escala laminar – graduada no próprio tubo de leitura-alimentação do aparelho, que tem a função de medir a lâmina de água evaporada ou evapotranspirada; (b) a escala da régua de manejo – sem graduação, possuindo quatro faixas verticais de colorações azul, verde, amarela e vermelha. Essa escala engloba as características físico-hídricas do solo e da cultura, e sua função é indicar a necessidade de irrigação; e (c) a escala da régua temporal ou porcentual – graduada em horas e minutos ou em porcentagem. Essa escala é confeccionada utilizando-se a intensidade de precipitação do sistema de irrigação, possuindo a função de indicar o tempo de funcionamento, no caso de aspersão convencional ou localizada, ou da velocidade de deslocamento do equipamento, no caso de pivô central ou sistema linear.

O evaporatório do Irrigâmetro pode ser um evaporímetro ou um evapotranspirômetro. Se o aparelho estiver equipado com evaporímetro, ele pode medir diretamente, numa escala apropriada, a lâmina evaporada ou, indiretamente, a ET_0 ou, ainda, a ET_c em cada estágio de desenvolvimento da cultura. Se estiver equipado com um evapotranspirômetro de lençol freático constante, ele medirá diretamente a ET_0 ou a ET_c , se nele estiver sendo cultivada a grama-batatais ou a cultura de interesse, respectivamente.

Neste trabalho, objetivaram-se: (a) avaliar o Irrigâmetro com base no método de Penman-Monteith – FAO 56, para estimativa da evapotranspiração de referência; (b) avaliar a influência de bordadura com água e diferentes profundidades do nível de água dentro do evaporatório dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 sobre a evaporação; e (c) avaliar os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 em relação aos métodos de Penman-Monteith – FAO 56 e lisímetro de lençol freático constante, para obter os seus coeficientes e a estimativa da evapotranspiração de referência, bem como comparar os seus desempenhos com os métodos de Penman modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A e Hargreaves-Samani (1985).

REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and drainage Paper, 56).

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

AMORIM NETO, M. da S. **Análise preliminar do desempenho de um sistema de medidas de evaporação para o tanque Classe A**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 1981. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

ASSIS, F.N. de. **O uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre evapotranspiração medida e estimada**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 1978. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

BURMAN, R.D.; NIXON, P.R.; WRIGHT, T.L.; PRUITT, W.O. Water requirements. In: JENSEN, M. E. **Design operation of farm irrigation system**. St. Joseph: ASAE, 1983. p.189-232.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

FREVERT, D.K.; HILL, R.W.; BRAATEN, B.C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, New York, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. de. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1996. 176 p.

VILLA NOVA, N.A.; SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.B. Evapopluviômetro: novo sistema de medida da evaporação em tanque Classe A. **Irriga**, Botucatu, v. 10, n. 1, p. 76-81, 2005.

CAPÍTULO I – DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO® NA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

1. INTRODUÇÃO

A determinação da quantidade de água necessária para as culturas é um dos principais parâmetros para o correto planejamento, dimensionamento e manejo do sistema de irrigação, sendo importante o conhecimento da evapotranspiração (MAÑHAS e VALERO, 1993). A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície com vegetação durante determinado período.

O manejo da água de irrigação é geralmente conduzido através da avaliação da umidade do solo ou por meio de estimativa da evapotranspiração da cultura, sendo esse método mais usado por causa da sua maior praticidade e da menor exigência de mão-de-obra. No manejo da irrigação, conduzido através de estimativa de evapotranspiração, os equipamentos mais usados são o tanque Classe A e a estação meteorológica automática.

O tanque Classe A é um método que se baseia na medição da evaporação da água num tanque padronizado, cujo valor é convertido em evapotranspiração de referência por meio de coeficientes específicos dependentes do clima, do tipo de tanque e da bordadura circundante (DOORENBOS e PRUITT, 1977; ALLEN et al., 1998). Segundo Sedyama (1996), o maior uso desse equipamento é pela sua praticidade e pelos baixos custos de instalação e manutenção. De acordo com Smith (1991), quando bem conduzido esse método oferece resultados confiáveis na determinação da evapotranspiração de referência.

No caso de uso do tanque Classe A, a medição da lâmina de água evaporada e a sua conversão em evapotranspiração exigem que o irrigante faça cálculos e tenha certo conhecimento técnico sobre irrigação, o que tem dificultado seu uso no manejo da água na agricultura irrigada. Esse aspecto relativo ao uso do tanque Classe A se constitui numa desvantagem, porque dificulta a tomada de decisão do irrigante quanto ao momento de efetuar a próxima irrigação e quanto à quantidade de água a ser aplicada. Isso interfere na definição do tempo de funcionamento do equipamento de irrigação.

No caso de uso de estação meteorológica automática estão associados elevados custos para o produtor envolvendo a aquisição da estação, de computador e de programa computacional, manutenção periódica e assistência técnica especializada, além de certo conhecimento técnico do irrigante a respeito de irrigação. Esses custos associados inviabilizam o uso de estação meteorológica automática para a grande maioria dos produtores que trabalham no âmbito da agricultura irrigada no Brasil.

Ley et al. (1994ab) citaram que, quando a medição dos elementos meteorológicos é feita por estações meteorológicas automáticas, é comum a ocorrência de erros decorrentes da calibração dos sensores dos equipamentos utilizados nessas medições, comprometendo, dessa forma, a determinação dos componentes necessários à estimativa da evapotranspiração. Segundo esses autores, quando as medições advêm de estações meteorológicas convencionais, os erros são ainda maiores, pois se acrescentam aos erros instrumentais aqueles devidos ao observador.

O Irrigâmetro é um aparelho que foi inventado e desenvolvido recentemente na Universidade Federal de Viçosa, detentora de sua patente e de sua marca, sendo um aparelho evapopluiométrico a ser utilizado no manejo da irrigação, visando otimizar o uso da água na agricultura irrigada. Essa otimização é importante para a sociedade como um todo, tanto do ponto de vista ambiental, economizando água e energia e evitando degradação do meio ambiente, quanto do ponto de vista da geração de renda para o produtor rural, reduzindo custos e aumentando a produtividade das culturas e a disponibilidade de alimentos de melhor qualidade.

O Irrigâmetro, ao introduzir grande simplicidade no manejo da água em áreas irrigadas, constitui-se num aparelho de grande potencial de uso na agricultura irrigada, pois, além de diversas vantagens, ele fornece, de forma rápida e prática, respostas às duas perguntas básicas do manejo da irrigação: quando e quanto irrigar. Assim, o irrigante não precisa ter conhecimentos técnicos especializados sobre essa prática agrícola.

Em condições normais de manejo da irrigação, com o tanque Classe A o operador mede a lâmina de água evaporada e a lâmina precipitada, com o uso de

pluviômetro, e posteriormente efetua os cálculos necessários para determinar quando e quanto irrigar. No entanto, em condições de manejo da irrigação com o uso do Irrigâmetro, a informação quanto ao momento e tempo de funcionamento do equipamento de irrigação, ou a sua velocidade de deslocamento, fica prontamente disponível ao irrigante, que não precisa ter conhecimento técnico e nem efetuar cálculos. No caso de ocorrência de chuva, a lâmina precipitada é medida facilmente pelo operador do Irrigâmetro, que define se ela foi suficiente ou não para suprir o déficit hídrico até então existente no solo, também sem a necessidade de fazer cálculos.

Dependendo das dimensões dos componentes do Irrigâmetro, a medição da lâmina evaporada ou evapotranspirada pode ser feita com alta precisão, superior a um milésimo de milímetro. O grau de precisão na leitura da lâmina é particularmente importante na condução de pesquisas científicas aplicadas na área de Agrometeorologia e de Ciência da Irrigação, relacionadas à determinação de demanda hídrica das culturas. Para fins práticos de manejo da irrigação, a medição da lâmina com precisão de um décimo de milímetro é plenamente satisfatória.

O Irrigâmetro é de custo relativamente baixo e de fácil operação, a qual consiste simplesmente em abertura e fechamento de válvulas nele existentes, obedecendo-se a uma seqüência previamente definida.

Neste trabalho, teve-se por objetivos avaliar o Irrigâmetro com base no método de Penman-Monteith – FAO 56, para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0); e comparar o seu desempenho com os métodos de Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A e Hargreaves-Samani (1985).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, situada a 20° 45' de latitude Sul e 42° 51' de longitude Oeste, numa altitude média de 651 m. Os elementos climáticos diários foram obtidos na estação climatológica do Instituto Nacional

de Meteorologia (INMET), localizada no Campus da UFV, próximo à área experimental.

O Irrigâmetro possui: um evaporatório, no qual o nível da água é mantido constante através de um sistema semelhante ao usado no frasco de Mariotte; quatro válvulas que permitem efetuar o abastecimento de água, a eliminação de ar, a drenagem e a interconexão do tubo de alimentação com o evaporatório; e três escalas indicadoras da leitura da lâmina evaporada ou evapotranspirada, do tempo de irrigação ou da velocidade de rotação do sistema de irrigação e do momento de irrigar. O Irrigâmetro possibilita computar a efetividade da chuva sem a necessidade de cálculos.

A evapotranspiração de referência foi determinada no Irrigâmetro com escala de leitura ampliada em 15 vezes e com precisão igual a 0,1 mm. A Figura 1 ilustra o Irrigâmetro instalado na área experimental com a escala da lâmina evapotranspirada e com as réguas que fornecem diretamente o tempo de irrigação, para certo sistema de aspersão convencional, e o momento de irrigar, para determinado tipo de cultura e de solo.

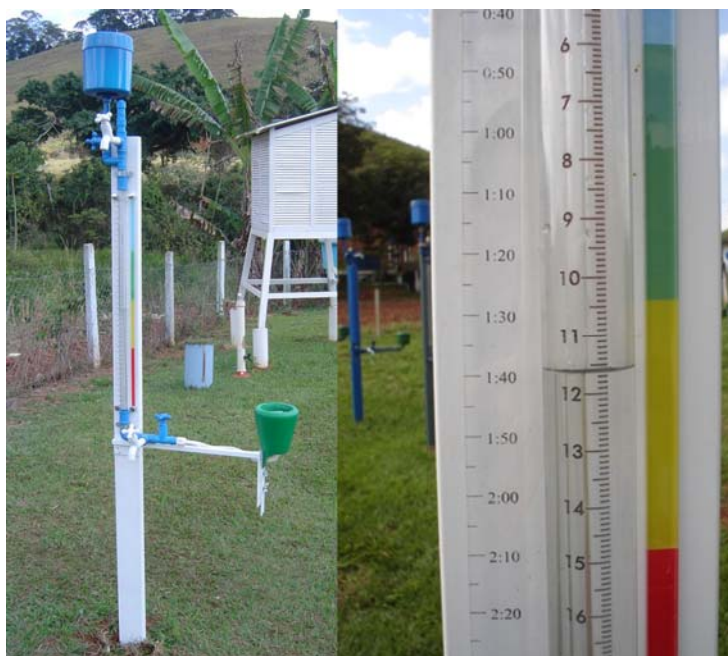


Figura 1 – Equipamento instalado na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. No detalhe, observam-se a indicação da lâmina evapotranspirada (11,6 mm), o tempo de irrigação (1h 40) e o momento de irrigar (cor amarela).

A estimativa da ET_0 foi realizada utilizando-se o Irrigâmetro, os métodos propostos pela FAO (Penman-Monteith – Padrão FAO 56, Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24 e o tanque Classe A) e o método de Hargreaves-Samani (1985), durante um período de 47 dias, pois o equipamento se encontrava na fase de ajustes, essenciais para obter diretamente a evapotranspiração de referência. O método de Penman-Monteith – FAO 56 foi adotado como padrão para testar a ET_0 com os demais métodos, conforme proposto por Smith (1991) e Allen et al. (1998).

Os valores de ET_0 estimados pelos métodos de Penman-Monteith – FAO 56, Penman Modificado, Radiação e Hargreaves-Samani foram obtidos com o uso do aplicativo computacional REF-ET (ALLEN, 2000). No entanto, o coeficiente do tanque Classe A foi calculado com a equação proposta por Allen e Pruitt (1991), adotando-se uma bordadura fixa de 5 m.

A análise do desempenho do Irrigâmetro foi feita comparando-se os valores de evapotranspiração de referência obtidos no aparelho com os estimados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi proposta por Allen et al. (1986) e adotada por Jensen et al. (1990), a qual se fundamenta na estimativa do erro-padrão (EEP), calculada pela equação:

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

em que:

EEP = estimativa do erro-padrão, mm d^{-1} ;

y = evapotranspiração de referência estimada pelo método-padrão, mmd^{-1} ;

\hat{y} = evapotranspiração de referência obtida pelo método considerado, mm d^{-1} ; e

n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita baseando-se nos valores de estimativa do erro-padrão, do coeficiente de determinação (r^2) e do coeficiente angular (b) das respectivas regressões lineares simples.

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação, a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A aproximação dos valores de ET_0 estimados por determinado método estudado, em relação aos valores obtidos com uso do método-padrão, foi obtida por um índice, designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam desde zero, em que não existe concordância, a 1, para a concordância perfeita.

O índice de concordância é calculado aplicando-se a seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (2)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

P_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método considerado, $mm\ d^{-1}$;

O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, $mm\ d^{-1}$;

\bar{O} = média dos valores de ET_0 obtida pelo método-padrão, $mm\ d^{-1}$; e

n = número de observações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 2 e 3 encontram-se os valores médios diários dos elementos meteorológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência, obtidos durante o período estudado.

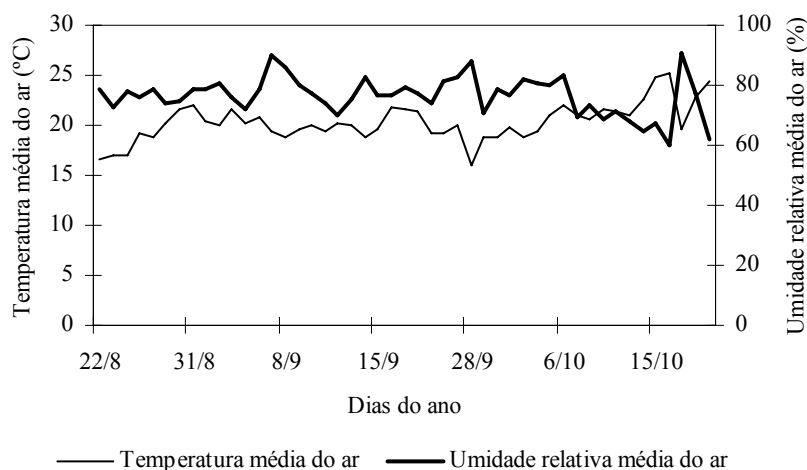


Figura 2 – Valores diários da temperatura e da umidade relativa média do ar.

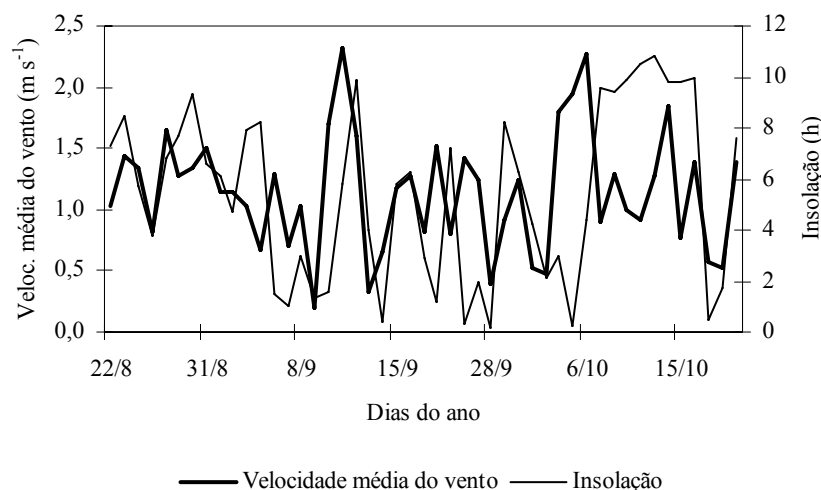


Figura 3 – Valores diários da velocidade média do vento e da insolação.

Durante a condução do experimento, observou-se pequena variação nos valores da umidade relativa e da temperatura média do ar. Na Figura 2, a umidade relativa média diária foi superior a 70%, classificada como alta, e a temperatura média diária foi de 20,5 °C. Na Figura 3, a velocidade média do vento foi inferior a 2 m s⁻¹, considerada leve, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977).

O Irrigâmetro é um aparelho que possibilita obter diretamente a evapotranspiração de referência, não necessitando de medição de elementos climáticos e de cálculos ou uso de programas computacionais.

Na Tabela 1, encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b), o coeficiente de determinação (r²), a estimativa do erro-padrão (EEP) e o índice de concordância (d), obtidos entre os valores de ET₀ estimado no Irrigâmetro e pelos demais métodos estudados, com os valores estimados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos diários.

Tabela 1 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r²), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET₀, para períodos diários

Método	a	b	r ²	EEP	d	ET ₀ (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						3,24
Penman Modificado	-0,917	1,348	0,98	0,44	0,96	3,45
Hargreaves-Samani	1,574	0,839	0,76	1,17	0,75	4,29
Radiação	-1,033	1,429	0,97	0,60	0,94	3,60
Tanque Classe A	0,000	0,876	0,98	0,62	0,89	2,86
Irrigâmetro	0,000	1,056	0,98	0,53	0,93	3,44

Na Tabela 1, o método de Penman Modificado, que leva em consideração os aspectos aerodinâmicos e de radiação, apresentou boa estimativa da ET_0 , com erro-padrão de $0,44 \text{ mm d}^{-1}$, obtendo-se um valor médio de ET_0 próximo ao determinado pelo método de Penman-Monteith – FAO 56. Ao contrário, o método de Hargreaves-Samani e o da Radiação apresentaram erros-padrão de estimativa de $1,17$ e $0,60 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente, superestimando a evapotranspiração de referência. De acordo com Jensen et al. (1990), os métodos que se baseiam na temperatura do ar e na radiação, como é o caso de Hargreaves-Samani, tendem a superestimar a evapotranspiração de referência em 15 a 25% em climas úmidos. Resultados similares também foram encontrados por Souza e Yoder (1994) no interior do Ceará. Quanto ao método da Radiação, observa-se que seu resultado foi satisfatório, apresentando estimativa do erro-padrão de $0,60 \text{ mm d}^{-1}$, corroborando com resultados obtidos por Oliveira e Carvalho (1998), nos Municípios de Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. Lunardi et al. (1999) verificaram superestimativa da ET_0 com o uso do método da Radiação em Botucatu, Estado de São Paulo. Isso indica que esse método necessita de calibrações locais para estimativa confiável da ET_0 .

O tanque Classe A apresentou resultados satisfatórios para períodos diários, com erro-padrão de $0,62 \text{ mm d}^{-1}$, apesar de ser recomendado, de maneira generalizada, para períodos de tempo superiores a 10 dias para estimativa da ET_0 (SEDIYAMA, 1996).

O Irrigâmetro apresentou valores de evapotranspiração de referência próximos dos obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, com estimativa do erro-padrão igual a $0,53 \text{ mm d}^{-1}$.

A análise dos valores do coeficiente angular, de determinação e do índice de concordância, e da estimativa do erro-padrão, indica que o Irrigâmetro e o método de Penman Modificado foram, dentre os métodos estudados, os que melhor estimaram a ET_0 com base no método-padrão, apresentando superestimativa média de 5,6%. Assim, o Irrigâmetro apresentou resultados confiáveis de estimativa da ET_0 para períodos diários, que associados ao baixo custo, à alta praticidade e à dispensa de cálculos tornam-no indicado para fins de manejo da água de irrigação.

Na Figura 4, encontram-se as equações de regressão, o coeficiente de determinação e os valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

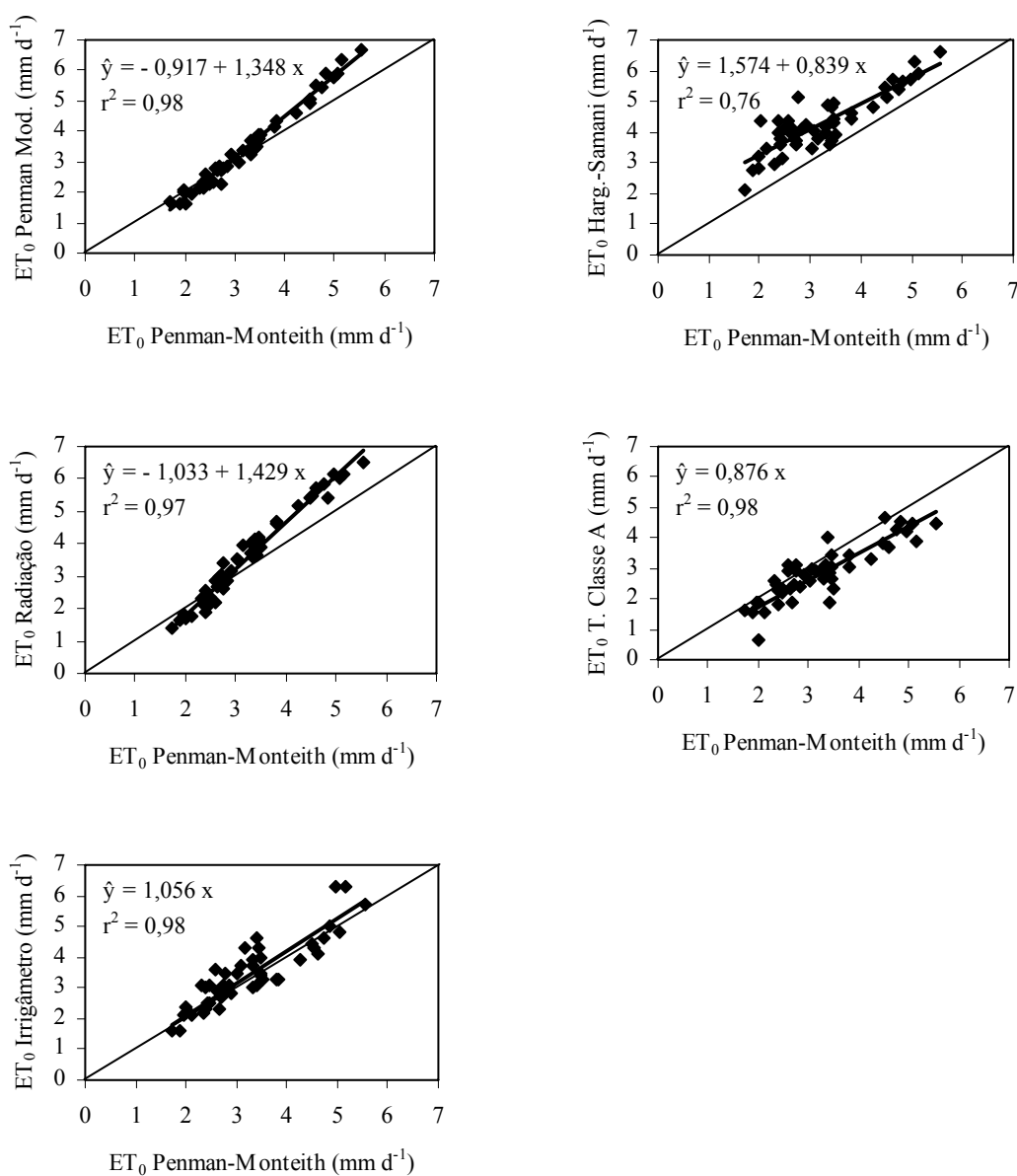


Figura 4 – Evapotranspiração de referência (ET₀) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo Irrigâmetro, em comparação com os valores de ET₀ obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos diários.

Os métodos de Penman Modificado e o da Radiação subestimaram a ET₀ com valores menores que 3 mm d⁻¹ e superestimaram-na com valores maiores. O método de Hargreaves-Samani superestimou a ET₀, ocorrendo comportamento contrário com o uso do tanque Classe A.

Na Figura 4 observa-se que a linha de tendência para o Irrigâmetro praticamente acompanha a linha de valores 1:1, apresentando melhor desempenho do que os outros métodos considerados neste estudo, tendo por base o método de Penman-Monteith – FAO 56. Com relação a valores superiores a 5 mm d⁻¹, ocorreu maior dispersão dos dados de evapotranspiração de referência, sendo necessário avaliar o aparelho em condições climáticas com maior demanda hídrica e período de tempo maior que os 47 dias usados neste trabalho.

As comparações dos métodos nos períodos de três, cinco e sete dias seguiram a mesma metodologia estatística aplicada na escala diária, sendo apresentadas nas Tabelas 2, 3 e 4, respectivamente.

Tabela 2 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r²), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET₀, para períodos de três dias

Método	a	b	r ²	EEP	d	ET ₀ (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						3,23
Penman Modificado	-0,933	1,350	0,99	0,35	0,96	3,43
Hargreaves-Samani	1,298	0,935	0,85	1,16	0,67	4,32
Radiação	0,958	1,403	0,97	0,51	0,93	3,57
Tanque Classe A	0,000	0,889	0,99	0,46	0,89	2,89
Irrigâmetro	0,000	1,079	0,99	0,40	0,93	3,50

Tabela 3 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r²), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET₀, para períodos de cinco dias

Método	a	b	r ²	EEP	d	ET ₀ (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						3,26
Penman Modificado	-1,132	1,442	0,91	0,56	0,90	3,57
Hargreaves-Samani	1,004	1,031	0,99	1,20	0,67	4,36
Radiação	-0,711	1,320	0,99	0,45	0,93	3,59
Tanque Classe A	0,000	0,894	0,99	0,45	0,88	2,93
Irrigâmetro	0,000	1,069	0,99	0,35	0,94	3,49

Tabela 4 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 , para períodos de sete dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						3,25
Penman Modificado	-0,847	1,323	0,99	0,32	0,96	3,46
Hargreaves-Samani	1,055	1,012	0,89	1,21	0,67	4,34
Radiação	0,000	1,117	0,99	0,48	0,93	3,60
Tanque Classe A	0,000	0,889	0,99	0,42	0,90	2,90
Irrigâmetro	0,000	1,068	0,99	0,28	0,97	3,48

Nas Tabelas 2, 3 e 4 observa-se que o agrupamento da ET_0 em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente, resultou em aumento dos coeficientes de determinação e de concordância, com valores mais próximos da unidade, e em redução da estimativa do erro-padrão, com valores mais próximos de zero, na maioria dos métodos estudados, comparativamente ao período de tempo diário.

Em períodos de três, cinco e sete dias, o Irrigâmetro apresentou valores da estimativa do erro-padrão iguais a 0,40; 0,35; e 0,28 mm d⁻¹ e índice de concordância iguais a 0,93; 0,94; e 0,97, respectivamente, indicando melhor desempenho para estimativa da ET_0 , diante dos demais métodos estudados.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as equações de regressão, o coeficiente de determinação e os valores de ET_0 estimados pelos métodos estudados e pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente.

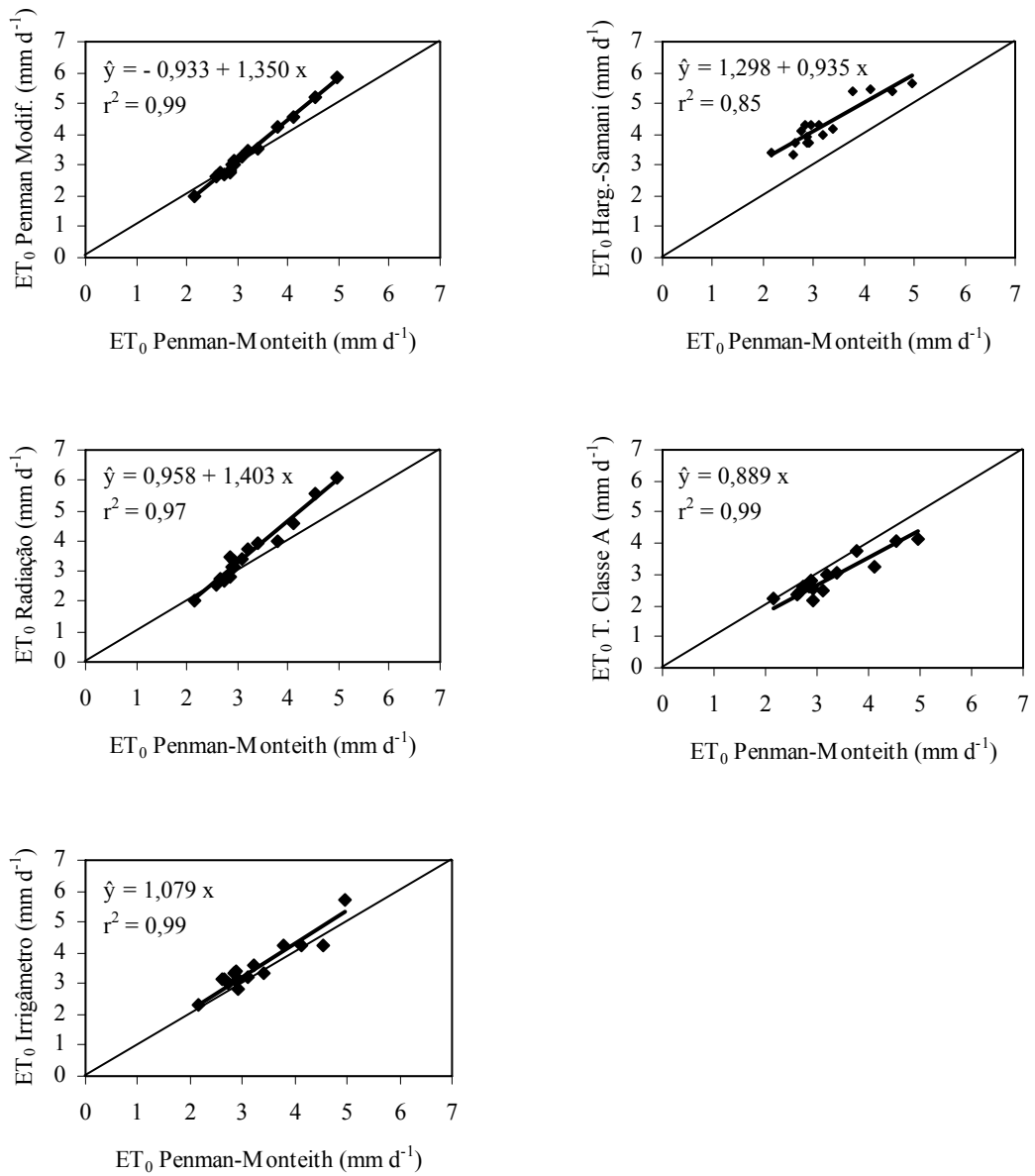


Figura 5 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo Irrigâmetro, em comparação com os valores de ET_0 obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de três dias.

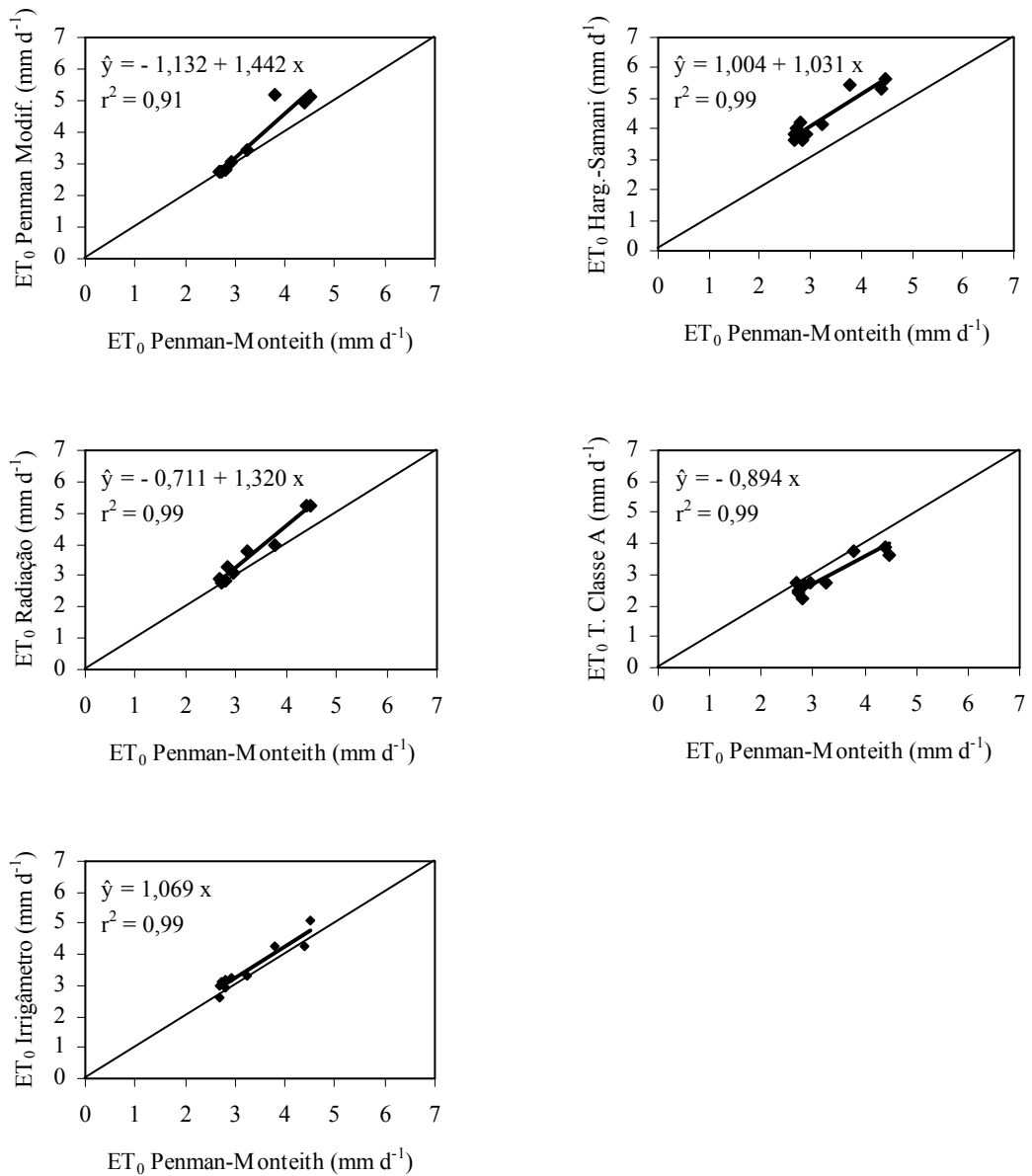


Figura 6 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo Irrigâmetro, em comparação com os valores de ET_0 obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de cinco dias.

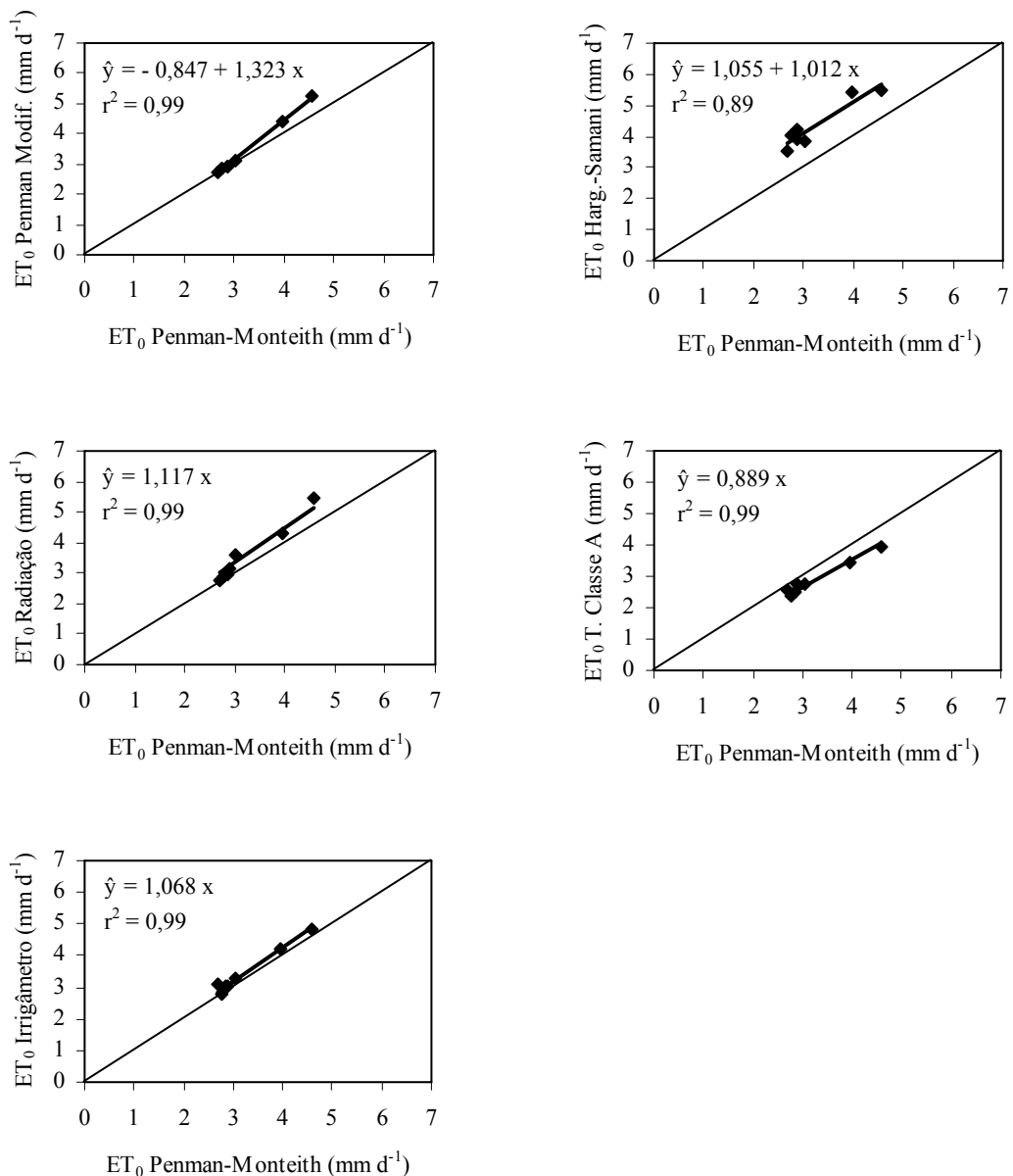


Figura 7 – Evapotranspiração de referência (ET₀) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo Irrigâmetro, em comparação com os valores de ET₀ obtidos pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de sete dias.

A análise das Figuras 5, 6 e 7 indica que o agrupamento dos valores de ET₀ em períodos maiores tende a melhorar a estimativa da ET₀, tendo sido mantido o mesmo comportamento dos métodos estudados. O método de Hargreaves-Samani foi, dentre os métodos estudados, o que mais superestimou a ET₀, independentemente do intervalo de tempo estudado. Jensen et al. (1990) encontraram boas estimativas de ET₀ pelo método de Hargreaves-Samani para intervalos de tempo maiores do que 10 dias.

O tanque Classe A apresentou melhoria na estimativa da ET_0 para intervalos de sete dias, apresentando maior precisão, comparativamente aos demais períodos de tempo analisados (JENSEN et al.,1990; DOORENBOS e PRUITT, 1977).

Nos intervalos de tempo analisados, o Irrigâmetro apresentou valores médios de evapotranspiração de referência praticamente iguais aos valores obtidos pelo método-padrão, tornando-o indicado para o manejo da água na agricultura irrigada.

4. CONCLUSÕES

1. O Irrigâmetro apresentou desempenho adequado, comparativamente ao método de Penman-Monteith – FAO 56, para estimar a ET_0 nas escalas de um, três, cinco e sete dias.
2. O Irrigâmetro pode ser recomendado para o manejo da água na agricultura irrigada.
3. Os métodos de Penman Modificado e da Radiação subestimaram a ET_0 obtida pelo método de Penman-Monteith – FAO 56 para valores menores que 3 mm d^{-1} , apresentando comportamento contrário para valores maiores.
4. O método de Hargreaves-Samani superestimou a ET_0 obtida pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, em todos os intervalos de tempo analisados, verificando-se comportamento contrário para o tanque Classe A.

5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 4, p. 348-386, 1986.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

ALLEN, R.G. **REF-ET**: Reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, New York, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

LEY, T.W.; HILL, R.W.; JENSEN, D.T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 6, p. 1853-1861, 1994a.

LEY, T.W.; HILL, R.W.; JENSEN, D.T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: II. Effects of weather sensor measurement variability. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 6, p. 1863-1870, 1994b.

LUNARDI, M.A.; LUNARDI, D.M.C.; CAVATI, N. Comparação entre medidas evapotranspirométricas e metodológicas da FAO, na determinação da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 1, p. 52-66, 1999.

MAÑAS, F.M.; VALERO, J.A. **Agronomía del riego**. Madrid: Mundi-Prensa, 1993. 732 p.

OLIVEIRA, M.A.A. de; CARVALHO, D.F. de. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 132-135, 1998.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1996. 176 p.

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

SOUZA, F. de; YODER, R. ET estimation in the Northeast of Brazil: Hargreaves or Penman-Monteith equation. **Transaction of ASAE**, ST. Joseph: ASAE, 1994. 6 p. (ASAE – Paper, 942545).

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for evaluation and comparisons of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

CAPÍTULO II – INFLUÊNCIA DA PRESENÇA DA BORDADURA E DA PROFUNDIDADE DOS NÍVEIS DE ÁGUA NA EVAPORAÇÃO OBTIDA NOS MINIEVAPORÍMETROS OPERANDO COM IRRIGÂMETRO MODIFICADO

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência pode ser determinada por evaporímetros de diversos tipos, referentes à forma, à dimensão, ao material de constituição e ao volume de água armazenado. O evaporímetro de Piche e o tanque Classe A se destacam por serem de uso mais fácil quando comparado com os modelos usados para estimar a demanda evaporativa da atmosfera ou a evapotranspiração de referência (VALERO e MAÑAS, 1993).

A evaporação é um processo físico dependente da energia disponível no ambiente. A medida da evaporação de uma superfície de água-livre, de acordo com Valero e Mañas (1993), deve integrar as diferentes condições climáticas que influenciam o processo da evapotranspiração.

A avaliação quantitativa da evaporação de água de superfícies naturais é importante para o planejamento, construção e operação de reservatórios, represas e sistemas de irrigação e drenagem. Gangopadhyaya et al. (1966) e Hounam (1973) descreveram diversos tipos de tanques evaporimétricos usados para medir a evaporação da água de superfícies naturais, incluindo-se os tanques de 20 m², GGI 3000, Colorado, BPI e Classe A. De acordo com esses autores, a evaporação que ocorre nos tanques maiores, por exemplo o de 20 m², aproxima-se da que acontece nos lagos naturais, enquanto nos menores ela é superestimada, necessitando de um coeficiente de correção ou de ajuste, obtido pela relação com o tanque de 20 m², usado como padrão (SLEIGHT, 1917; GANGOPADHYAYA et al., 1966). De modo semelhante, estudos posteriores foram conduzidos por Doorenbos e Pruitt (1977), visando converter a evaporação obtida em tanques menores, como o Classe A e o Colorado, em evapotranspiração de referência, com o uso de coeficientes dependentes do tamanho, da forma e das condições de instalações do tanque, além condições climáticas locais.

Diversos autores relataram a metodologia usada para a determinação da evapotranspiração de referência a partir da evaporação medida no tanque Classe

A. No entanto, são poucas as informações sobre a influência da variação do nível da água dentro do tanque sobre a evaporação, assim como a utilização de bordadura constituída por água, usada ao redor do evaporatório.

Sleight (1917) trabalhando com tanques enterrados e com área fixa, correspondente ao diâmetro de 0,61 m, mas variando a profundidade do tanque de 0,08 até 1,75 m, verificou que não houve diferença significativa nas taxas de evaporação. No entanto, Hounam (1973) e Kohler e Parmele (1967) afirmaram que, devido à capacidade dos lagos profundos em armazenar calor, a profundidade do lago exerce influência na variação diária e sazonal da taxa de evaporação. Em lagos pequenos e rasos, assim como os diversos tipos de evaporímetros, o processo de evaporação é controlado pelo balanço de radiação, pela temperatura do ar próximo à superfície evaporante, pela velocidade do vento e pela umidade relativa, de modo que, nos períodos em que a radiação e a temperatura alcançam valores máximos e mínimos, a evaporação simultaneamente atinge taxas extremas.

Deacon et al. (1958), avaliando a evaporação ocorrida em evaporímetros, tanques e lagos, bem como o processo físico da evaporação, demonstraram que a taxa de evaporação decresce com o aumento da superfície evaporante.

Na literatura não foram encontradas informações sobre tanques circundados por bordadura formada por água e, principalmente, por seus efeitos na evaporação. As bordaduras são de grama ou de solo descoberto, circundando o tanque Classe A, cuja finalidade é evitar que a advecção de calor sensível influencie significativamente o processo de evaporação ou evapotranspiração, principalmente em regiões áridas (MONTENY, 1972; ROSENBERG, 1972; PRUEGER et al., 1996).

Outro aspecto importante que deve ser considerado na instalação dos tanques evaporimétricos, como o Classe A, é a altura de exposição sobre o solo. Estudos conduzidos por Pruitt, citado por Camargo e Camargo (2000), em regiões de clima árido nos Estados Unidos apontaram que, quando o tanque Classe A foi montado elevado cerca de 40 cm de altura, a evaporação foi de 1.081 mm, em um ano. No mesmo tanque quando enterrado e com superfície evaporante ao nível do solo, a evaporação foi de 834 mm, 23% a menos. De

acordo com Camargo e Camargo (2000), a maior evaporação nos tanques elevados se deve, certamente, à grande exposição de suas paredes à radiação solar e ao vento.

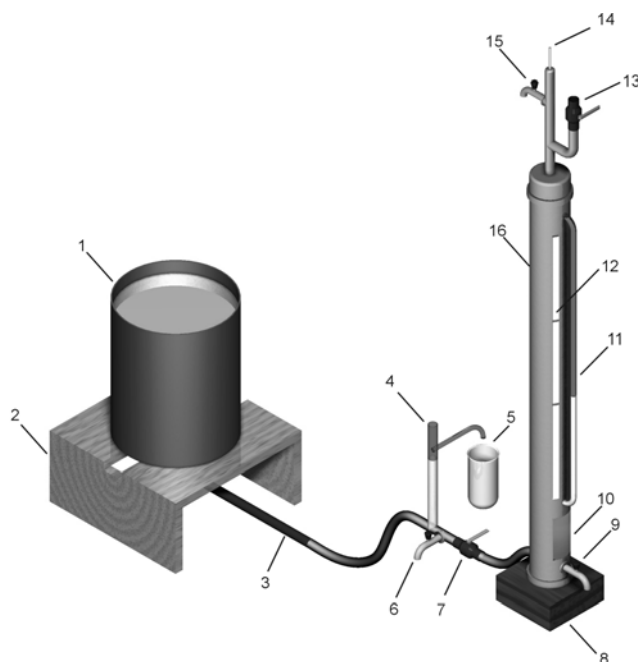
Neste trabalho, objetivou-se avaliar a influência de bordadura com água e diferentes profundidades do nível de água dentro do evaporatório dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 sobre a evaporação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em Viçosa, MG, situada a 20° 45' de latitude Sul e 42° 51' de longitude Oeste, numa altitude de 651 m. Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no Campus da UFV, próximo à área experimental.

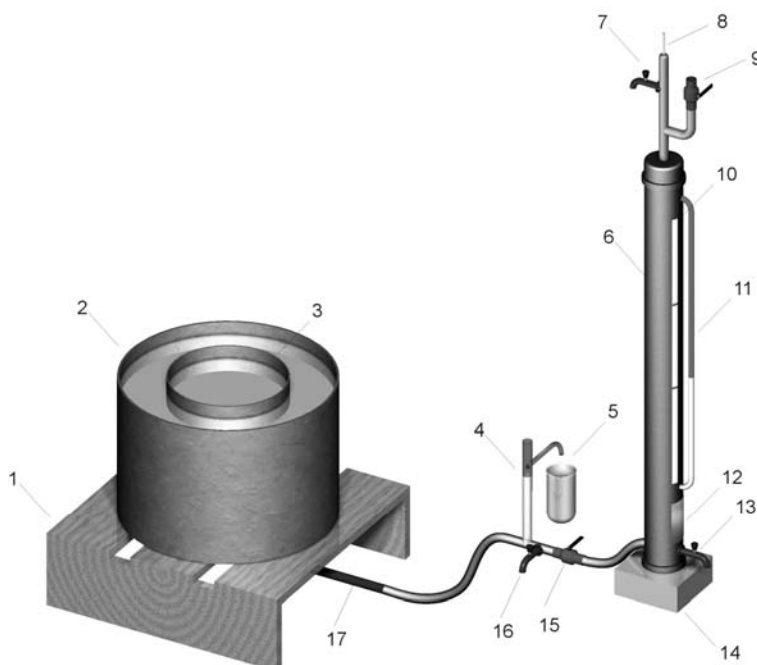
A evaporação foi determinada utilizando-se os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 e o tanque Classe A, ambos circundados com grama-batatais.

O minievaporímetro UFV-1 (Figura 1) operou como evaporatório de um Irrigâmetro modificado, sendo constituído por um recipiente cilíndrico de PVC, com diâmetro externo de 250 mm e interno de 244 mm, altura de 320 mm e fundo localizado a 255 mm da borda. Por sua vez, o minievaporímetro UFV-2 (Figura 2) é dotado, também, de um evaporatório igual ao do UFV-1, possuindo, no entanto, outro recipiente cilíndrico de PVC de mesma altura, com diâmetro externo de 450 mm e interno de 440 mm, o qual também armazena água, formando uma bordadura. Os dois minievaporímetros foram montados sobre estrado de madeira com 150 mm de altura.



1. Evaporatório; 2. Estrado; 3. Tubo interconector; 4. Tubo pluvial; 5. Coletor; 6. Válvula pluvial; 7. Válvula interconectora; 8. Suporte; 9. Válvula de drenagem; 10. Visor; 11. Piezômetro; 12. Escala de leitura; 13. Válvula de abastecimento; 14. Tubo de borbulhamento; 15. Válvula de eliminação de ar; e 16. Tubo de alimentação

Figura 1 – Minievaporímetro UFV-1 atuando como evaporatório de um Irrigâmetro modificado.



1 - Estrado; 2. Bordadura; 3. Evaporatório; 4. Tubo pluvial; 5. Coletor; 6. Tubo de alimentação; 7. Válvula de eliminação de ar; 8. Tubo de borbulhamento; 9. Válvula de abastecimento; 10. Escala de leitura; 11. Piezômetro; 12. Visor; 13. Válvula de drenagem; 14. Suporte; 15. Válvula interconectora; 16. Válvula pluvial; e 17. Tubo interconector

Figura 2 – Minievaporímetro UFV-2 atuando como evaporatório de um Irrigâmetro modificado.

O fundo do evaporatório de cada minievaporímetro foi conectado ao Irrigâmetro modificado, por meio de um tubo flexível de polietileno. O Irrigâmetro modificado foi construído com tubo de leitura-alimentação de diâmetro interno de 72 mm e altura de 1 m e com escala graduada em milímetros. A relação entre as áreas internas do evaporatório e do tubo de leitura-alimentação do Irrigâmetro modificado, igual a 11,6, possibilitou uma sensibilidade na leitura da lâmina evaporada igual a 0,086 mm. A evaporação foi obtida diretamente numa escala existente no aparelho, pela diferença entre duas leituras consecutivas num período de 24 horas.

Na extremidade inferior do tubo de leitura-alimentação existe uma válvula de drenagem, usada para retirar a água do tubo de borbulhamento e o excesso do tubo de leitura-alimentação, a fim de zerar o aparelho. Na parte superior existem as válvulas de eliminação de ar e a de abastecimento.

Durante o reabastecimento do tubo de leitura-alimentação, a válvula interconectora deve estar fechada e as de eliminação de ar e de abastecimento, abertas. Após o reabastecimento, as duas últimas válvulas são fechadas, abrindo-se a válvula de drenagem até zerar o aparelho. Em seguida, é restabelecido o seu funcionamento normal, por meio da abertura da válvula interconectora.

Em cada nível de água estudado, a superfície líquida na bordadura foi mantida aproximadamente igual à do evaporatório, por meio de reposição manual todos os dias pela manhã.

A ocorrência de chuva eleva o nível da água no evaporatório e, dependendo da sua magnitude, parte dela era drenada para o coletor, por meio do tubo pluvial. O restabelecimento do nível de água original no evaporatório era feito abrindo-se a válvula de drenagem até verificar a iminência do desprendimento de bolha de ar na extremidade inferior do tubo de borbulhamento.

A evaporação nos minievaporímetros UFV-1 (EV_{ME1}) e UFV-2 (EV_{ME2}) foi obtida com níveis de água no evaporatório mantidos constantes pelo irrigâmetro modificado, nas profundidades de 30, 45, 60 e 75 mm da borda. A medição da lâmina evaporada nos minievaporímetros e no tanque Classe A foi feita diariamente às nove horas da manhã, durante os meses de junho a dezembro de

2005. Na análise dos resultados foram excluídos os dias com ocorrência de precipitação pluvial, pois a chuva afeta a leitura da lâmina evaporada e, conseqüentemente, a qualidade dos dados.

Para analisar a influência da profundidade dos níveis de água na evaporação nos minievaporímetros, o experimento foi montado em esquema fatorial 4 x 2 (quatro níveis de água e dois tipos de minievaporímetros), no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, conforme ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – Minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 instalados na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro.

Os dados de evaporação foram submetidos à análise de variância e de regressão. Para o fator qualitativo, as médias foram comparadas utilizando-se o teste F e adotando o nível de 5% de probabilidade. Para o fator quantitativo, os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste “t” e adotando o nível de 5% de probabilidade, no coeficiente de determinação (r^2) e no fenômeno em estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4, 5 e 6 encontram-se os valores médios diários dos elementos climáticos obtidos durante o período estudado.

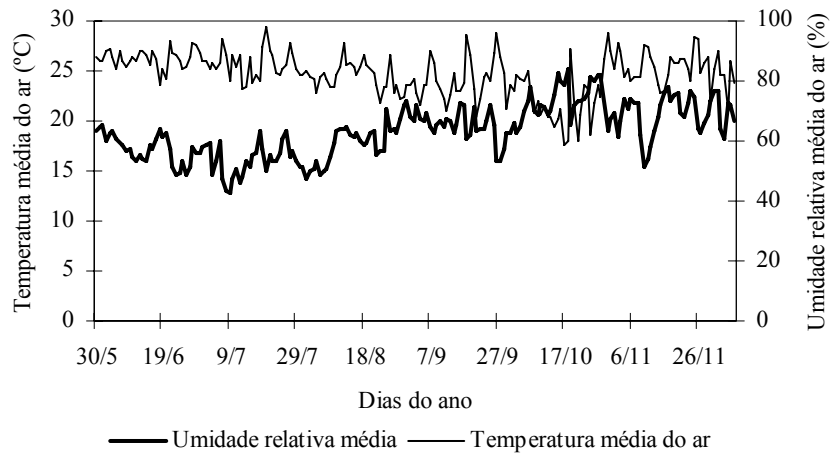


Figura 4 – Valores diários da umidade relativa e da temperatura média do ar obtidos durante o período estudado.

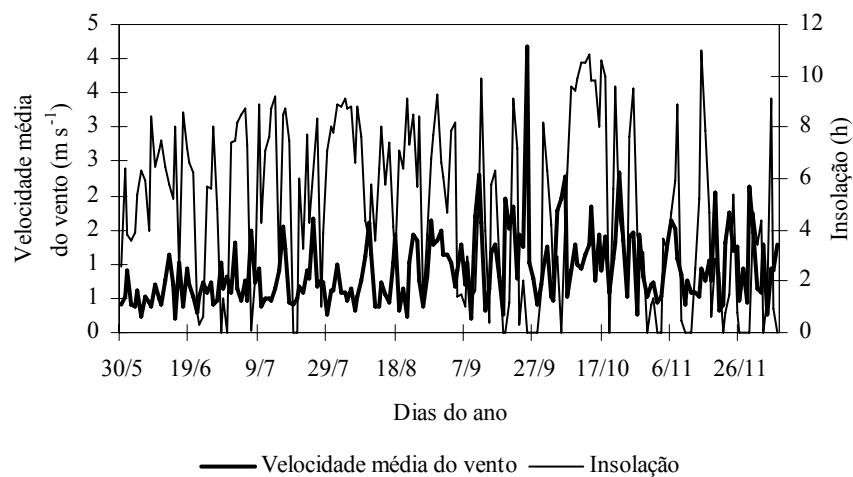


Figura 5 – Valores diários da velocidade média do vento e da insolação obtidos durante o período estudado.

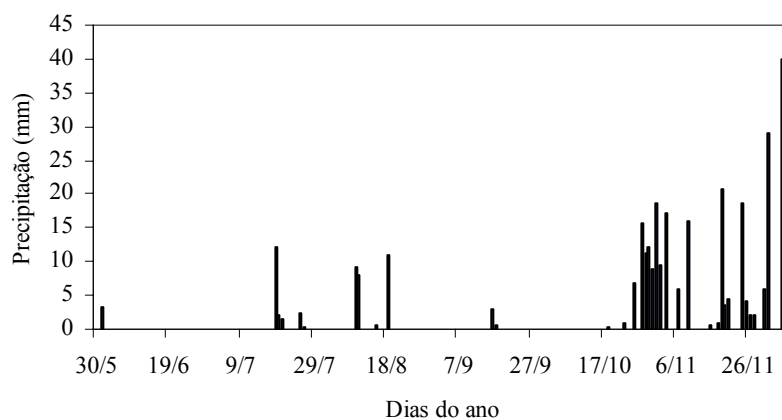


Figura 6 – Valores diários de precipitação obtidos durante o período estudado.

A evaporação da água é dependente do suprimento de calor (radiação), da temperatura do ar, do déficit de pressão atual de vapor sobre a superfície evaporante e da velocidade do vento. De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5, a umidade relativa média diária foi superior a 70%, a temperatura média diária ficou em torno de 20 °C e a velocidade média do vento foi inferior a 2 m s⁻¹.

A influência isolada dos elementos meteorológicos na evaporação de superfícies água-livre, como nos tanques evaporimétricos, é difícil de ser quantificada. Hounam (1973) citou que a evaporação da água em tanques não é função apenas das condições climáticas durante determinado período, mas também das características do reservatório e do calor advectivo provenientes de áreas secas adjacentes. Essas características se inter-relacionam com as condições climáticas, dificultando a medição da sua influência na evaporação.

Na Tabela 1 encontra-se o resumo da análise de variância dos fatores profundidades do nível de água e tipos de minievaporímetros.

Tabela 1 – Resumo da análise de variância das variáveis profundidades do nível de água e tipos de minievaporímetros

Fonte de Variação	GL	QM
Profundidades do nível de água	3	0,3047*
Minievaporímetro	1	7,3532*
Profundidades do nível de água x Minievaporímetro	3	0,001467 ^{ns}
Resíduo	16	0,005384
Coefficiente de variação (%)		1,60

*significativo a 5% de probabilidade, pelo teste F.

^{ns}não-significativo a 5% de probabilidade.

A evaporação foi afetada significativamente pelos níveis de água e pelos tipos de minievaporímetro. Apesar de a interação não apresentar diferença significativa em nível de 5% de probabilidade, neste estudo optou-se por fazer o desdobramento da interação estudando cada fator dentro do outro.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios da evaporação obtidos nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, em cada nível de água estudado.

Tabela 2 – Valores médios da evaporação obtidos nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, com níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda

Minievaporímetro	Profundidades dos Níveis de Água			
	30 mm	45 mm	60 mm	75 mm
	Evaporação (mm dia ⁻¹)			
UFV-1	5,45 A	5,19 A	5,03 A	4,90 A
UFV-2	4,29 B	4,11 B	3,94 B	3,81 B

As médias seguidas de pelo menos uma letra na coluna não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

O uso do Irrigâmetro modificado proporcionou sensibilidade na leitura suficiente para detectar diferenças significativas entre as lâminas evaporadas nos dois tipos de minievaporímetros estudados. De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, a presença de bordadura no minievaporímetro UFV-2 teve efeito significativo na redução da evaporação, comparativamente à ausência de bordadura no UFV-1, com valor médio de 1,10 mm d⁻¹ entre os diversos níveis de água estudados. A bordadura no minievaporímetro UFV-2 tem a função de evitar a incidência direta dos raios solares na parede do evaporatório, reduzindo, conseqüentemente, a transferência de calor recebido por essa parede para a massa de água no interior do evaporatório.

No minievaporímetro UFV-1, a parede do tanque fica exposta à radiação, absorvendo calor que, posteriormente, é transmitido para a massa de água, o qual modifica o balanço de radiação, provocando maiores valores de evaporação. Essa transferência de calor é mais intensa no tanque Classe A, por ser de aço inox, material com alta condutibilidade térmica. Dightman (1960) e Oroud (1998), trabalhando com tanques enterrados (Bureau of Plant Industry – BPI) e com o tanque Classe A, encontraram valores de evaporação do tanque BPI menor do que os obtidos no tanque Classe A. Segundo esses autores, o tanque Classe A está mais exposto à radiação do que o BPI, absorvendo grande quantidade de calor pelas paredes do tanque, o que acarreta maiores valores de evaporação.

Os resultados apresentados na Tabela 2 evidenciam o efeito significativo das profundidades dos níveis de água nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, em que a variação total de 30 para 75 mm na profundidade do nível de água reduziu a evaporação de 5,45 para 4,90 mm d⁻¹ no minievaporímetro UFV-1 e de 4,29 para 3,81 mm d⁻¹ no minievaporímetro UFV-2, representando 11,22 e

12,6%, respectivamente. Quando o nível da água se encontra próximo à superfície, ocorre maior interceptação da radiação solar, variável que apresenta maior influência no processo de evaporação (CHANG, 1971), ao mesmo tempo em que favorece a ação do vento, atuando na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante. Ao contrário, quando o nível da água se encontra mais distante da borda do evaporatório, aumenta o sombreamento da água contida no seu interior, em certas horas do dia, resultando em menor evaporação.

As Figuras 7 e 8 apresentam o comportamento da evaporação em função das profundidades do nível de água nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, respectivamente.

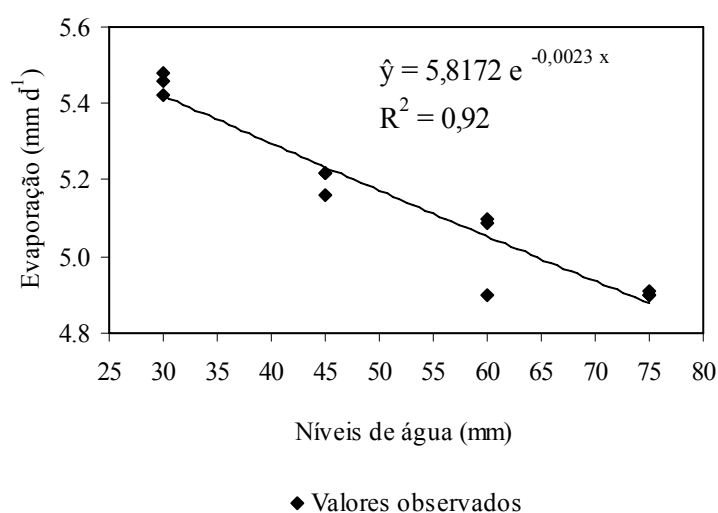


Figura 7 – Estimativa da evaporação em função da profundidade dos níveis de água no minievaporímetro UFV-1.

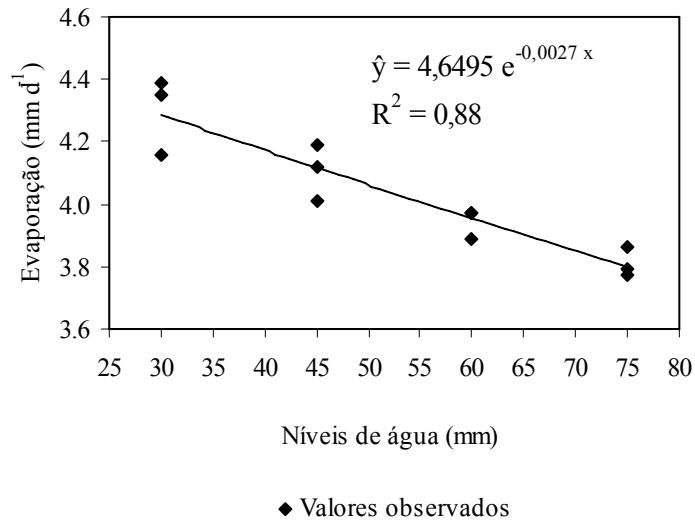


Figura 8 – Estimativa da evaporação em função da profundidade dos níveis de água no minievaporímetro UFV-2.

Observa-se nas Figuras 7 e 8 que a evaporação diminuiu à medida que aumentou a profundidade do nível de água nos dois tipos de minievaporímetros. A redução da evaporação dentro dos intervalos de profundidades de nível de água estudado apresentou comportamento linear, tendendo ao exponencial. No entanto, como o perfil do vento acima da superfície do solo é logarítmico, o modelo exponencial foi escolhido por representar melhor o fenômeno estudado.

Nas Figuras 9 a 12 estão apresentados os valores de evaporação da água obtidos no tanque Classe A e nos minievaporímetros UFV-1 (EV_{ME1}) e UFV-2 (EV_{ME2}), nos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, respectivamente.

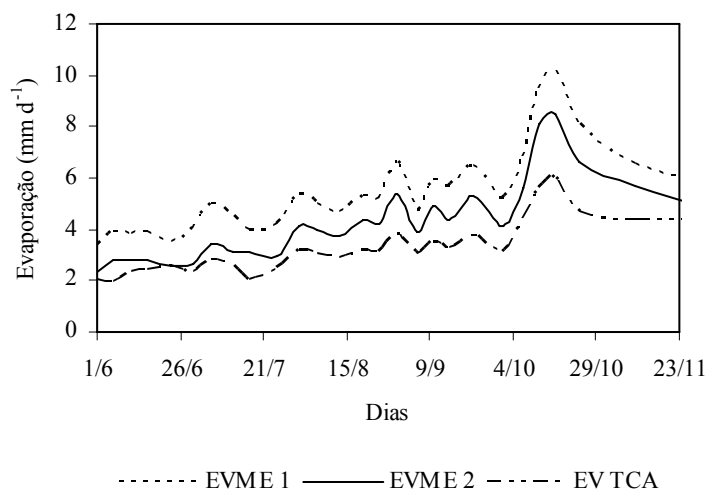


Figura 9 – Evaporação no tanque Classe A e nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, com nível de água a 30 mm da borda.

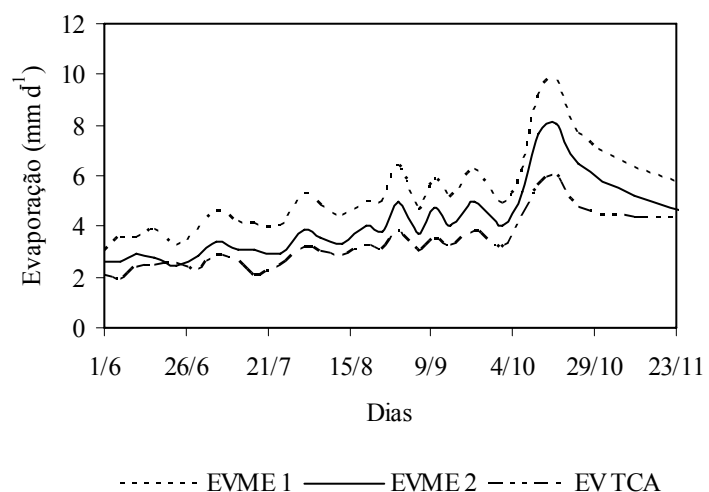


Figura 10 – Evaporação no tanque Classe A e nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, com nível de água a 45 mm da borda.

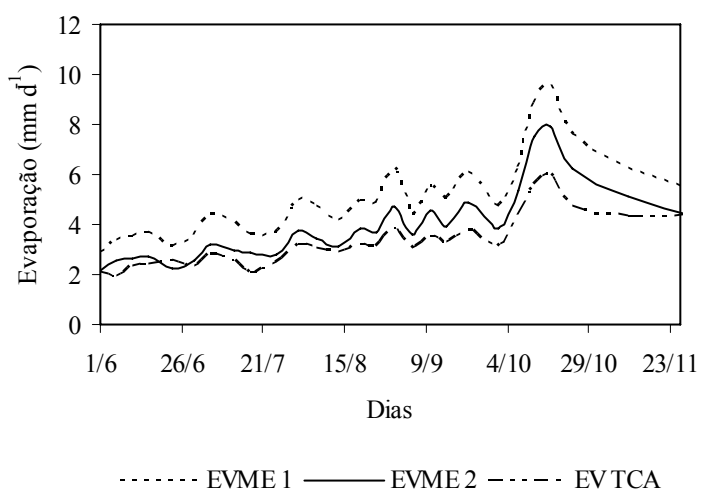


Figura 11 – Evaporação no tanque Classe A e nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, com nível de água a 60 mm da borda.

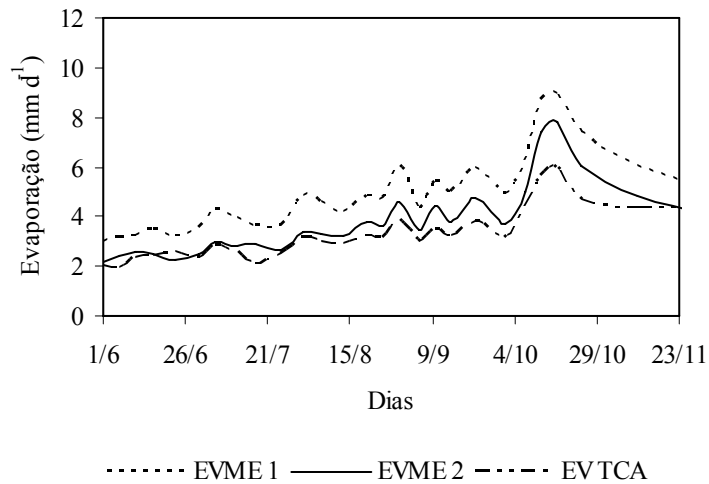


Figura 12 – Evaporação no tanque Classe A e nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, com nível de água a 75 mm da borda.

A evaporação da água ocorrida nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 e no tanque Classe A apresentou a mesma tendência, a qual não foi afetada pela redução na área exposta e pelo tipo de material do tanque. Com relação à magnitude dos valores de evaporação, verificou-se que houve aumento na evaporação obtida nos minievaporímetros, em comparação com o tanque Classe A. Sleight (1917) e Gangopadhyaya et al. (1966), em estudos conduzidos com tanque evaporimétrico de vários tamanhos, demonstraram que a evaporação decresce exponencialmente com o aumento da área exposta à atmosfera.

Os resultados observados nas Figuras 9 a 12 evidenciaram o efeito integrado da bordadura e das profundidades dos níveis de água na evaporação obtidas nos minievaporímetros. A área interna do evaporatório dos minievaporímetros é cerca de 25 vezes menor que a do tanque Classe A e, no entanto, o valor de evaporação obtido no minievaporímetro UFV-2, com nível de água igual a 75 mm da borda tendeu a se aproximar do valor obtido no tanque Classe A. A evaporação total ocorrida nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 na profundidade de 75 mm e no tanque Classe A, durante o período analisado, foi de 662,12; 513,79; e 444,11 mm, respectivamente. Assim, a evaporação ocorrida no minievaporímetro UFV-1 foi superior à do tanque Classe A em 49%, sendo de 15,7 % no minievaporímetro UFV-2.

4. CONCLUSÕES

1. A bordadura com água reduziu a evaporação no minievaporímetro UFV-2 em 1,10 mm d⁻¹, em média, nas diferentes profundidades dos níveis de água estudados, comparativamente ao minievaporímetro UFV-1.
2. À medida que aumentou a profundidade do nível de água no evaporatório dos dois tipos de minievaporímetros, a evaporação diminuiu e se aproximou do valor obtido no tanque Classe A.
3. O aumento na profundidade dos níveis de água nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 de 30 para 75 mm reduziu a evaporação de 5,45 para 4,9 mm d⁻¹ e de 4,29 para 3,81 mm d⁻¹, respectivamente.

5. REFERÊNCIAS

CAMARGO, A.P. de; CAMARGO, M.B.P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

CHANG, J. **Climate and agriculture**. Chicago: Aldine Publishing, 1971. 296 p.

DEACON, E.L.; PRIESTEY, C.H.B.; SWINBANK, W.C. Evaporation and the water balance. In: ARID ZONE RESEARCH. **Climatology: reviews of research**. Paris: UNESCO, 1958, p. 9-34.

DIGHTMAN, R.A. **Comparison of evaporation from weather bureau class A and bureau of plant industry (BPI) sunken pans, fort Assiniboine, Montana**. 1960. Disponível em: <<http://www.docs.lib.noaa.gov/rescue/mwr/088/mwr>>. Acesso em: 05 abr. 2005.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requeriment**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage – Paper 24).

GANGOPADHYAYA, M.; HARBECK, G.E.JR.; NORDENSON, T.J.; OMAR, M.H.; URYVAEV, V.A. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiratin**. Geneva: World Meteorological Organization, 1966. 121 p. (Tech. Note N° 83, WMO-N° 201, TP 105).

HOUNAM, C.E. **Comparison between pan and lake evaporation**. Geneva: World Meteorological Organization, 1973. 52 p. (Tech. Note N° 126, WMO-N° 354).

KOHLER, M.A.; PARMELE, L.H. Generalized estimates of free-water evaporation. **Water Resources Research**, Washington, v. 3, n. 4, p. 997-1005, 1967.

MONTENY, B. Evapotranspiration of diferents couverts vegetaux in region mediterranéene semi-aride. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 10, p. 19-38, 1972.

OROUD, I. M. The influence of heat conduction on evaporation from sunken pans in hot, dry environment. **Journal of Hydrology**, v. 210, n. 1, p. 1-10, 1998.

PRUEGER, J.H.; HIPPS, L.E.; COOPPER, D.I. Evaporation and development of the local boundary layer over an irrigated surface in an arid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, p. 223-237, 1996.

ROSENBERG, N.J. frequency of potential evapotranspiration rates in Central Great Plains. **Journal of Irrigation and Drainage**, New York, v. 98, n. 2, p. 203-206, 1972.

SLEIGHT, R.B. Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 10, n. 5, p. 209-262, 1917.

VALERO, J.A. de J.; MAÑAS, F.J. M. de S. O. El calculo y la estimacion de la evapotranspiracion. In: MAÑAS, F.J. M. de S.O.; VALERO, J.A. de J. **Agronomia del riego**. Madrid: Mundi-Prensa, 1993. p. 373-446.

CAPÍTULO III – DESEMPENHO DE MINIEVAPORÍMETROS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH – FAO 56

1. INTRODUÇÃO

A determinação do consumo de água de uma cultura é de fundamental importância no contexto agrícola e ambiental, podendo ser obtida a partir de medidas efetuadas no solo, na planta e nos elementos climáticos. Os métodos baseados em medidas no solo se fundamentam na determinação do seu teor de água; os que utilizam medidas na planta consideram o monitoramento do seu potencial hídrico e avaliações da resistência estomática e da temperatura da folha, dentre outros; já os métodos baseados nos elementos do clima consideram, desde simples medições da evaporação da água num tanque, como o Classe A, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (ROCHA et al., 2003).

A evaporação é um processo físico dependente da energia disponível no ambiente. A medida da evaporação de uma superfície de água-livre, de acordo com Valero e Mañas (1993), deve integrar as diferentes condições climáticas que influenciam o processo da evapotranspiração. Segundo Medeiros (2002), os principais elementos climáticos que proporcionam energia para evaporação e remoção de vapor de água a partir de superfícies evaporantes são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor. Desses, a radiação solar é o elemento de maior importância na demanda evaporativa da atmosfera.

O uso de tanque para medição da evaporação da água, para fins de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0), deve considerar as suas condições de instalação e os fatores intrínsecos ao próprio tanque. Burman e Pochop (1994), Valero e Mañas (1993) e Doorenbos e Pruitt (1977) mencionaram que o albedo, a rugosidade da superfície da água-livre, a cor do tanque, a sua forma e o nível da superfície da água-livre em seu interior produzem erros consideráveis, podendo atingir 15% no tanque Classe A quando a superfície da água fica 10 cm abaixo do nível-padrão.

Sleight (1917) trabalhando com tanques enterrados de várias dimensões, com borda a 0,08 m acima do nível do solo e profundidade da água igual a 0,83 m, mostrou que a taxa de evaporação diminui exponencialmente com o aumento da área do tanque. No tanque de 0,305 m de diâmetro, a água evaporou cerca de 55% mais do que num tanque com 3,66 m. Esse autor verificou também que, ao se manter a área fixa, com diâmetro igual a 0,61 m, mas variando a profundidade do tanque desde 0,08 e 1,75 m, não houve diferença significativa na evaporação.

Na literatura, não foram encontradas informações sobre tanques circundados por bordadura formada por água e, principalmente, seus efeitos na evaporação. As bordaduras são de grama ou de solo descoberto, circundando o tanque Classe A, tendo como finalidade evitar que a advecção de calor sensível influencie significativamente o processo de evaporação ou evapotranspiração, principalmente em regiões áridas (PRUEGER et al., 1996). Estudos conduzidos por Leitão et al. (1990) apontaram que 23% da energia utilizada na evapotranspiração da cultura de soja irrigada nas condições semi-áridas do Nordeste do Brasil foi fornecida por advecção.

O tanque Classe A é um dos métodos mais utilizados na estimativa da ET_0 para o manejo da irrigação. Ele se baseia na medição da evaporação da água num tanque padronizado, cujo valor é convertido em evapotranspiração de referência, por meio de coeficientes específicos dependentes do clima, do tipo de tanque e da bordadura circundante (DOORENBOS e PRUITT, 1977). Segundo Sedyama (1996), o maior uso desse equipamento é devido à sua praticidade e aos baixos custos de instalação e manutenção. De acordo com Smith (1991), quando bem conduzido esse método oferece resultados confiáveis na determinação da evapotranspiração de referência.

Em razão do grande número de métodos existentes para a estimativa da ET_0 , a escolha do mais adequado depende da disponibilidade de dados climatológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade – se manejo da irrigação ou pesquisa – e do custo de aquisição de equipamentos. Esses fatores têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos para determinação da evapotranspiração, para fins práticos de manejo da água de irrigação, de baixo

custo e fácil manuseio, e que tenham boa precisão e sejam fisicamente consistentes.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar o desempenho dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 em relação ao método de Penman-Monteith – FAO 56, para obter os seus coeficientes e a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0), em períodos de um, três, cinco e sete dias, e comparar o seu desempenho com o dos métodos de Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A e Hargreaves-Samani (1985).

2. MATERIAL E MÉTODOS

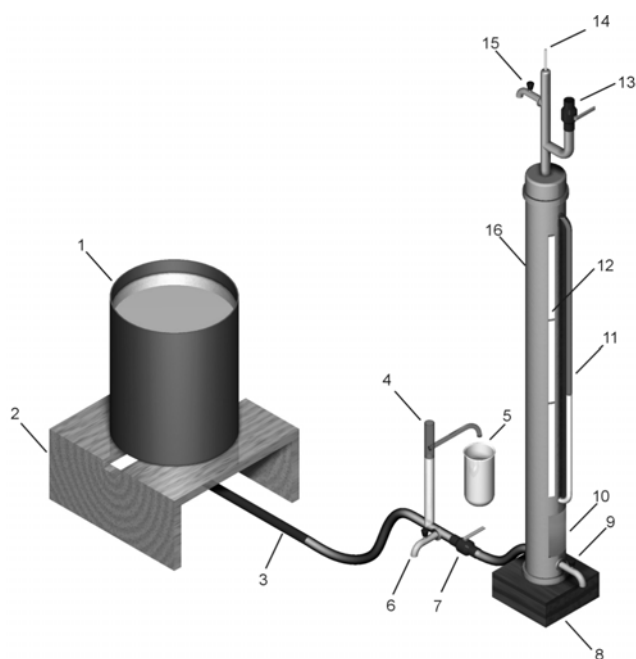
O estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, em Viçosa, MG, situada a 20° 45' de latitude Sul e 42° 51' de longitude Oeste, numa altitude de 651 m. Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica do INMET, localizada no Campus da UFV, próximo à área experimental.

A estimativa da ET_0 foi realizada utilizando-se os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, o método de Penman-Monteith – FAO 56, Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A, Hargreaves-Samani (1985) e lisímetro de drenagem. O método de Penman-Monteith – FAO 56 foi adotado como padrão para avaliar o desempenho dos demais, conforme proposto por Smith (1991) e Allen et al. (1998).

Os valores de ET_0 estimados pelos métodos de Penman-Monteith, Penman Modificado, Radiação e Hargreaves-Samani foram obtidos com o uso do aplicativo computacional REF-ET (ALLEN, 2000).

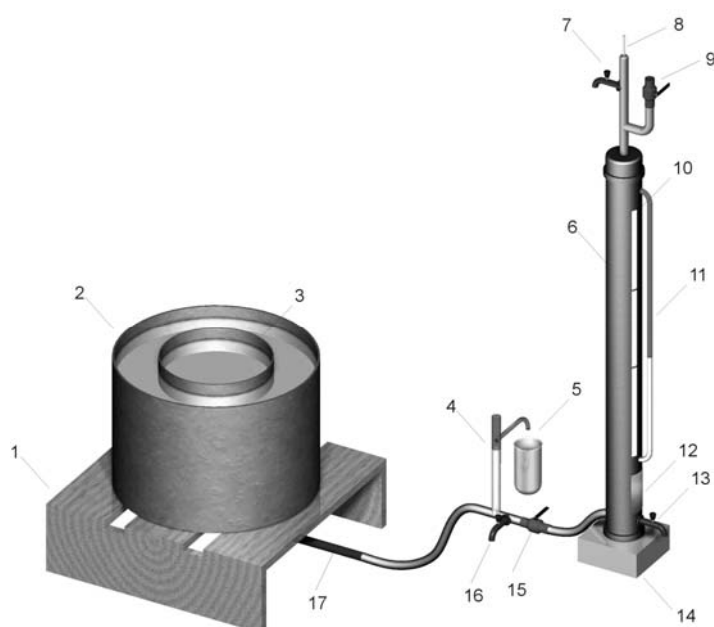
O minievaporímetro UFV-1 (Figura 1) operou como evaporatório de um Irrigâmetro modificado, sendo constituído por um recipiente cilíndrico de PVC, com diâmetro externo de 250 mm e interno de 244 mm, altura de 320 mm e fundo localizado a 255 mm da borda. Por sua vez, o minievaporímetro UFV-2 (Figura 2) é dotado, também, de um evaporatório igual ao do UFV-1, possuindo, no entanto, outro recipiente cilíndrico de PVC de mesma altura, com diâmetro externo de 450 mm e espessura igual a 5 mm, o qual também armazena água,

formando uma bordadura. Os dois minievaporímetros foram montados sobre estrado de madeira com 150 mm de altura.



1. Evaporatório; 2. Estrado; 3. Tubo interconector; 4. Tubo pluviométrico; 5. Coletor; 6. Válvula pluviométrica; 7. Válvula interconectora; 8. Suporte; 9. Válvula de drenagem; 10. Visor; 11. Piezômetro; 12. Escala de leitura; 13. Válvula de abastecimento; 14. Tubo de borbulhamento; 15. Válvula de eliminação de ar; e 16. Tubo de alimentação

Figura 1 – Minievaporímetro UFV-1 operando com Irrigâmetro modificado para a estimativa da evapotranspiração de referência.



1. Estrado; 2. Bordadura; 3. Evaporatório; 4. Tubo pluviométrico; 5. Coletor; 6. Tubo de alimentação; 7. Válvula de eliminação de ar; 8. Tubo de borbulhamento; 9. Válvula de abastecimento; 10. Escala de leitura; 11. Piezômetro; 12. Visor; 13. Válvula de drenagem; 14. Suporte; 15. Válvula interconectora; 16. Válvula pluviométrica; e 17. Tubo interconector

Figura 2 – Minievaporímetro UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado para a estimativa da evapotranspiração de referência.

O fundo do evaporatório de cada minievaporímetro foi conectado ao Irrigâmetro modificado, por meio de um tubo flexível de polietileno. Esse Irrigâmetro foi construído com tubo de leitura-alimentação de diâmetro interno de 72 mm e altura de 1 m e escala graduada em milímetros. A relação entre as áreas internas do evaporatório e do tubo de leitura-alimentação do Irrigâmetro modificado, igual a 11,6, possibilitou uma sensibilidade na leitura da lâmina evaporada igual a 0,086 mm, medida diretamente numa escala existente no aparelho. A evaporação foi obtida pela diferença entre duas leituras consecutivas, num período de 24 horas.

Na extremidade inferior do tubo de leitura-alimentação existe uma válvula de drenagem, usada para retirar a água do tubo de borbulhamento e o excesso do tubo de leitura-alimentação, a fim de zerar o aparelho. Na parte superior existem as válvulas de eliminação de ar e a de abastecimento.

Durante o reabastecimento do tubo de leitura-alimentação, a válvula interconectora deve estar fechada e as de escapamento e de abastecimento, abertas. Após o reabastecimento, as duas últimas válvulas são fechadas, abrindo-se a válvula de drenagem até zerar o aparelho. Em seguida, é restabelecido o seu funcionamento normal, por meio da abertura da válvula interconectora.

Em cada nível de água estudado, a superfície líquida na bordadura foi mantida aproximadamente igual à do evaporatório, por meio de reposição manual todos os dias pela manhã.

A ocorrência de chuva eleva o nível da água no evaporatório e, dependendo da sua magnitude, parte dela era drenada para o coletor, por meio do tubo pluvial. O restabelecimento do nível de água original no evaporatório era feito abrindo-se a válvula de drenagem até verificar a iminência do desprendimento de bolha de ar na extremidade inferior do tubo de borbulhamento.

A evaporação no minievaporímetro UFV-1 ($E_{V_{M1}}$) e no minievaporímetro UFV-2 ($E_{V_{ME2}}$) foi obtida nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda e mantida em nível constante pelo Irrigâmetro modificado, com três repetições. O coeficiente médio de cada tipo de minievaporímetro ($K_{t_{ME}}$) foi obtido em cada nível de água, com base no método de Penman-

Monteith – FAO 56, para determinação da evapotranspiração de referência (ET_0), de acordo com a equação 1.

$$Kt_{ME} = \frac{ET_0}{E_{V_{ME}}} \quad (1)$$

A ET_0 estimada com o uso dos minievaporímetros foi obtida multiplicando-se o valor diário de evaporação pelo coeficiente médio do minievaporímetro, em cada profundidade. Os valores de ET_0 de cada tipo de minievaporímetro foram posteriormente correlacionados com os estimados pelo método-padrão, nas escalas de 1, 3, 5 e 7 dias.

O coeficiente do tanque Classe A foi obtido diariamente por meio da aplicação da equação proposta por Allen e Pruitt (1991), para tanques circundados por grama, com bordadura de grama igual a 5 m. Nos períodos de 3, 5 e 7 dias, os valores de ET_0 , dos coeficientes dos minievaporímetros e do tanque Classe A foram calculados usando-se as médias dos elementos do clima.

Na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro foram instalados 16 lisímetros, três de drenagem e 13 de lençol freático constante, cultivados com grama-batatais (*Paspalum notatum* L.), inclusive a bordadura. Os lisímetros de drenagem foram construídos com caixa de cimento-amianto de 1.000 L (1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade), contendo uma camada de solo de 0,5 m de espessura. O material de solo proveniente de um Latossolo Vermelho-Amarelo foi destorroado e peneirado, antes de sua colocação nos lisímetros.

Foram feitas amostragens para análises química e físico-hídrica do solo dos lisímetros (Tabela 1). As características físico-hídricas do solo, como massa específica, textura e curva de retenção de umidade do solo foram determinadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos. As análises químicas constituíram-se na determinação das concentrações de cálcio, magnésio, fósforo disponível, sódio, potássio, alumínio e alumínio trocável, pH em água, capacidade de troca catiônica efetiva (t) e capacidade de troca catiônica total (T), conforme metodologia da EMBRAPA (1997). Essas determinações foram realizadas no Laboratório de Química do Solo do Departamento de Solos da UFV.

Tabela 1 – Características químicas e físico-hídricas do solo utilizado no preenchimento dos lisímetros de drenagem

Característica	Valor	Característica	Valor
Areia grossa (%)	15	Ca ²⁺ (cmol dm ⁻³)	0,32
Areia fina (%)	8	Mg ²⁺ (cmol dm ⁻³)	0,08
Silte (%)	0	Al ³⁺ (cmol dm ⁻³)	0,59
Argila (%)	77	H + Al (cmol dm ⁻³)	6,4
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	0,99	Soma de bases (cmol dm ⁻³)	0,43
Densidade de partículas (kg dm ⁻³)	2,62	CTC efetiva (cmol dm ⁻³)	1,02
Capacidade de campo (kg kg ⁻¹)	0,294	CTC Total (cmol dm ⁻³)	6,83
Ponto de murcha (kg kg ⁻¹)	0,239	Saturação por alumínio (%)	57,8
pH em água	4,79	Saturação por bases (%)	6,3
Na ⁺ (mg dm ⁻³)	0	P – remanescente (mg L ⁻¹)	15,8
P (mg dm ⁻³)	1,0	Matéria orgânica (dag kg ⁻¹)	2,66
K ⁺ (mg dm ⁻³)	13		

A correção da acidez do solo e a sua fertilização foram realizadas de acordo com os resultados de análises químicas do solo e das exigências nutricionais da grama. As adubações de cobertura foram feitas a cada 30 dias, utilizando-se 20 g m⁻² do formulado 10-10-10 dissolvidos em água.

A grama-batatais era podada na altura de 8 cm toda vez que atingia 15 cm, de acordo com as recomendações feitas por Allen et al. (1998) para a estimativa da evapotranspiração de referência.

A evapotranspiração de referência nos lisímetros foi calculada por meio do balanço hídrico, desconsiderando-se a variação do armazenamento de acordo com a expressão:

$$ET = P + I - D \quad (2)$$

em que:

ET = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

P = precipitação pluvial no lisímetro, mm;

I = lâmina de água aplicada na irrigação, mm; e

D = lâmina de água drenada, mm.

As irrigações nos lisímetros e a coleta da água de drenagem foram feitas em intervalos de 24 horas. Ao final de cada dia e nos dias chuvosos, cada lisímetro era coberto com telha de fibra de vidro transparente, de 1 mm de espessura, fixada em um suporte de madeira com altura de 60 cm, o qual era

removido no início de cada dia. Assim, a precipitação pluvial foi eliminada da contabilização da lâmina evapotranspirada. As irrigações na área experimental e adjacente aos lisímetros foram feitas constantemente, para promover a umidade do solo adequada ao desenvolvimento da grama-batatais.

As medições das lâminas evaporada e evapotranspirada nos minievaporímetros e nos lisímetros de drenagem foram feitas diariamente às nove horas da manhã, durante os meses de junho a dezembro de 2005. Nesse período, também foram obtidos os valores de ET_0 , por meio dos demais métodos de estimativa estudados. Na análise dos resultados foram excluídos os dias com ocorrência de precipitação pluvial, pois a chuva afeta a leitura da lâmina evaporada, e conseqüentemente, a qualidade dos dados.

A análise do desempenho dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 para a estimativa da ET_0 foi feita comparando-se os resultados de evapotranspiração obtidos em cada nível de água com a equação de Penman-Monteith – FAO 56. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi proposta por Allen et al. (1986) e adotada por Jensen et al. (1990), a qual se fundamenta na estimativa do erro-padrão (EEP), calculado pela equação:

$$EEP = \left(\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

em que:

EEP = estimativa do erro-padrão, mm d^{-1} ;

y = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d^{-1} ;

\hat{y} = evapotranspiração de referência estimada pelo método considerado, mm d^{-1} ; e

n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita baseando-se nos valores da estimativa do erro-padrão (EEP), do coeficiente de determinação (r^2) e do coeficiente angular (b) das respectivas regressões lineares simples.

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação, a qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A aproximação dos valores de ET_0 estimados por determinado método em relação aos valores obtidos pelo método-padrão foi obtida por um índice, designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam desde zero, em que não existe concordância, a 1 para a concordância perfeita.

O índice de concordância é calculado aplicando-se a seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (4)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

P_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método considerado, mm d^{-1} ;

O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d^{-1} ;

\bar{O} = média dos valores de ET_0 obtidos pelo método-padrão, mm d^{-1} ; e

n = número de observações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 3, 4 e 5 encontram-se os valores dos elementos meteorológicos usados na estimativa da evapotranspiração de referência, obtidos durante o período estudado.

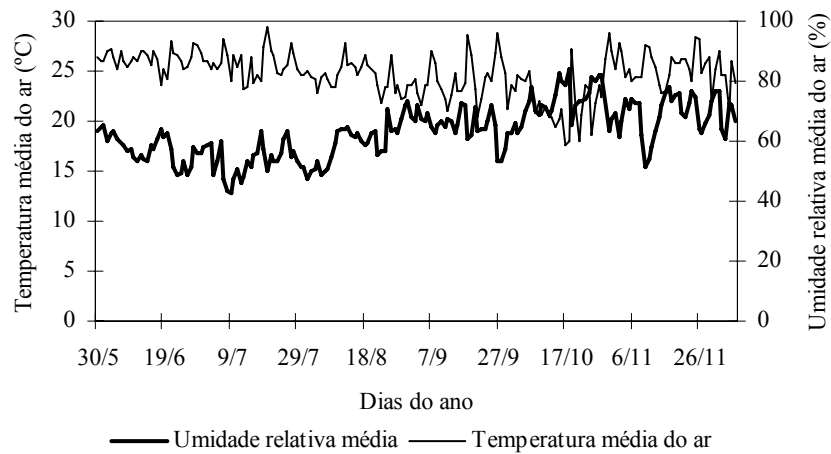


Figura 3 – Valores diários da umidade relativa e da temperatura média do ar obtidos durante o período estudado.

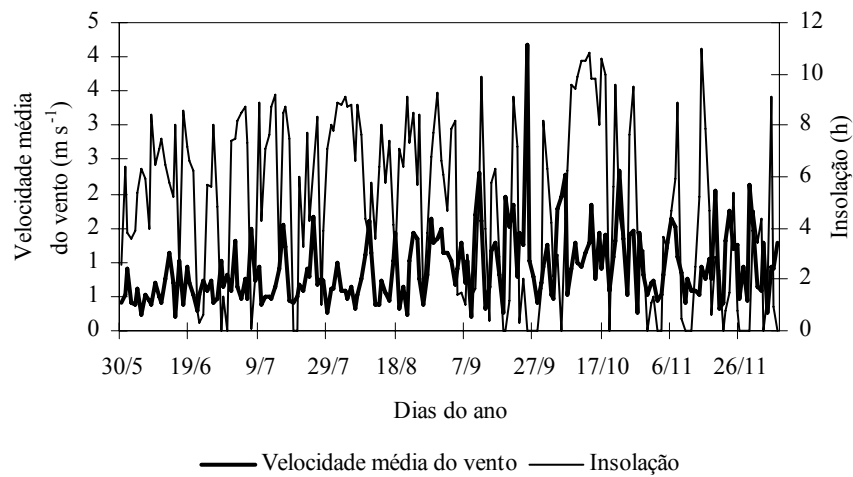


Figura 4 – Valores diários da velocidade média do vento e da insolação obtidos durante o período estudado.

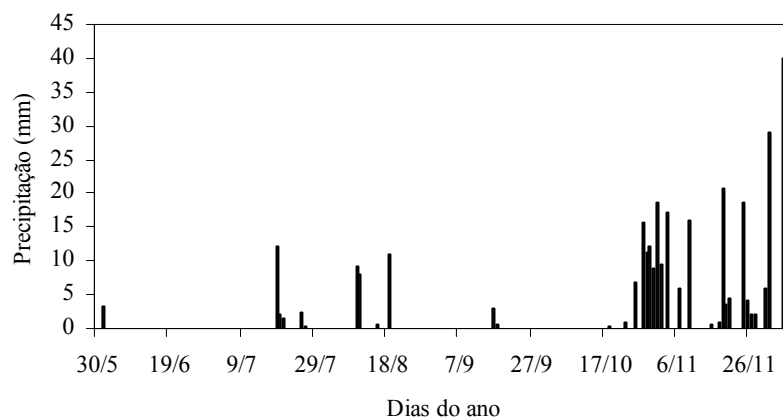


Figura 5 – Valores diários de precipitação obtidos durante o período estudado.

Na Figura 3 observa-se que a umidade relativa média diária, na maioria dos dias estudados, foi superior a 70%, classificada como alta, e a temperatura

média diária foi aproximadamente 20 °C. Na Figura 4, a velocidade média do vento foi inferior a 2 m s⁻¹, considerada leve, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977). Essas condições climáticas, representadas pela umidade relativa e velocidade do vento, permitiram determinar apenas um coeficiente para cada nível de água nos minievaporímetros, em cada intervalo de tempo analisado, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores dos coeficientes dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm, em cada intervalo de tempo analisado

Umidade Relativa (%)	Velocidade do Vento (m s ⁻¹)	Tempo (dias)	Profundidade do Nível de Água (mm)			
			30	45	60	75
Alta >70	< 2,0 (leve)		Minievaporímetro UFV-1			
		Um	0,51	0,53	0,55	0,56
		Três	0,50	0,50	0,54	0,56
		Cinco	0,50	0,52	0,54	0,55
		Sete	0,50	0,52	0,54	0,55
			Minievaporímetro UFV-2			
		Um	0,65	0,68	0,72	0,74
		Três	0,64	0,67	0,70	0,73
		Cinco	0,64	0,67	0,70	0,72
		Sete	0,64	0,67	0,70	0,73

Na Tabela 2 constata-se que houve ligeira tendência de elevação dos valores dos coeficientes dos dois tipos de minievaporímetros com o aumento da profundidade do nível de água no interior do evaporatório. Essa elevação significa redução da evaporação, contrariando os resultados obtidos por Sleight (1917). Com relação ao intervalo de tempo estudado, observa-se que os valores dos coeficientes permaneceram constantes nos dois minievaporímetros. Assim, recomenda-se utilizar os valores de 0,51; 0,53; 0,55; e 0,56 no minievaporímetro UFV-1 e 0,65; 0,68; 0,72; e 0,74 no minievaporímetro UFV-2, nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm, respectivamente.

Quando o nível da água no minievaporímetro se encontra mais próximo da superfície, ocorre maior interceptação da radiação solar, variável que tem maior influência no processo de evaporação (CHANG, 1971), ao mesmo tempo que favorece a ação do vento atuando na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante, o que acarreta maiores valores de evaporação.

Na Tabela 2 observa-se que a bordadura com água teve efeito expressivo na evaporação no minievaporímetro UFV-2, apresentando uma diferença média de 30% nos valores dos coeficientes em cada profundidade estudada, em comparação com os valores obtidos no minievaporímetro UFV-1. O efeito direto da bordadura está relacionado à interceptação dos raios solares pela parede externa do minievaporímetro UFV-2, reduzindo a transferência de calor para a massa de água no interior do evaporatório. Ao contrário, no minievaporímetro UFV-1 a parede do evaporatório está diretamente exposta à radiação, o que resultou em maior evaporação.

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b), o coeficiente de determinação (r^2), a estimativa do erro-padrão (EEP) e o índice de concordância (d) obtidos dos valores diários de ET_0 estimados por meio dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 e pelos demais métodos estudados, tendo-se por base o método de Penman-Monteith – FAO 56.

Tabela 3 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos diários

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						2,72
Penman Modificado	-0,872	1,340	0,99	0,38	0,97	2,77
Hargreaves-Samani	-0,958	0,968	0,86	0,96	0,82	3,59
Radiação	0,000	1,168	0,99	0,60	0,94	3,16
Tanque Classe A	-0,325	0,802	0,72	0,59	0,91	2,51
Lisímetro de drenagem	0,307	0,826	0,69	0,61	0,90	2,55
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,000	1,011	0,98	0,37	0,97	2,76
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,000	1,013	0,98	0,40	0,96	2,77
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	1,019	0,98	0,38	0,97	2,77
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,000	1,013	0,99	0,36	0,97	2,76
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	-0,262	1,131	0,88	0,45	0,96	2,81
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,033	0,98	0,44	0,96	2,79
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	-0,259	1,133	0,84	0,52	0,95	2,82
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	-0,322	1,156	0,86	0,50	0,95	2,82

Na Tabela 3 observa-se que o método de Penman Modificado, que considera os aspectos aerodinâmicos e de radiação, apresentou boa estimativa da ET_0 , sendo seu valor médio próximo ao determinado pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, com estimativa do erro-padrão igual a 0,38 mm d⁻¹. Entretanto, os métodos de Hargreaves-Samani e da Radiação superestimaram a

evapotranspiração de referência, apresentando estimativa do erro-padrão iguais a 0,96 e 0,60 mm d⁻¹, respectivamente. De acordo com Jensen et al. (1990), os métodos que se baseiam na radiação e temperatura do ar, como é o caso de Hargreaves-Samani, tendem a superestimar a evapotranspiração de referência em 15 a 25% em climas úmidos. Resultados similares também foram encontrados por Souza e Yoder (1994) no interior do Ceará. Quanto ao método da Radiação, observa-se também que sua estimativa da ET₀ foi insatisfatória, apresentando alta estimativa do erro-padrão e uma superestimativa de 16% em relação ao método-padrão, contrariando os resultados obtidos por Oliveira e Carvalho (1998) nos Municípios de Seropédica e Campos, no Estado do Rio de Janeiro. Lunardi et al. (1999) verificaram superestimativa da ET₀ com o uso do método da Radiação em Botucatu, Estado de São Paulo. Isso indica que esse método necessita de calibrações locais para a estimativa confiável da ET₀.

O tanque Classe A e o lisímetro de drenagem apresentaram uma subestimativa da ET₀ diária, em relação ao método-padrão, com valores do erro-padrão iguais a 0,59 e 0,61 mm d⁻¹, respectivamente. No caso do lisímetro, essa subestimativa pode estar relacionada à variação no armazenamento de água no solo. Com relação ao tanque Classe A, a subestimativa da ET₀ também pode estar relacionada ao uso do coeficiente do tanque e ao sistema de leituras que exige sensibilidade do operador para quebrar a tensão superficial da água com micrômetro de gancho. Esses resultados corroboram com os obtidos por Silva et al. (1999) no Município de Piracicaba, Estado de São Paulo.

Os minievaporímetros, operando com Irrigâmetro modificado, apresentaram estimativas de ET₀ muito próximas das obtidas pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, em todos os níveis de água estudados, com estimativa do erro-padrão variando entre 0,36 a 0,40 e 0,44 a 0,52 mm d⁻¹, nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, respectivamente. A análise dos valores dos coeficientes angular, de determinação, do índice de concordância e da estimativa do erro-padrão indica que os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 foram, dentre os métodos estudados, os que melhor estimaram a ET₀ com base no método-padrão, superestimando-a em torno de 2 e 3%, respectivamente. Assim, os minievaporímetros operando com Irrigâmetro modificado apresentaram

resultados confiáveis para a estimativa de ET_0 em períodos diários que, associados ao baixo custo e à alta praticidade, tornam esses equipamentos indicados para fins de manejo da água de irrigação.

Na Figura 6 encontram-se as equações de regressão, o coeficiente de determinação e os valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e pelo método de Penman-Monteith – FAO 56.

O método de Penman Modificado subestimou a ET_0 para valores menores que 3 mm d^{-1} e a superestimou no caso de valores maiores. Os métodos de Hargreaves-Samani e Radiação superestimaram a ET_0 , ocorrendo comportamento contrário com o uso do lisímetro de drenagem e com o tanque Classe A.

Os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 apresentaram, nas quatro profundidades dos níveis de água avaliadas, melhor desempenho que os demais métodos de estimativa da ET_0 considerados neste estudo, com menor dispersão dos dados diários em torno da linha de valores 1:1, tendo por base o método de Penman-Monteith – FAO 56.

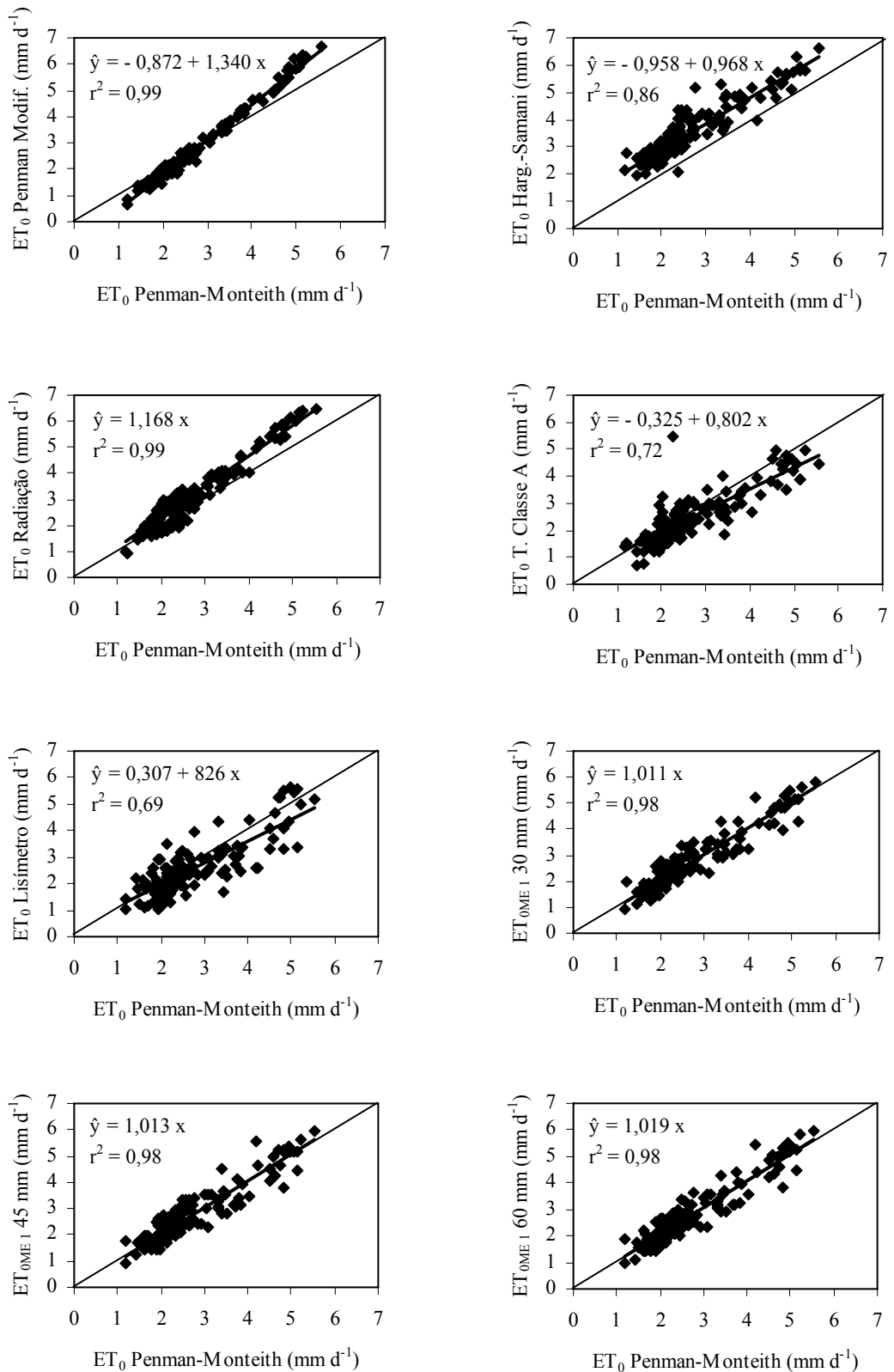


Figura 6 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{0ME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45 e 60 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos diários. Continua...

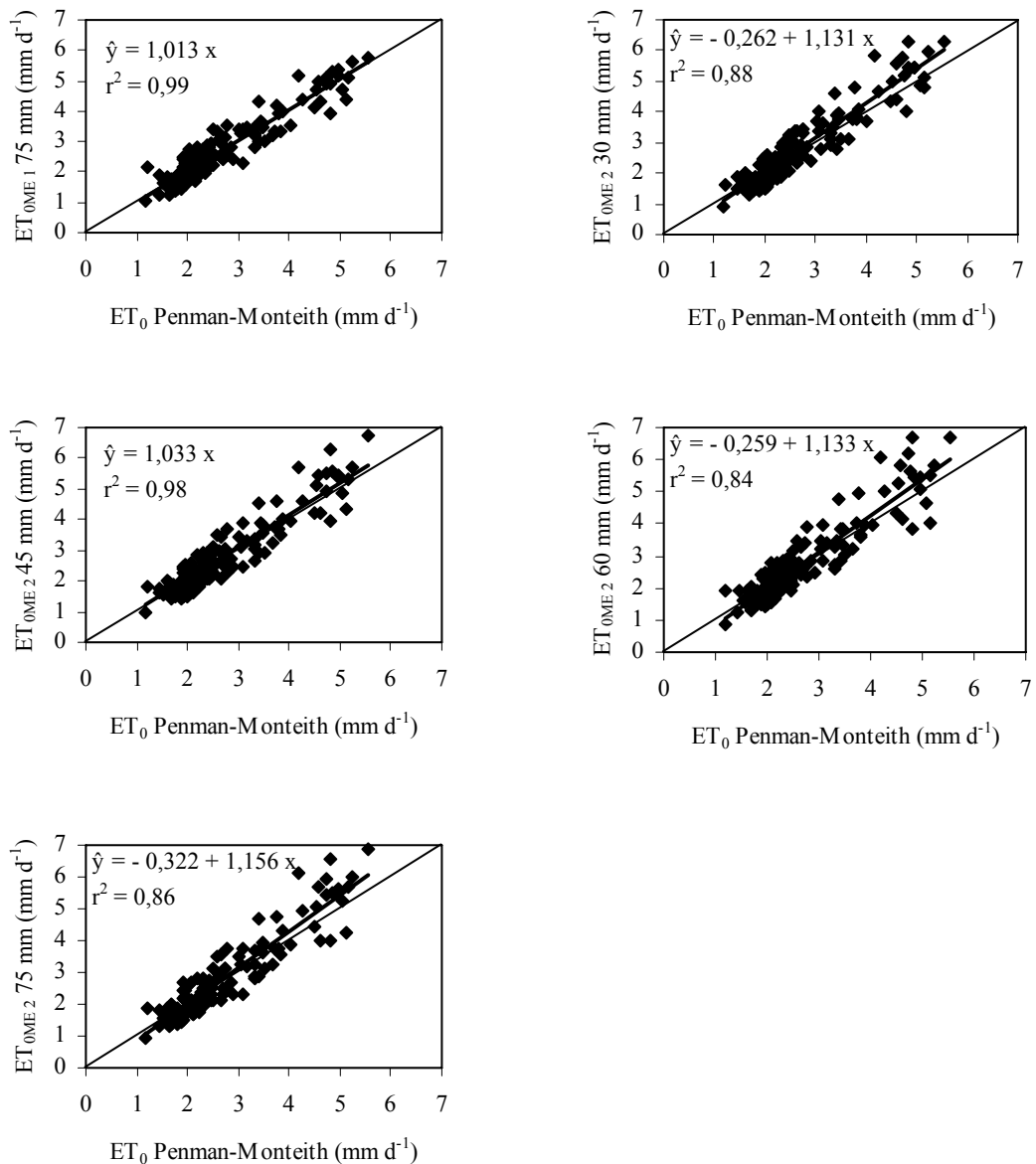


Figura 6 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET₀) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}) na profundidade do nível de água de 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{OME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET₀ determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos diários.

As comparações dos métodos nas escalas de três, cinco e sete dias seguiram a mesma metodologia estatística aplicada na escala diária, sendo apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 4 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos de três dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						2,72
Penman Modificado	-0,844	1,330	0,99	0,31	0,98	2,77
Hargreaves-Samani	0,679	1,078	0,94	0,94	0,81	3,61
Radiação	0,000	1,154	0,99	0,52	0,93	3,15
Tanque Classe A	0,000	0,920	0,99	0,35	0,96	2,52
Lisímetro de percolação	0,000	0,945	0,98	0,41	0,95	2,55
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,000	0,997	0,99	0,22	0,98	2,72
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,000	0,951	0,99	0,27	0,98	2,59
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	1,007	0,99	0,22	0,98	2,73
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,000	1,001	0,99	0,20	0,99	2,72
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	-0,342	1,147	0,95	0,27	0,98	2,77
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,021	0,99	0,25	0,98	2,75
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	-0,396	1,167	0,94	0,30	0,98	2,77
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	-0,413	1,173	0,94	0,31	0,98	2,77

Tabela 5 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos de cinco dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						2,71
Penman Modificado	-0,861	1,337	0,99	0,31	0,98	2,76
Hargreaves-Samani	0,624	1,101	0,96	0,94	0,80	3,61
Radiação	0,000	1,154	0,99	0,52	0,93	3,15
Tanque Classe A	0,292	0,823	0,94	0,31	0,96	2,52
Lisímetro de percolação	0,000	0,948	0,99	0,36	0,96	2,55
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,000	0,994	0,99	0,20	0,99	2,71
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,000	0,996	0,99	0,22	0,98	2,71
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	1,004	0,99	0,21	0,99	2,72
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,000	0,999	0,99	0,18	0,99	2,71
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	-0,341	1,143	0,97	0,22	0,99	2,76
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,017	0,99	0,21	0,99	2,74
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	-0,382	1,158	0,96	0,25	0,98	2,76
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	-0,405	1,166	0,96	0,25	0,98	2,76

Tabela 6 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos de sete dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Penman-Monteith – FAO 56						2,73
Penman Modificado	-0,869	1,341	0,99	0,30	0,98	2,80
Hargreaves-Samani	0,606	1,109	0,97	0,92	0,79	3,64
Radiação	0,000	1,147	0,99	0,49	0,93	3,16
Tanque Classe A	0,000	0,933	0,99	0,28	0,97	2,57
Lisímetro de percolação	0,000	0,943	0,99	0,31	0,97	2,57
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,000	0,991	0,99	0,18	0,99	2,73
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,000	0,993	0,99	0,21	0,99	2,73
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	0,999	0,99	0,17	0,99	2,73
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,000	0,995	0,99	0,14	0,99	2,73
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	-0,304	1,125	0,97	0,19	0,99	2,77
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,014	0,99	0,20	0,99	2,75
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	-0,341	1,138	0,96	0,23	0,98	2,77
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	-0,382	1,154	0,96	0,24	0,98	2,77

Analisando os dados das Tabelas 4, 5 e 6, observa-se que o agrupamento da ET_0 em períodos de três, cinco e sete dias, respectivamente, resultou em aumento dos coeficientes de determinação e de ajuste, com valores mais próximos da unidade, e em redução da estimativa do erro-padrão, com valores mais próximos de zero, pela maioria dos métodos estudados, comparativamente aos valores obtidos em períodos diários. Isso era esperado, pois o agrupamento dos valores de ET_0 em maior período de tempo melhora o desempenho dos métodos por causa da suavização das flutuações pontuais dos dados.

O agrupamento dos valores de ET_0 do minievaporímetro UFV-1 operando com Irrigâmetro modificado em períodos de três, cinco e sete dias resultou em valores de declividade da reta praticamente iguais a 1, valores máximos da estimativa do erro-padrão iguais a 0,27; 0,22; e 0,21 mm d⁻¹ e valores mínimos do índice de concordância iguais a 0,98; 0,98; e 0,99, respectivamente, com coeficiente de determinação igual a 0,99. Para o minievaporímetro UFV-2, obteve-se, nos mesmos intervalos de tempo, valores máximos da estimativa do erro-padrão iguais a 0,31; 0,25; e 0,24 mm d⁻¹ e valores mínimos do índice de concordância iguais a 0,98; 0,98; e 0,98, respectivamente, com coeficiente de determinação próximo a 0,96.

Esses resultados indicaram que os minievaporímetros apresentaram melhor desempenho para estimar a ET_0 , comparativamente aos demais métodos

estudados, uma vez que a maioria das equações de regressão ajustadas apresentou valores de “a” iguais a zero e de “b” próximos da unidade.

Nas Figuras 7, 8 e 9 estão apresentadas as equações de regressão, o coeficiente de determinação e os valores de ET_0 estimados pelos métodos estudados e pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de três, cinco e sete dias, respectivamente.

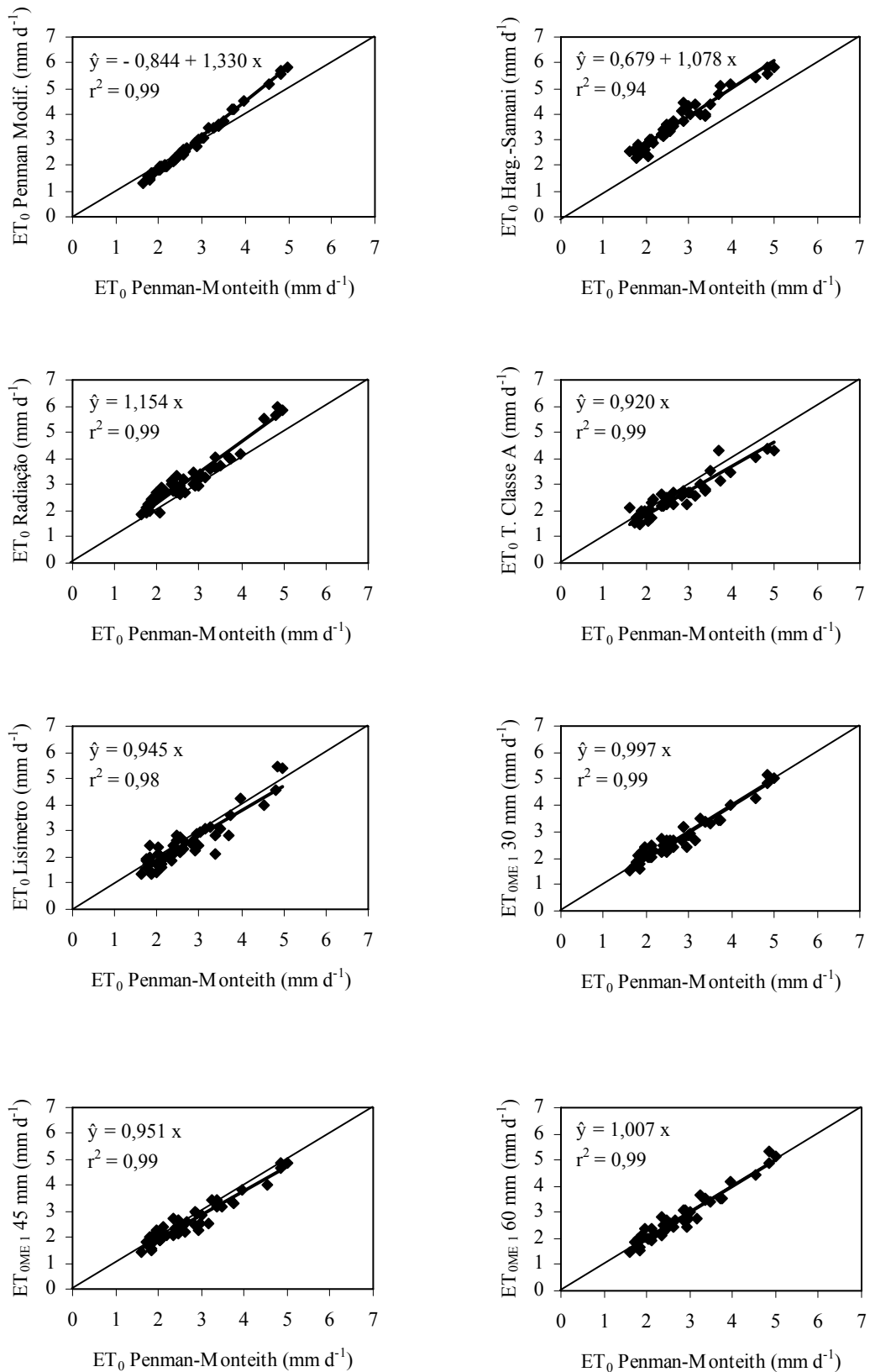


Figura 7 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{0ME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45 e 60 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de três dias. Continua...

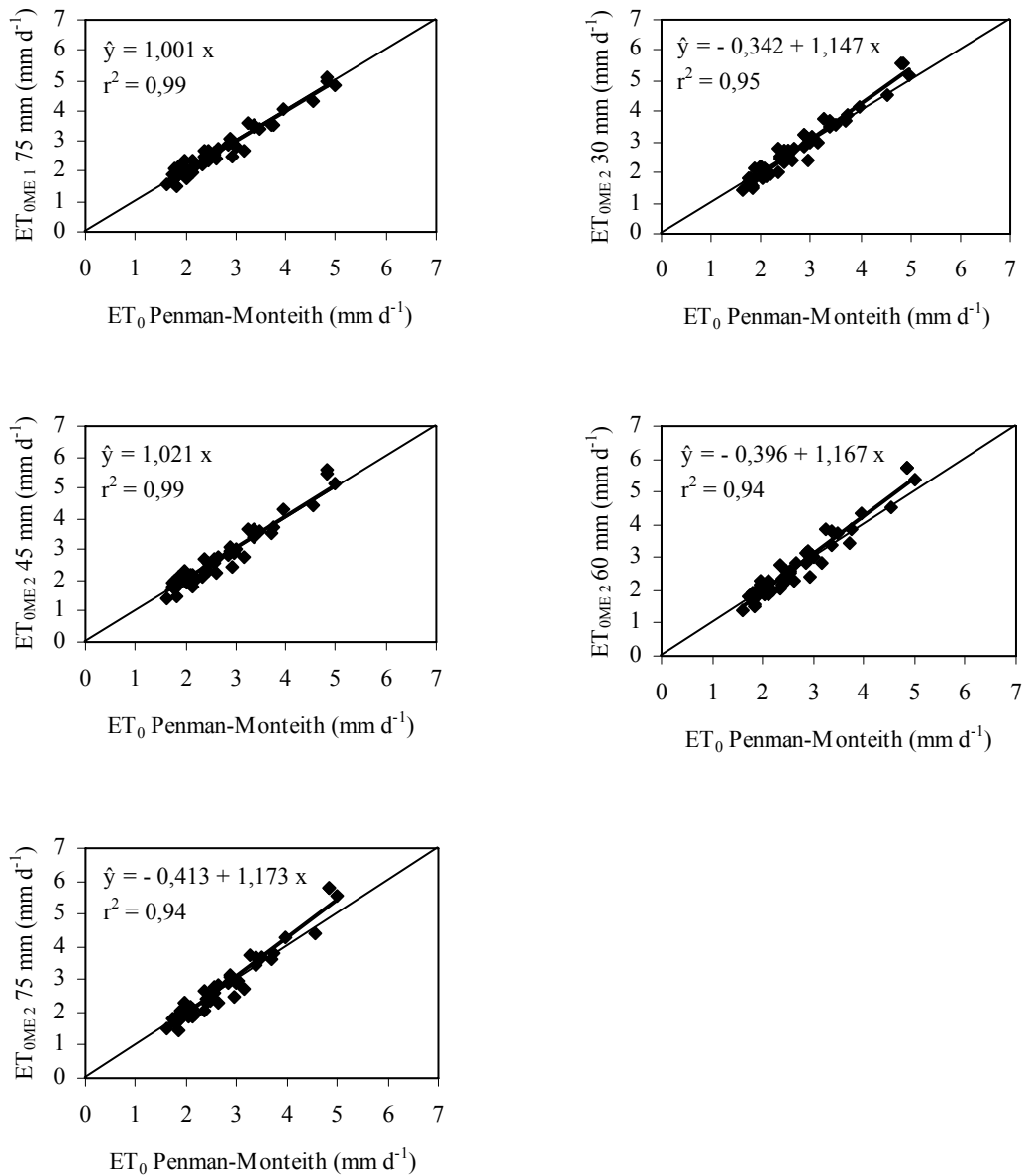


Figura 7 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}) na profundidade do nível de água de 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{OME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de três dias.

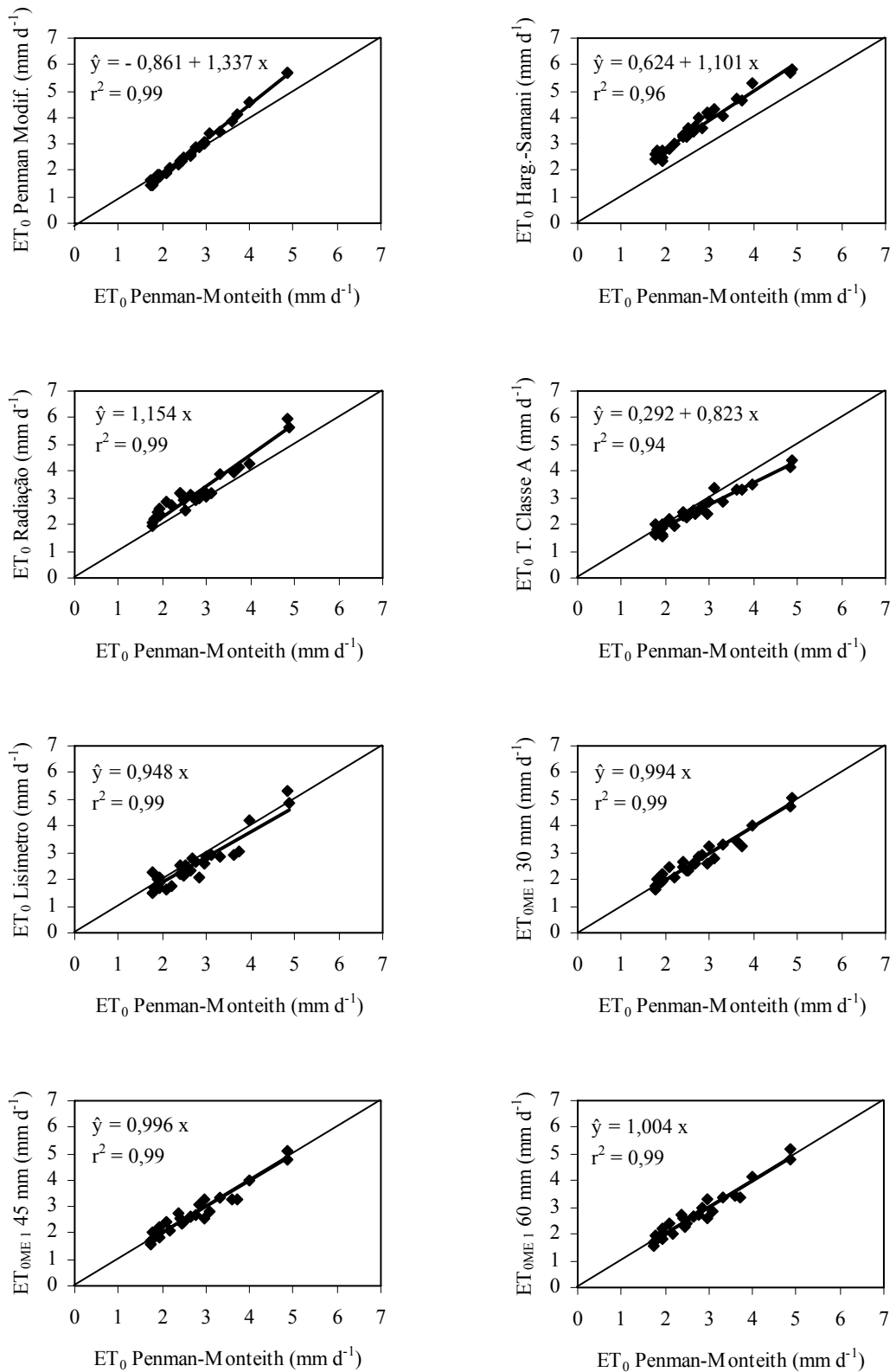


Figura 8 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{0ME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45 e 60 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de cinco dias. Continua...

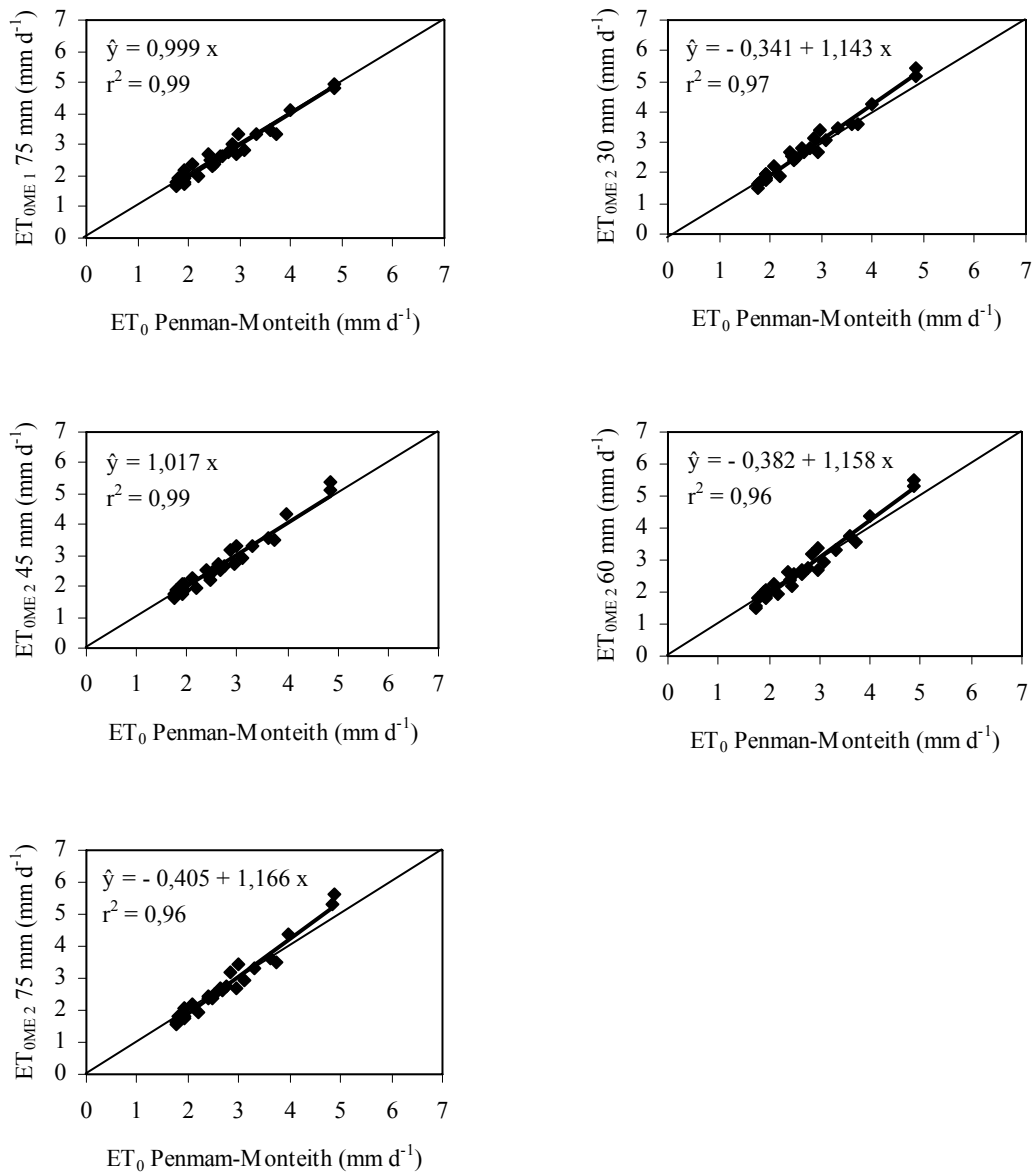


Figura 8 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}) na profundidade do nível de água de 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{OME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinado pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de cinco dias.

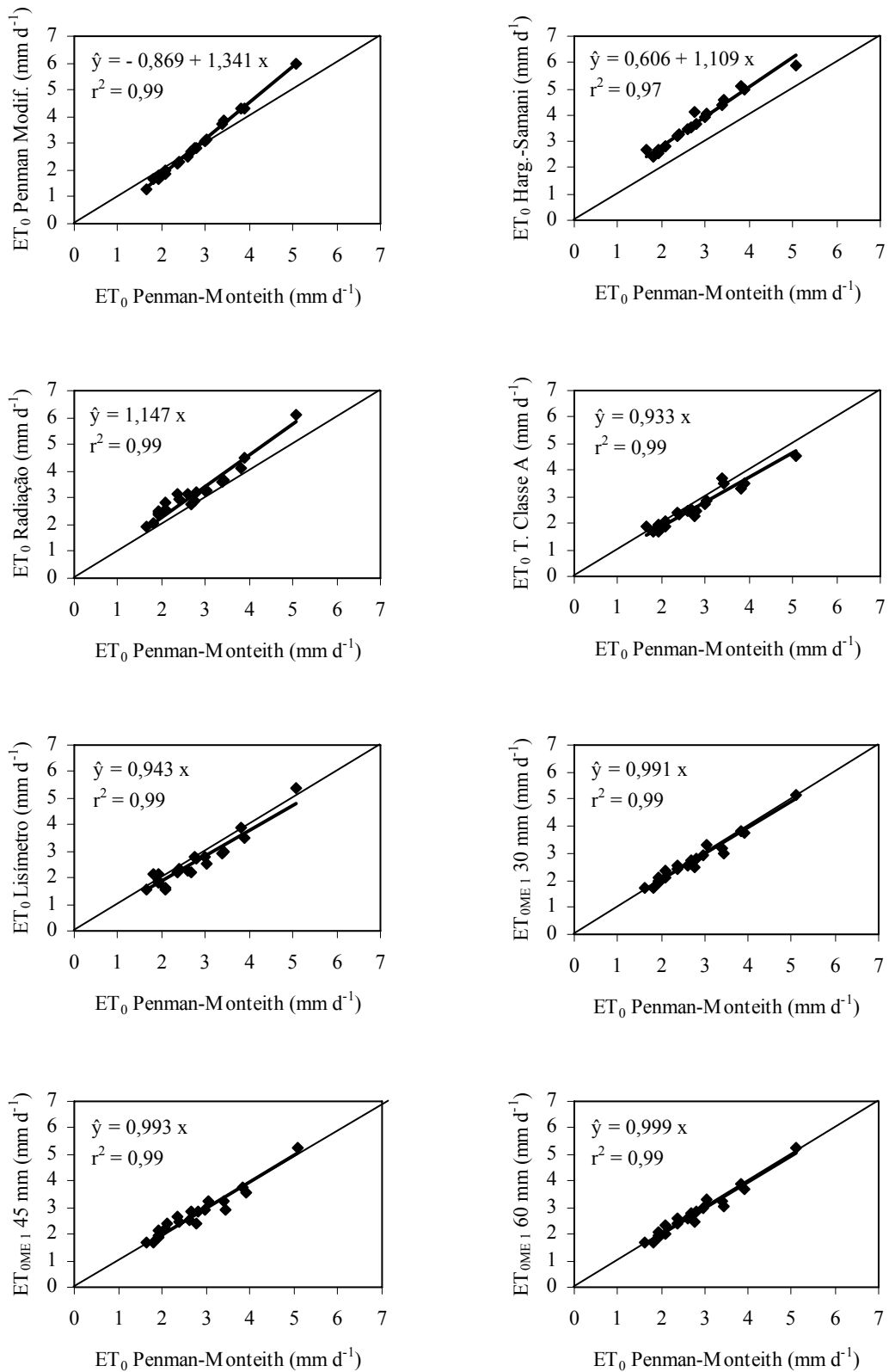


Figura 9 – Evapotranspiração de referência (ET₀) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação e tanque Classe A e pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{0ME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45 e 60 mm da borda, em comparação com os valores de ET₀ determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de sete dias. Continua...

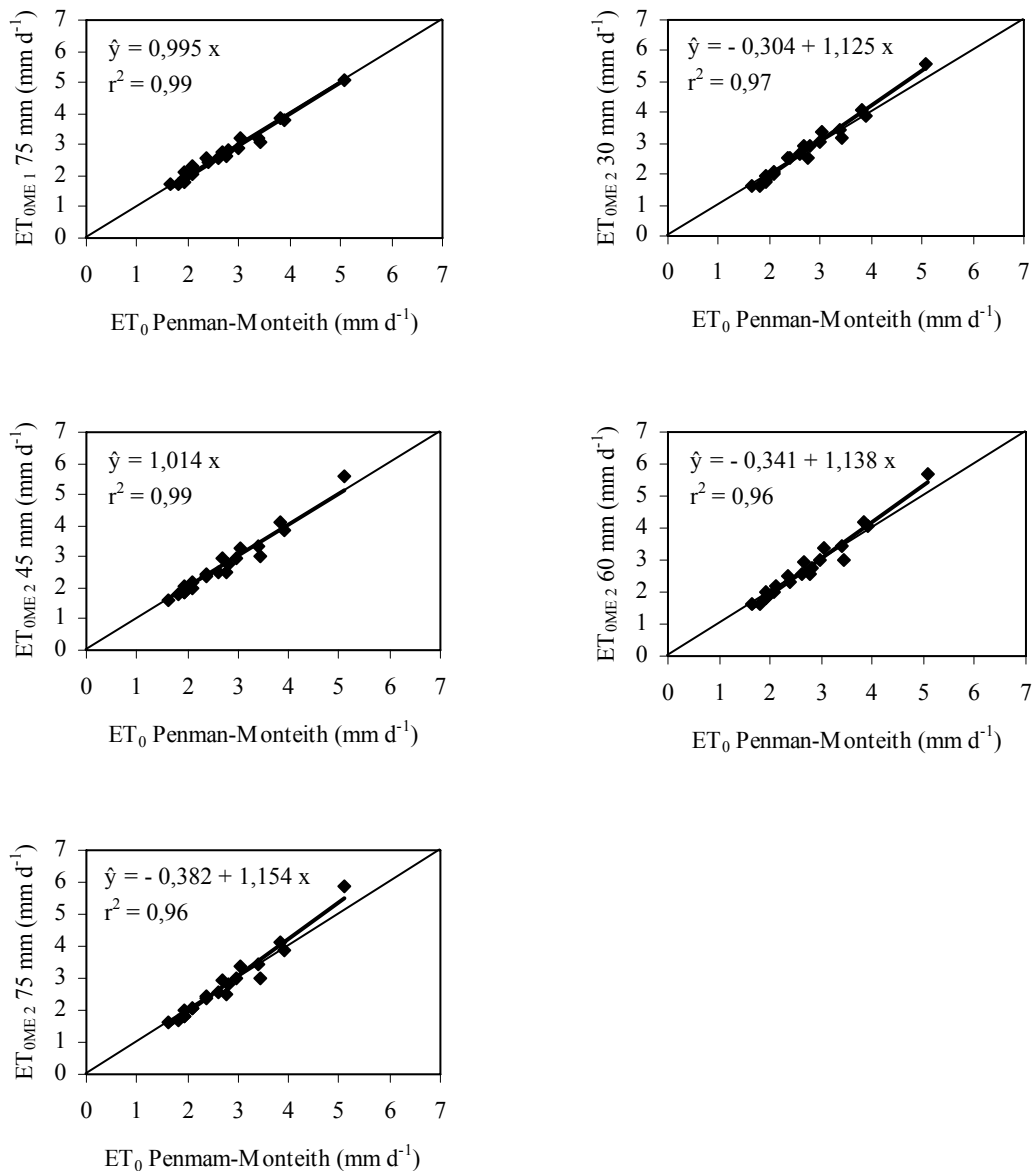


Figura 9 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}) na profundidade do nível de água de 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{OME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, para períodos de sete dias.

A análise das Figuras 7, 8 e 9 evidenciou que o agrupamento dos valores de ET_0 em períodos maiores tendeu a melhorar a estimativa, observando-se o mesmo comportamento de os métodos de Hargreaves-Samani e Radiação superestimarem e de o lisímetro e de o tanque Classe A subestimarem a ET_0 , comparativamente ao método de Penman-Monteith – FAO 56.

O lisímetro de drenagem e o tanque Classe A apresentaram melhoria expressiva na estimativa da ET_0 em períodos de três, cinco e sete dias,

comparativamente a períodos diários, com menor estimativa do erro-padrão e maior índice de concordância, justificando o seu uso com mais precisão na determinação do consumo de água por uma cultura em período de tempo superior a sete dias, conforme recomendação de Jensen et al. (1990) e Doorenbos e Pruitt (1977).

Nos intervalos de três, cinco e sete dias, os valores médios de evapotranspiração de referência obtidos nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, em cada profundidade do nível de água foram praticamente iguais aos valores de ET_0 obtidos pelo método-padrão, apresentando excelente desempenho em ambos os períodos. Ainda com relação aos minievaporímetros, observou-se que a linha de tendência dos pontos na maioria das profundidades de nível de água, praticamente coincidiu com a reta de valores 1:1, evidenciando o seu desempenho na estimativa da ET_0 em todos os intervalos de tempo estudados. É importante enfatizar que o desempenho adequado dos minievaporímetros na estimativa da ET_0 foi condicionado ao uso do Irrigâmetro modificado, o qual permitiu obter medidas de evaporação com sensibilidade de leitura de 0,086 mm.

4. CONCLUSÕES

1. Os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado apresentaram desempenho adequado, comparativamente ao método de Penman-Monteith – FAO 56, para estimar a ET_0 nos períodos de tempo e profundidades dos níveis de água estudados.
2. O minievaporímetro UFV-1 apresentou valores dos coeficientes iguais a 0,51; 0,53; 0,55; e 0,56, enquanto no minievaporímetro UFV-2 eles foram iguais a 0,65; 0,68; 0,72; e 0,74, respectivamente nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda.
3. O método de Penman Modificado subestimou a ET_0 obtida pelo método de Penman-Monteith-FAO 56 para valores menores que 3 mm d^{-1} , apresentando comportamento contrário para valores maiores.
4. Os métodos de Hargreaves-Samani e da Radiação superestimaram a ET_0 obtida pelo método de Penman-Monteith – FAO 56, em todos os períodos de

tempo estudados, verificando-se comportamento contrário do lisímetro de drenagem e do tanque Classe A.

5. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 4, p. 348-386, 1986.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requeriments**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and Drainage – Paper, 56).

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

ALLEN, R.G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82 p.

BURMAN, R.; POCHOP, L.O. **Evaporation, evapotranspiration and climatic data**. Amsterdam: Elsevier, 1994. 278 p.

CHANG, J. **Climate and agriculture**. Chicago: Aldine Publishing, 1971. 296 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requeriment**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documento1).

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, New York, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. Evapotranspiration and irrigation water requeriments. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, p. 332, 1990.

LEITÃO, M.M.V.B.R.; AZEVEDO, P.V.; MACIEL, G.F. Balanço de radiação e energia numa cultura de soja irrigada, nas condições semi-áridas do Nordeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 6; 1990, Salvador-BA. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1990. v. 1, p. 27-32.

LUNARDI, M.A.; LUNARDI, D.M.C.; CAVAGUTI, N. Comparação entre medidas evapotranspirométricas e metodologia da FAO, na determinação da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 4, n. 1, p. 52-66, 1999.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE.** Piracicaba, SP: ESALQ, 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

OLIVEIRA, M.A.A. de; CARVALHO, D.F. de. Estimativa da evapotranspiração de referência e da demanda suplementar de irrigação para o milho (*Zea mays* L.) em Seropédica e Campos, Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 2, p. 132-135, 1998.

PRUEGER, J.H.; HIPPS, L.E.; COOPPER, D.I. Evaporation and development of the local boundary layer over an irrigated surface in an arid region. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 78, p. 223-237, 1996.

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. de. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos.** Brasília: ABEAS, 1996. 176 p.

SILVA, F.C. da; FOLEGATTI, M.V.; PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 19-23, 1999.

SLEIGHT, R.B. Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 10, n. 5, p. 209-262, 1917.

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

SOUZA, F. de; YODER, R. ET estimation in the Northeast of Brazil: Hargreaves or Penman-Monteith equation. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, p. 6, 1994. (ASAE – Paper, 942545).

VALERO, J.A. de J.; MAÑAS, F.J.M. de S.O. El calculo y la estimacion de la evapotranspiracion. In: MAÑAS, F.J. M. de S.O.; VALERO, J.A. de J. **Agronomia del riego.** Madrid: Mundi-Prensa, 1993. p. 373-446.

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, 1985.

CAPÍTULO IV – DESEMPENHO DE MINIEVAPORÍMETROS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM RELAÇÃO AO LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE OPERANDO COM IRRIGÂMETRO MODIFICADO

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada por uma superfície vegetal, durante determinado período. Ela pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, no período considerado (BERNARDO, 2006).

Jensen et al. (1973) definiram a evapotranspiração de referência (ET_r) como aquela que ocorre numa cultura de alfafa (*Medicago sativa* L.), com 30 a 50 cm de altura e área-tampão mínima de 100 m, cultivada sem deficiência hídrica. Embora sabendo que a cultura da alfafa tem características aerodinâmicas mais representativas das culturas agronômicas do que a grama, esta última é mais utilizada pelo fato de a grande maioria das estações agrometeorológicas ser gramada. Por essa razão, Doorenbos e Pruitt (1977) definem ET_0 como a taxa de evapotranspiração de uma superfície extensa de grama com 8 a 15 cm de altura, com crescimento ativo e uniforme, cobrindo completamente o solo e onde não existe limitação de água. Smith (1991) e Allen et al. (1998) propõem uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência, com base numa cultura hipotética, a qual possuiria uma altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da superfície ao transporte de vapor de água igual a 70 s m^{-1} , que representaria a evapotranspiração de um gramado verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem limitação de água.

A evapotranspiração pode ser obtida por medidas diretas ou estimadas a partir de elementos climáticos, utilizando-se modelos ou métodos teóricos empíricos. O método direto está representado por diversos tipos de lisímetros, constituindo o método mais preciso, sendo considerado instrumento-padrão para

a determinação da evapotranspiração de referência (BERNARDO, 2006; AMORIM, 1998).

Os lisímetros utilizados em pesquisas de determinação da ET_0 podem ser agrupados em três categorias: (1) não-pesáveis com lençol freático constante, (2) não-pesáveis com drenagem livre e (3) lisímetros pesáveis. Eles podem ser também classificados quanto ao tipo de perfil do solo (reconstruído ou monolítico) e quanto ao sistema de drenagem (a vácuo ou por gravidade) (ABOUKHALED et al., 1986; HOWELL et al., 1991).

Nos lisímetros, não-pesáveis, com lençol freático constante, o nível da água é mantido a determinada profundidade. Com a ocorrência da evapotranspiração, a água é translocada até a zona radicular por capilaridade, provocando a descida do nível freático, o qual é automaticamente compensado por um mecanismo controlador do nível freático e que possibilita medir a evapotranspiração da cultura (ABOUKHALED et al., 1986). Nesse tipo de lisímetro, o mecanismo controlador do nível freático pode ser substituído pelo Irrigâmetro. Este aparelho pode ser conectado a um lisímetro ou a um tanque Classe A, mantendo o nível da superfície da água constante por meio do tubo de borbulhamento, permitindo também obter leituras muito precisas da evapotranspiração, bastando-se construir o Irrigâmetro com área efetiva ajustada à sensibilidade de leitura de interesse do usuário.

As relações entre os níveis de aeração e a produtividade das culturas têm sido analisadas através de estudos nos quais são estabelecidos diferentes níveis de lençol freático (GRASSI, 1991), que pode variar com o tipo de cultura e de solo. Pereira (1994) estudou o efeito de quatro profundidades freáticas sobre o consumo de água da alface num Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Ele observou que a evapotranspiração e a produtividade foram maiores quando se manteve o lençol freático a 25 cm, ocorrendo decréscimo com o aumento da profundidade freática a 35, 45 e 55 cm. Do mesmo modo, Andrade (1991) também verificou maior consumo de água pelo milho-doce num Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico quando o nível freático foi mantido a 30 cm de profundidade, ocorrendo decréscimo do consumo para maiores valores.

Na literatura existem diversos modelos empíricos que utilizam dados de elementos meteorológicos para estimativa da evapotranspiração de referência. Dentre eles, o método de Penman-Monteith – FAO 56 é considerado padrão para a estimativa da ET_0 por englobar os parâmetros físicos que governam a troca de energia e os aspectos aerodinâmicos e fisiológicos da cultura (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

Os evaporímetros, como o tanque Classe A, constituem-se num dos métodos empíricos mais simples para a estimativa da ET_0 , para fins de manejo da água de irrigação. Segundo Sedyama (1996), o maior uso desse equipamento é devido à sua praticidade e aos baixos custos de instalação e manutenção. De acordo com Smith (1991), quando bem conduzido, esse método oferece resultados confiáveis na determinação da evapotranspiração de referência. Tem a vantagem de medir a evaporação de uma superfície de água-livre, associando os efeitos integrados da radiação solar, do vento, da temperatura e da umidade do ar.

Neste trabalho, objetivou-se avaliar o desempenho dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 em relação ao lisímetro de lençol freático constante, para obter os seus coeficientes e a estimativa da evapotranspiração de referência, em períodos de um, três, cinco e sete dias, e comparar o seu desempenho com o lisímetro de drenagem e os métodos de Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A e Hargreaves-Samani (1985).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, situada a 20° 45' de latitude Sul e 42° 51' de longitude Oeste, numa altitude de 651 m. Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica do INMET, localizada no Campus da UFV, próximo à área experimental.

A ET_0 foi estimada utilizando-se os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, os métodos de Penman-Monteith – FAO 56, Penman Modificado – FAO 24, Radiação – FAO 24, tanque Classe A, Hargreaves-Samani (1985), lisímetro de drenagem e lisímetro de lençol freático constante operando com Irrigâmetro

modificado. O método do lisímetro de lençol freático constante foi adotado como padrão para avaliar o desempenho dos demais métodos.

Na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro foram utilizados seis lisímetros, sendo três de drenagem e três de lençol freático de nível constante mantidos a 15 cm de profundidade e cultivados com grama-bataiais (*Paspalum notatum* L.). Os lisímetros de lençol freático constante foram construídos com caixa de cimento-amianto de 1.000 L (1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade), preenchidos com substrato de areia, com grânulos de tamanho menor que 1,0 mm e maior que 0,104 mm, alimentados com solução nutritiva. Os lisímetros de drenagem foram preenchidos com uma camada de brita zero, sobreposta por outra de areia, seguida de solo destorroado e peneirado, proveniente de um Latossolo Vermelho-Amarelo.

Amostras do solo dos lisímetros de drenagem foram submetidas à análise química e físico-hídrica, sendo esta última também aplicada à areia dos lisímetros de lençol freático constante. Os resultados estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente. As características físico-hídricas do solo e da areia, como densidade, textura e retenção de água, foram determinadas em laboratório. As análises químicas constituíram-se na determinação das concentrações de cálcio, magnésio, fósforo disponível, sódio, potássio, alumínio e alumínio trocável, pH em água, capacidade de troca catiônica efetiva (t) e capacidade de troca catiônica total (T), conforme metodologia da EMBRAPA (1997).

Tabela 1 – Características químicas e físico-hídricas do solo utilizado no preenchimento dos lisímetros de drenagem

Característica	Valor	Característica	Valor
Areia grossa (%)	15	Ca ²⁺ (cmol dm ⁻³)	0,32
Areia fina (%)	8	Mg ²⁺ (cmol dm ⁻³)	0,08
Silte (%)	0	Al ³⁺ (cmol dm ⁻³)	0,59
Argila (%)	77	H + Al (cmol dm ⁻³)	6,4
Densidade do solo (kg dm ⁻³)	0,99	Soma de bases (cmol dm ⁻³)	0,43
Densidade de partículas (kg dm ⁻³)	2,62	CTC efetiva (cmol dm ⁻³)	1,02
Capacidade de campo (kg kg ⁻¹)	0,294	CTC total (cmol dm ⁻³)	6,83
Ponto de murcha (kg kg ⁻¹)	0,239	Saturação por alumínio (%)	57,8
pH em água	4,79	Saturação por bases (%)	6,3
Na ⁺ (mg dm ⁻³)	0	P – remanescente (mg L ⁻¹)	15,8
P (mg dm ⁻³)	1,0	Matéria orgânica (dag kg ⁻¹)	2,66
K ⁺ (mg dm ⁻³)	13		

Tabela 2 – Características físico-hídricas da areia utilizada no preenchimento dos lisímetros de lençol freático constante

Característica	Valor	Característica	Valor
Areia grossa (%)	93	Densidade da areia (kg dm ⁻³)	1,50
Areia fina (%)	4	Densidade de partículas (kg dm ⁻³)	2,85
Silte (%)	0	Capacidade de campo (kg kg ⁻¹)	0,013
Argila (%)	3	Ponto de murcha (kg kg ⁻¹)	0,008

A correção da acidez do solo e a sua fertilização foram realizadas de acordo com os resultados da análise química do solo e de acordo com as exigências nutricionais da grama-batatais. As adubações de cobertura foram feitas a cada 30 dias, aplicando-se 20 g m⁻² do formulado 10-10-10 dissolvidos em água.

A evapotranspiração de referência nos lisímetros foi calculada por meio do balanço hídrico, desconsiderando-se a variação do armazenamento, de acordo com a expressão:

$$ET = P + I - D \quad (1)$$

em que:

ET = evapotranspiração de referência, mm d⁻¹;

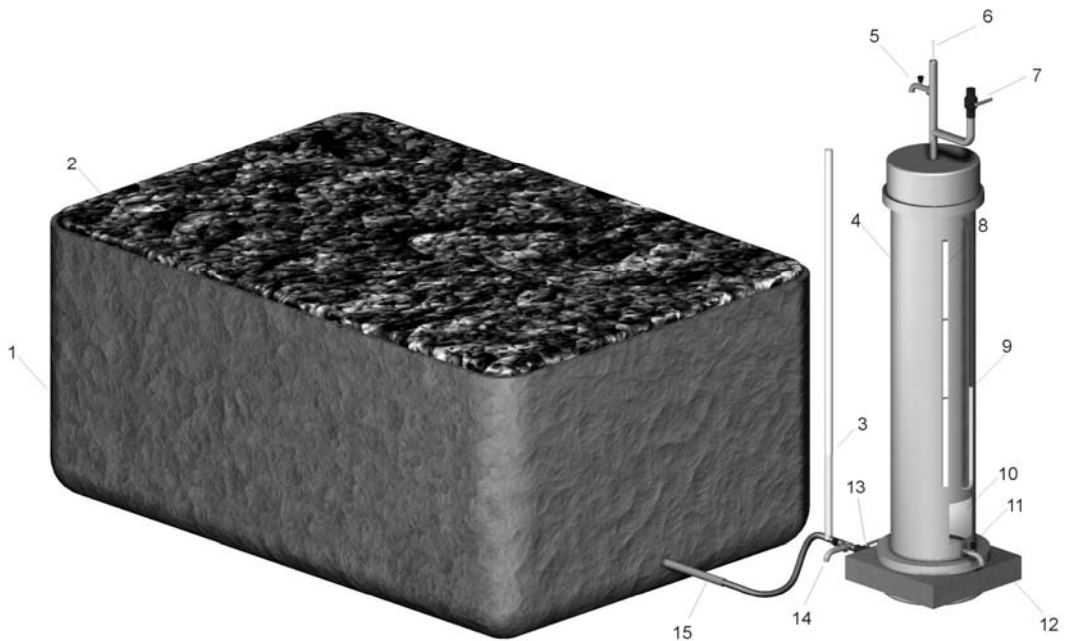
P = precipitação pluvial no lisímetro, mm;

I = lâmina de água aplicada por irrigação, mm; e

D = lâmina de água drenada, mm.

Nos lisímetros de drenagem, as irrigações e a coleta da água percolada foram feitas a cada 24 horas.

Na Figura 1 está ilustrado o lisímetro de lençol freático constante operando com Irrigâmetro modificado, usado para estimativa da evapotranspiração de referência.



1. Caixa de cimento-amianto; 2. Grama-batatais; 3. Tubo piezométrico; 4. Tubo de leitura-alimentação; 5. Válvula de eliminação de ar; 6. Tubo de borbulhamento; 7. Válvula de abastecimento; 8. Escala de leitura; 9. Piezômetro; 10. Visor; 11. Válvula de drenagem; 12. Suporte; 13. Válvula interconectora; 14. Válvula pluvial; e 15. Tubo interconector

Figura 1 – Lisímetro de lençol freático constante operando com Irrigâmetro modificado para estimativa da evapotranspiração de referência.

O fundo de cada lisímetro de lençol freático constante foi conectado ao Irrigâmetro modificado por meio de um tubo de PVC com 20 mm de diâmetro. O Irrigâmetro modificado foi construído com tubo de leitura-alimentação de diâmetro interno de 195 mm e altura de 1.100 mm, com escala graduada em milímetros. A relação entre as áreas internas do lisímetro e do tubo de leitura-alimentação do Irrigâmetro modificado, igual a 56,49, possibilitou uma sensibilidade na leitura da lâmina evaporada igual a 0,018 mm. A evapotranspiração foi obtida pela diferença entre duas leituras consecutivas num período de 24 horas.

Na extremidade inferior do tubo de leitura-alimentação existe uma válvula de drenagem, usada para retirar a água do tubo de borbulhamento e o excesso do tubo de leitura-alimentação, a fim de zerar o aparelho. Na parte superior existem as válvulas de eliminação de ar e a de abastecimento.

Durante o reabastecimento do tubo de leitura-alimentação, a válvula interconectora deve estar fechada, e as de eliminação de ar e de abastecimento abertas. Após o reabastecimento, as duas últimas válvulas são fechadas, abrindo-

se a válvula de drenagem até zerar o aparelho. Em seguida, é restabelecido o seu funcionamento normal, por meio da abertura da válvula interconectora.

Ao final de cada dia e nos dias chuvosos, cada lisímetro era coberto com telha de fibra de vidro transparente, de 1 mm de espessura, fixada em um suporte de madeira com altura de 60 cm, o qual era removido no início de cada dia. Assim, a precipitação pluvial foi eliminada da contabilização da lâmina evapotranspirada. A determinação da ET_0 no lisímetro de lençol freático constante foi feita por meio da diferença entre duas leituras sucessivas no irrigâmetro.

Os lisímetros de lençol freático constante foram abastecidos com solução nutritiva inicial, descrita na Tabela 3, até atingir o nível freático estabelecido, sendo o reabastecimento feito com a solução nutritiva descrita na Tabela 4. Tanto a solução nutritiva inicial quanto a de abastecimento foram formuladas de acordo com Martinez e Silva (2004), Silva (2004) e Ruiz (1997).

Tabela 3 – Fontes e concentrações de nutrientes utilizados na solução nutritiva inicial aplicada nos lisímetros de lençol freático constante

Sal	mg L ⁻¹	Sal	g L ⁻¹
H ₃ BO ₃	1,24	Ca(NO ₃) ₂	0,519
CuSO ₄	0,20	KNO ₃	0,202
MnSO ₄	2,53	NH ₄ NO ₃	0,064
(NH ₄) ₆ MO ₇ (O ₂) ₄	0,09	MgSO ₄	0,246
ZnSO ₄	0,57	NH ₄ H ₂ PO ₄	0,115
FeCl ₃	10,81	CaCO ₃	0,300
Na ₂ EDTA	14,89		

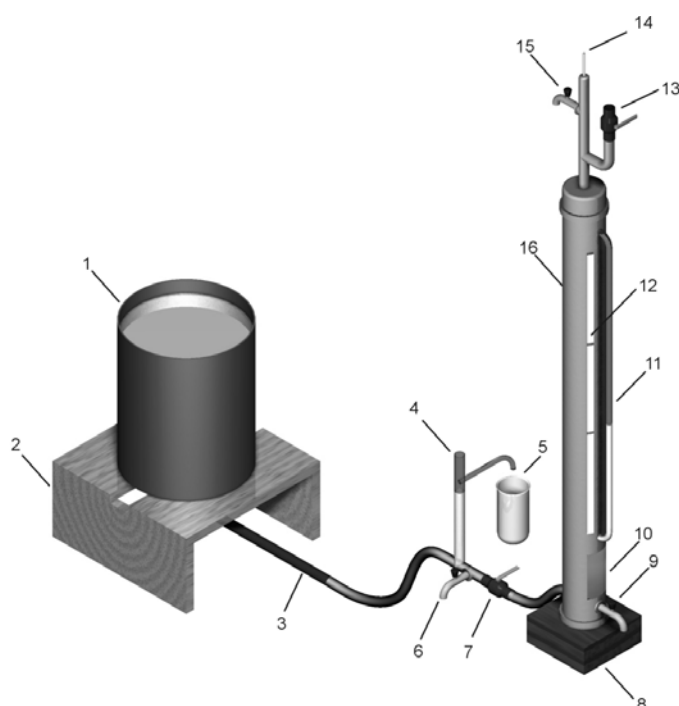
Tabela 4 – Fontes e concentrações de nutrientes utilizados na solução nutritiva de reabastecimento dos lisímetros de lençol freático constante

Sal	Concentração (g L ⁻¹)		Sal	Concentração (g L ⁻¹)	
	Solução A	Solução B		Sal A	Sal B
H ₃ BO ₃	1,24		Ca(NO ₃) ₂	103,90	
CuSO ₄	0,20		KNO ₃	40,44	
MnSO ₄	2,53		NH ₄ NO ₃	12,80	
(NH ₄) ₆ MO ₇ (O ₂) ₄	0,09		MgSO ₄		49,20
ZnSO ₄	0,57	10,81	NH ₄ H ₂ PO ₄		23,00
FeCl ₃		14,89			
Na ₂ EDTA		14,89			

O pH e a condutividade elétrica da solução nutritiva de cada lisímetro de lençol freático constante foram medidos em três profundidades (no fundo, na altura mediana e próximo à superfície), duas vezes por semana, ao longo da pesquisa. O pH foi mantido próximo de 7,0 com a adição de ácido clorídrico 10%, para evitar a alcalinização do substrato. A condutividade elétrica da solução no interior dos lisímetros foi mantida entre 630 e 1.000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, ajustando-se as concentrações de macro e micronutrientes para evitar deficiência de nutrientes na cultura.

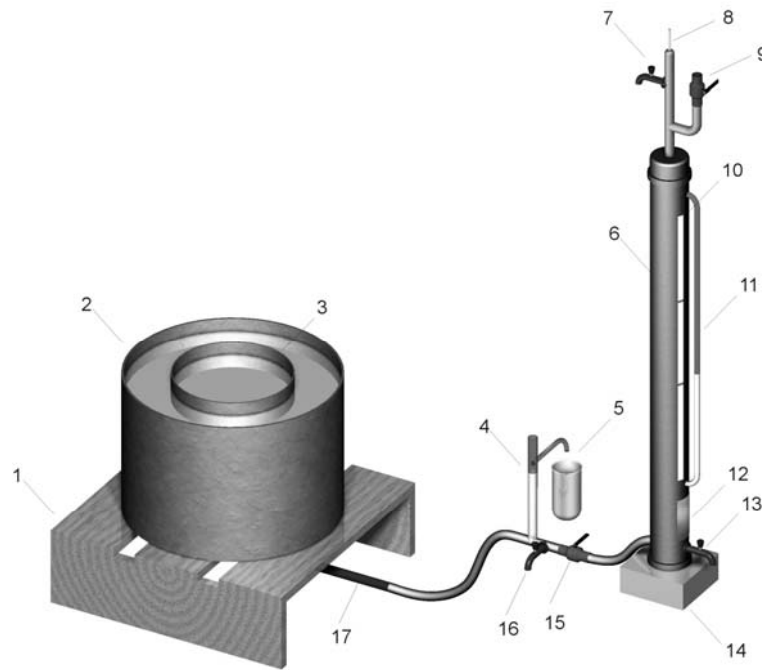
A grama-batatais era podada numa altura de 8 cm toda vez que atingia 15 cm de altura, de acordo com as recomendações feitas por Allen et al. (1998) para estimativa da evapotranspiração de referência.

Nas Figuras 2 e 3 estão ilustrados os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, respectivamente, operando com Irrigâmetro modificado para a estimativa da evapotranspiração de referência.



1. Evaporatório; 2. Estrado; 3. Tubo interconector; 4. Tubo pluviométrico; 5. Coletor; 6. Válvula pluviométrica; 7. Válvula interconectora; 8. Suporte; 9. Válvula de drenagem; 10. Visor; 11. Piezômetro; 12. Escala de leitura; 13. Válvula de abastecimento; 14. Tubo de borbulhamento; 15. Válvula de eliminação de ar; e 16. Tubo de alimentação

Figura 2 – Minievaporímetro UFV-1 operando com Irrigâmetro modificado para estimativa da evapotranspiração de referência.



1. Estrado; 2. Bordadura; 3. Evaporatório; 4. Tubo pluvial; 5. Coletor; 6. Tubo de alimentação; 7. Válvula de eliminação de ar; 8. Tubo de borbulhamento; 9. Válvula de abastecimento; 10. Escala de leitura; 11. Piezômetro; 12. Visor; 13. Válvula de drenagem; 14. Suporte; 15. Válvula interconectora; 16. Válvula pluvial; e 17. Tubo interconector

Figura 3 – Minievaporímetro UFV-2 operando com Irrigômetro modificado para estimativa da evapotranspiração de referência.

O minievaporímetro UFV-1 (Figura 1) operou como evaporatório de um Irrigômetro modificado, sendo constituído por um recipiente cilíndrico de PVC, com diâmetro externo de 250 mm e interno de 244 mm, altura de 320 mm e fundo localizado a 255 mm da borda. Por sua vez, o minievaporímetro UFV-2 (Figura 2) é dotado, também, de um evaporatório igual ao do UFV-1, possuindo, no entanto, outro recipiente cilíndrico de PVC de mesma altura, com diâmetro externo de 450 mm e espessura igual a 5 mm, o qual também armazena água, formando uma bordadura. Os dois minievaporímetros foram montados sobre estrado de madeira com 150 mm de altura.

O fundo do evaporatório de cada minievaporímetro foi conectado ao Irrigômetro, por meio de um tubo flexível de polietileno. Esse Irrigômetro modificado foi construído com tubo de leitura-alimentação de diâmetro interno de 72 mm e altura de 1 m e escala graduada em milímetros. A relação entre as áreas internas do evaporatório e do tubo de leitura-alimentação do Irrigômetro modificado, igual a 11,6, possibilitou uma sensibilidade na leitura da lâmina evaporada igual a 0,086 mm, medida diretamente numa escala existente no

aparelho. A evaporação foi obtida pela diferença entre duas leituras consecutivas, num período de 24 horas.

Na extremidade inferior do tubo de leitura-alimentação existe uma válvula de drenagem, usada para retirar a água do tubo de borbulhamento e o excesso do tubo de leitura-alimentação, a fim de zerar o aparelho. Na parte superior existem as válvulas de eliminação de ar e a de abastecimento.

Durante o reabastecimento do tubo de leitura-alimentação, a válvula interconectora deve estar fechada e as de escapamento e de abastecimento, abertas. Após o reabastecimento, as duas últimas válvulas são fechadas, abrindo-se a válvula de drenagem até zerar o aparelho. Em seguida, é restabelecido o seu funcionamento normal, por meio da abertura da válvula interconectora.

A ocorrência de chuva eleva o nível da água no evaporatório e, dependendo da sua magnitude, parte dela era drenada para o coletor, por meio do tubo pluvial. O restabelecimento do nível de água original no evaporatório era feito abrindo-se a válvula de drenagem até verificar a iminência do desprendimento de bolha de ar na extremidade inferior do tubo de borbulhamento. Em cada nível de água estudado, a superfície líquida na bordadura foi mantida aproximadamente igual à do evaporatório, por meio de reposição manual todos os dias pela manhã.

A evaporação no minievaporímetro UFV-1 ($E_{V_{ME1}}$) e no minievaporímetro UFV-2 ($E_{V_{ME2}}$) foi obtida nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda e mantida em nível constante pelo Irrigâmetro, com três repetições. O coeficiente médio de cada tipo de minievaporímetro ($K_{t_{ME}}$) foi obtido para cada nível de água, com base no método do lisímetro de lençol freático constante para determinação da evapotranspiração de referência (ET_0), de acordo com a equação 2.

$$K_{t_{ME}} = \frac{ET_0}{E_{V_{ME}}} \quad (2)$$

A ET_0 estimada com o uso dos minievaporímetros foi obtida multiplicando-se o valor diário de evaporação pelo coeficiente médio do minievaporímetro, em cada profundidade. Os valores de ET_0 de cada tipo de

minievaporímetro foram posteriormente correlacionados com os estimados pelo método-padrão, nas escalas de 1, 3, 5 e 7 dias.

O coeficiente do tanque Classe A foi obtido diariamente por meio da aplicação da equação proposta por Allen e Pruitt (1991), para tanques circundados por grama, adotando-se uma bordadura com grama igual a 5 m. Nos períodos de 3, 5 e 7 dias, os valores de ET_0 e dos coeficientes dos minievaporímetros e do tanque Classe A foram calculados usando-se os valores médios dos elementos do clima. Para o lisímetro de drenagem e o lisímetro de lençol freático constante, usaram-se valores médios de ET_0 no período de tempo analisado.

As medições da evaporação nos minievaporímetros e da evapotranspiração nos lisímetros de drenagem e de lençol freático constante foram feitas, diariamente, às nove horas da manhã, durante os meses de julho a dezembro de 2005. Nesse período, também foram determinados os valores de ET_0 por meio dos demais métodos de estimativa estudados. Na análise dos resultados foram excluídos os dias com ocorrência de precipitação pluvial, pois a chuva afeta a leitura da lâmina evaporada e, conseqüentemente, a qualidade dos dados.

Os valores de ET_0 estimados pelos métodos de Penman-Monteith – FAO 56, Penman Modificado, Radiação e Hargreaves-Samani (1985) foram obtidos com o uso do aplicativo computacional REF-ET (ALLEN, 2000).

A análise do desempenho dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 foi feita comparando-se os resultados de ET_0 obtidos em cada profundidade do nível de água com os valores de ET_0 obtidos no lisímetro de lençol freático constante. A metodologia adotada para comparação dos resultados foi proposta por Allen et al. (1986) e adotada por Jensen et al. (1990), a qual se fundamenta na estimativa do erro-padrão (EEP), calculado pela equação:

$$EEP = \left(\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{n - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

em que:

EEP = estimativa do erro-padrão, mm d^{-1} ;

y = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d^{-1} ;

\hat{y} = evapotranspiração de referência estimada pelo método considerado, mm d⁻¹; e
n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita baseando-se nos valores da estimativa do erro-padrão (EEP), do coeficiente de determinação (r^2) e do coeficiente angular (b) das respectivas regressões lineares simples.

A precisão foi dada pelo coeficiente de determinação, o qual indica o grau em que a regressão explica a soma do quadrado total. A aproximação dos valores de ET₀ estimados por determinado método em relação aos valores obtidos pelo método-padrão foi obtida por um índice, designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam desde zero, em que não existe concordância, a 1 para concordância perfeita.

O índice de concordância é calculado aplicando-se a seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (4)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

P_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método considerado, mm d⁻¹;

O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;

\bar{O} = média dos valores de ET₀ obtidos pelo método-padrão, mm d⁻¹; e

n = número de observações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 4, 5 e 6 encontram-se os valores diários dos elementos meteorológicos usados na estimativa da evapotranspiração de referência, obtidos durante o período estudado.

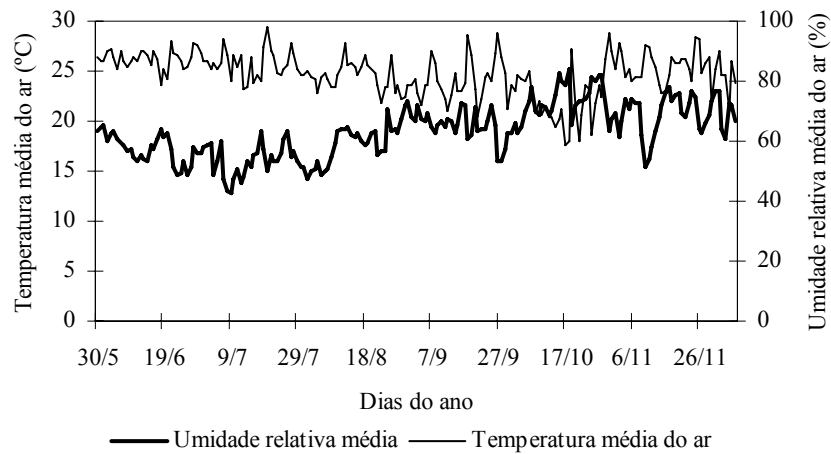


Figura 4 – Valores diários da umidade relativa e da temperatura média do ar obtidos durante o período estudado.

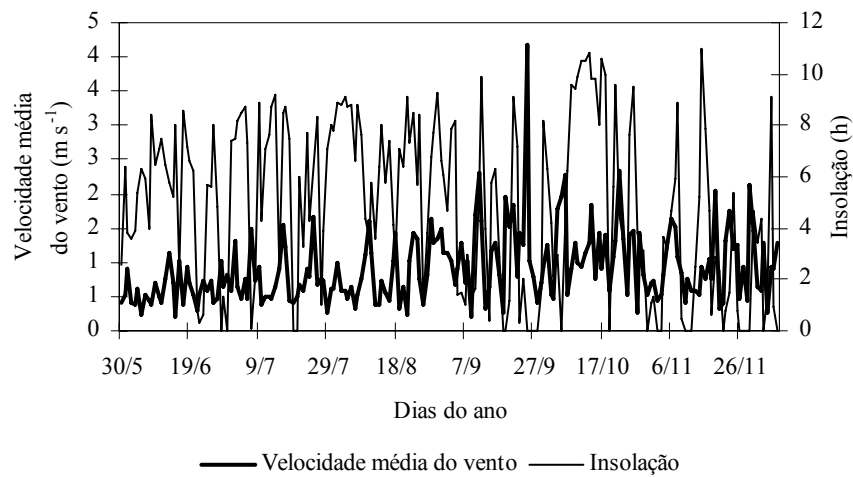


Figura 5 – Valores diários da velocidade média do vento e da insolação obtidos durante o período estudado.

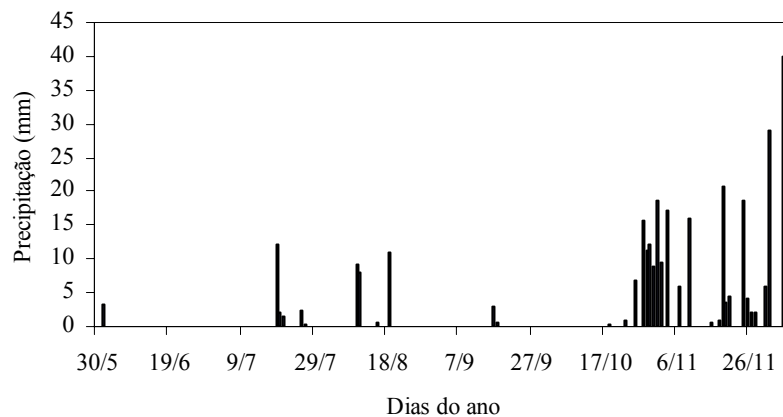


Figura 6 – Valores diários de precipitação obtidos durante o período estudado.

Na Figura 4 observa-se que a umidade relativa média diária foi superior a 70% na maioria dos dias estudados, sendo classificada como alta, e a temperatura média diária foi aproximadamente igual a 20 °C. Na Figura 5, a velocidade média do vento foi inferior a 2 m s⁻¹, considerada leve, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977). Essas condições climáticas, representadas pela umidade relativa e velocidade do vento, permitiram determinar apenas um coeficiente para cada profundidade do nível de água nos minievaporímetros, em cada intervalo de tempo analisado, como pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores dos coeficientes dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm, em cada período de tempo analisado

Umidade Relativa (%)	Velocidade do Vento (m s ⁻¹)	Tempo (dias)	Profundidades dos Níveis de Água (mm)			
			30	45	60	75
Alta >70	< 2,0 (leve)	Minievaporímetro UFV-1				
		Um	0,47	0,49	0,51	0,52
		Três	0,47	0,49	0,51	0,52
		Cinco	0,47	0,49	0,51	0,52
		Sete	0,47	0,49	0,51	0,52
		Minievaporímetro UFV-2				
		Um	0,59	0,63	0,65	0,68
		Três	0,59	0,62	0,65	0,67
		Cinco	0,59	0,62	0,65	0,67
		Sete	0,59	0,62	0,64	0,67

Na Tabela 5 constata-se que houve ligeira tendência de elevação dos valores dos coeficientes dos dois minievaporímetros com o aumento da profundidade do nível de água no interior do evaporatório. Essa elevação significa redução da evaporação, contrariando os resultados obtidos por Sleight (1917). Com relação ao intervalo de tempo estudado, observou-se que os valores dos coeficientes permaneceram constantes nos dois minievaporímetros. Assim, recomenda-se utilizar os valores de 0,47; 0,49; 0,51; e 0,52 no minievaporímetro UFV-1 e de 0,59; 0,63; 0,65; e 0,67 no minievaporímetro UFV-2, nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm, respectivamente.

Quando o nível da água no minievaporímetro se encontra mais próximo da superfície, ocorre maior interceptação da radiação solar, variável que tem maior influência no processo de evaporação (CHANG, 1971), ao mesmo tempo que

favorece a ação do vento atuando na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante, acarretando maiores valores de evaporação.

Na Tabela 5 observa-se que a bordadura com água teve efeito expressivo na evaporação ocorrida no minievaporímetro UFV-2, apresentando uma diferença média 28% nos valores dos coeficientes em cada profundidade estudada, em comparação com os valores obtidos no minievaporímetro UFV-1. O efeito direto da bordadura está relacionado à interceptação dos raios solares pela parede externa do minievaporímetro UFV-2, reduzindo a transferência de calor para a massa de água no interior do evaporatório. Ao contrário, no minievaporímetro UFV-1 a parede do evaporatório está diretamente exposta à radiação, o que resultou em maior evaporação.

Na Tabela 6, encontram-se os parâmetros da equação de regressão (a, b), o coeficiente de determinação (r^2), a estimativa do erro-padrão (EEP) e o índice de concordância (d), obtidos para valores diários de ET_0 estimados por meio dos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 e pelos demais métodos estudados, tendo-se por base o método do lisímetro de lençol freático constante.

Tabela 6 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos diários

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Lisímetro L. Freático Constante	-	-	-	-	-	2,80
Penman Modificado	0,000	1,229	0,97	0,71	0,91	3,12
Hargreaves-Samani	1,500	0,855	0,71	1,24	0,73	3,89
Radiação	0,000	1,221	0,98	0,88	0,87	3,44
Tanque Classe A	0,378	0,828	0,84	0,42	0,95	2,69
Penman-Monteith – FAO 56	0,459	0,904	0,83	0,47	0,95	2,99
Lisímetro de drenagem	0,491	0,812	0,62	0,68	0,88	2,76
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,275	0,909	0,88	0,36	0,97	2,81
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,276	0,908	0,86	0,39	0,96	2,81
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	1,002	0,99	0,34	0,97	2,82
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,286	0,903	0,88	0,35	0,97	2,81
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	0,000	1,016	0,98	0,42	0,96	2,85
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,016	0,98	0,43	0,96	2,85
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	0,000	1,024	0,98	0,46	0,95	2,86
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	0,000	1,028	0,98	0,47	0,95	2,87

Na Tabela 6 observa-se que o método de Penman Modificado, que considera os aspectos aerodinâmicos e de radiação, apresentou boa estimativa da ET_0 , com uma pequena superestimativa da evapotranspiração de referência

obtida pelo método-padrão, com a estimativa do erro-padrão igual a $0,71 \text{ mm d}^{-1}$. Entretanto, os métodos de Hargreaves-Samani e da Radiação superestimaram a evapotranspiração de referência, apresentando estimativa do erro-padrão iguais a $1,24$ e $0,88 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. Essas superestimativas corroboram os resultados apresentados por Jensen et al. (1990) e Mendonça et al. (2003), que trabalharam com lisímetros de pesagem no Município de Campos dos Goytacazes, Estado do Rio de Janeiro. De acordo com Jensen et al. (1990), os métodos que se baseiam na radiação e temperatura do ar, como é o caso de Hargreaves-Samani, tendem a superestimar a evapotranspiração de referência em 15 a 25%, em climas úmidos.

O tanque Classe A e o lisímetro de drenagem apresentaram resultados satisfatórios de estimativa da ET_0 diária, com estimativa do erro-padrão iguais a $0,59$ e $0,61 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente, apesar de serem recomendados para intervalos de tempo superior a sete dias para estimativa da evapotranspiração de referência. Esses dois métodos apresentaram uma subestimativa da ET_0 diária, em relação ao método-padrão, iguais a 3,9 e 1,4%, respectivamente.

O método Penman-Monteith – FAO 56, adotado como padrão mundial, em trabalhos sobre ET_0 superestimou a ET_0 obtida no lisímetro de lençol freático constante em 6,7%, com estimativa do erro-padrão igual a $0,47 \text{ mm d}^{-1}$. Esse resultado indica que o lisímetro com lençol freático constante, mantido a 15 cm de profundidade, nas condições climáticas mencionadas neste estudo, apresentou excelente resultado de estimativa diária da ET_0 . O excelente desempenho do lisímetro de lençol freático constante resultou do bom desenvolvimento da grama-batatais e da alta sensibilidade de leitura da lâmina evapotranspirada, igual a $0,018 \text{ mm}$, tornando-se um equipamento preciso.

A pequena subestimativa da ET_0 obtida no lisímetro de lençol freático constante em relação ao método Penman-Monteith – FAO 56 pode estar relacionada aos freqüentes cortes da grama-batatais, feitos a cada duas semanas para manter a sua altura entre 8 e 15 cm, como recomendaram Allen et al. (1998), Smith (1991) e Doorenbos e Pruitt (1977). Esses cortes provocam injúrias na planta que afetam a taxa de evapotranspiração nos primeiros dias subsequentes aos cortes. Allen et al. (1989) mencionaram que tanto a cobertura quanto a altura

da grama nos lisímetros podem superestimar ou subestimar a ET_0 pelos métodos combinados.

Os minievaporímetros operando com Irrigâmetro modificado apresentaram estimativas de ET_0 muito próximas das obtidas pelo método do lisímetro de lençol freático constante, em todos os níveis de água estudados, com estimativa do erro-padrão variando entre 0,34 a 0,39 e 0,42 a 0,47 mm d^{-1} , nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, respectivamente. O minievaporímetro UFV-1 apresentou excelentes resultados de estimativa da ET_0 em todos os níveis de água estudados. Entretanto, apenas no nível de água igual a 60 mm da sua borda a equação de regressão apresentou condições ideais de estimativa, com $a = 0$ e b próximo a 1, superestimando a ET_0 obtida pelo método-padrão em 0,7%. As equações de regressões obtidas com o minievaporímetro UFV-2 apresentaram condições próximas do ideal em todos os níveis de água estudados.

A análise dos valores dos coeficientes angular, de determinação, do índice de concordância e da estimativa do erro-padrão indicou que os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 foram, dentre os métodos estudados, os que melhor estimaram a ET_0 com base no método-padrão, com superestimativa média igual a 0,35 e 1,7%, respectivamente. Assim, os minievaporímetros operando com Irrigâmetro modificado apresentaram resultados confiáveis para a estimativa de ET_0 em períodos diários, que associados ao baixo custo e à alta praticidade tornam esses aparelhos indicados para fins de manejo da água de irrigação.

Na Figura 7 encontram-se as equações de regressão, o coeficiente de determinação e os valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos estudados e pelo método do lisímetro de lençol freático constante.

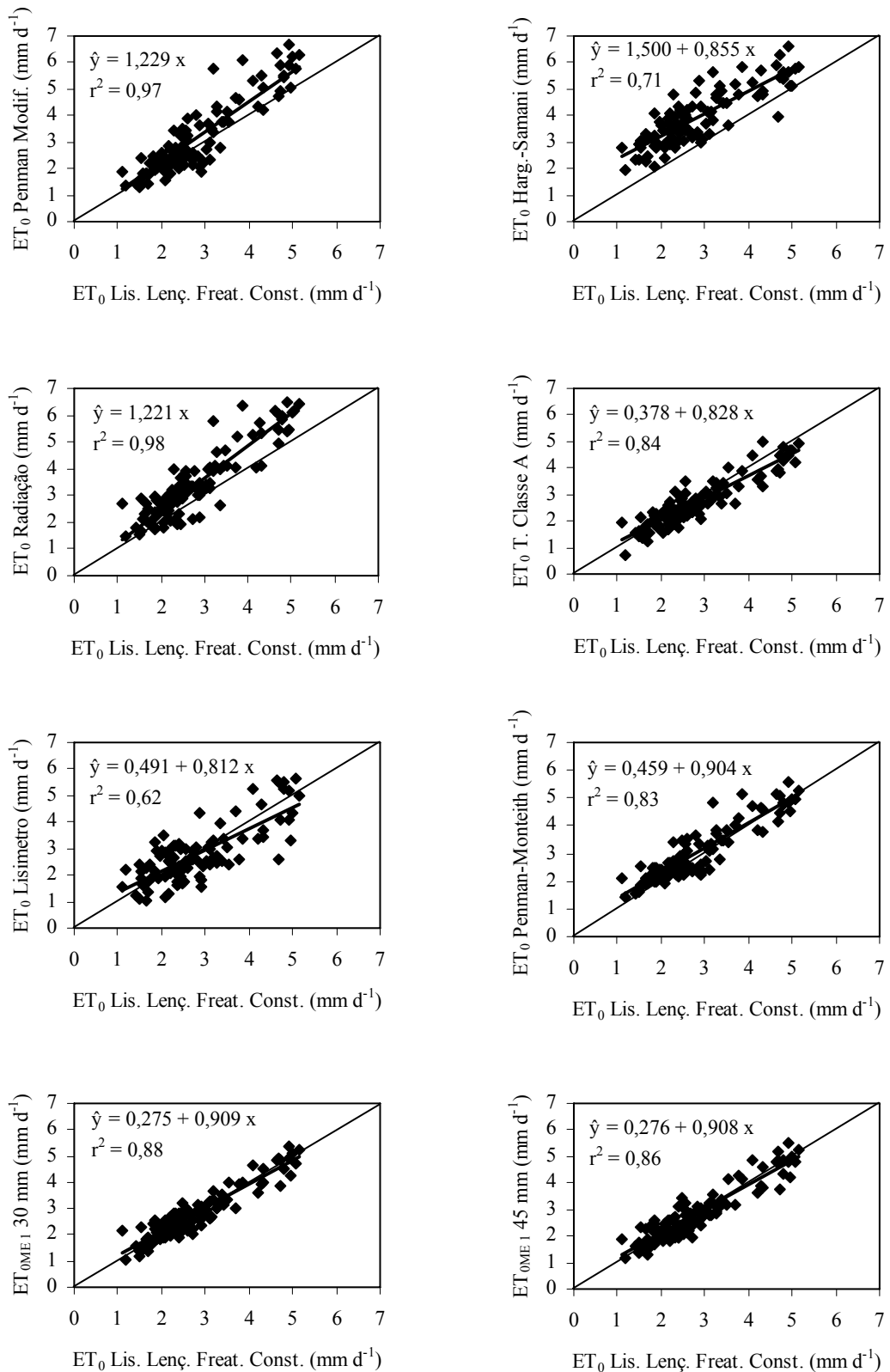


Figura 7 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e Penman-Monteith – FAO 56 e pelo minievaporímetro UFF-1 (ET_{OME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30 e 45 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos diários. Continua...

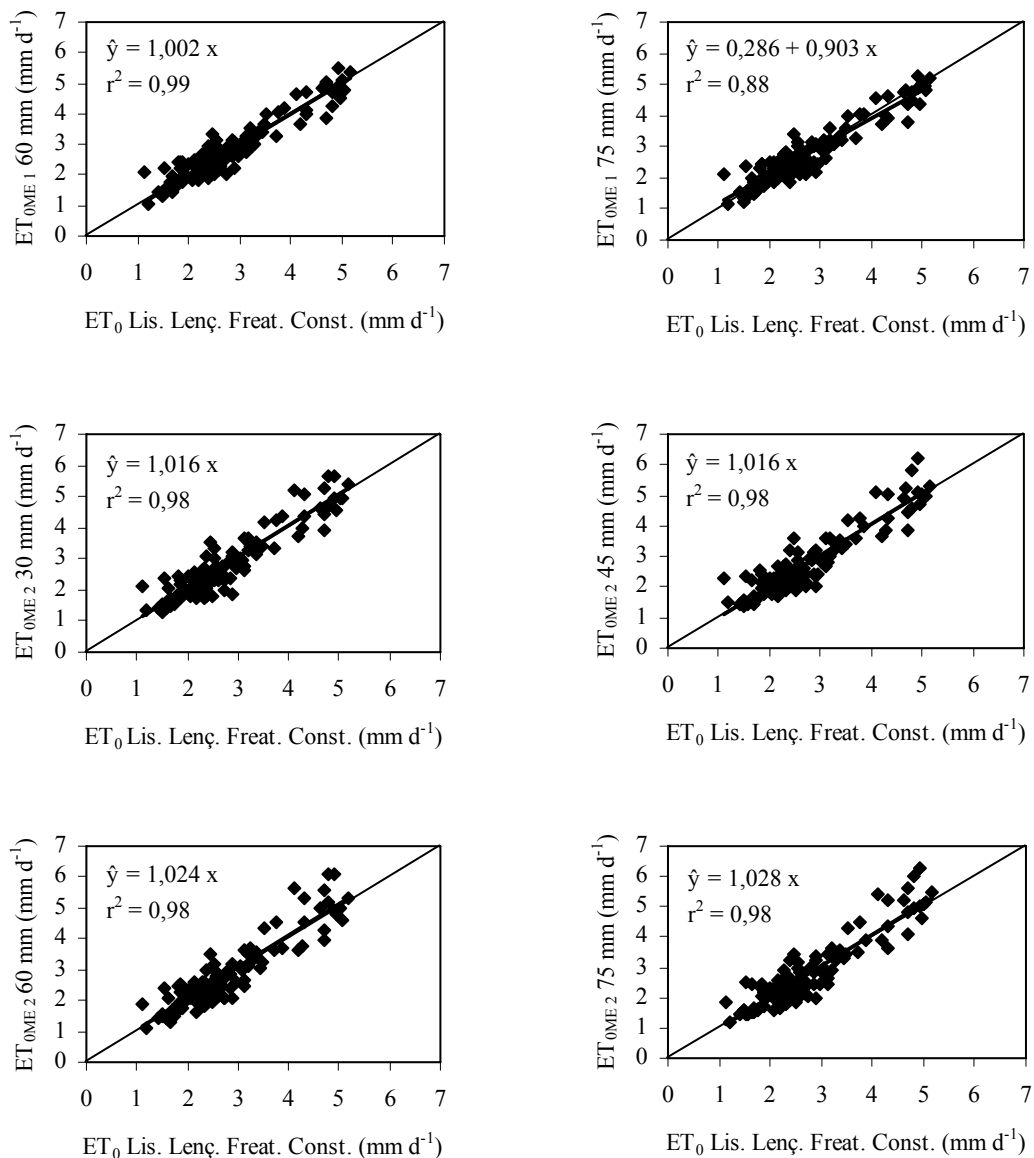


Figura 7 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{0ME1}) nas profundidades do nível de água iguais a 60 e 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{0ME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos diários.

O método de Penman Modificado, Hargreaves-Samani e Radiação superestimaram a ET_0 obtida no lisímetro de lençol freático constante, ocorrendo comportamento contrário com o uso do lisímetro de drenagem e com o tanque Classe A, observando-se nesses métodos maior dispersão dos dados de ET_0 em relação à linha de tendência para valores superiores a 3,5 mm d⁻¹.

O método de Penman-Monteith – FAO 56, dentre os métodos empíricos estudados, teve o melhor desempenho, apresentando declividade da reta

praticamente igual a 1, em comparação com o método do lisímetro de lençol freático constante. Diversos trabalhos indicaram boa correlação entre dados ET_0 obtidos em lisímetros e estimados pela equação de Penman-Monteith – FAO 56, podendo-se citar Allen (1986), Allen et al. (1989), Jensen et al. (1990), Camargo e Sentelhas (1997), Sentelhas (1998), Pereira (1998) e Hussein (1999).

Os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 apresentaram desempenho similar ao método de Penman-Monteith – FAO 56 para estimativa da ET_0 , em todos os níveis de água avaliados, superando os demais métodos de estimativa da ET_0 considerados neste estudo. Esses métodos apresentaram menor dispersão dos dados diários de ET_0 em torno da linha de valores 1:1, com base no método de lisímetro de lençol freático constante operando com Irrigâmetro modificado.

Seguindo a metodologia estatística aplicada na escala diária, procedeu-se também à comparação dos métodos nos períodos de três, cinco e sete dias, conforme apresentado nas Tabelas 7, 8 e 9, respectivamente.

Tabela 7 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos de três dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Lisímetro L. Freático Constante	-	-	-	-	-	2,79
Penman Modificado	-0,527	1,301	0,91	0,56	0,93	3,11
Hargreaves-Samani	1,163	0,982	0,85	1,19	0,72	3,91
Radiação	0,000	1,218	0,99	0,74	0,87	3,43
Tanque Classe A	0,411	0,833	0,86	0,34	0,96	2,74
Penman-Monteith – FAO 56	0,000	1,056	0,99	0,32	0,97	2,98
Lisímetro de percolação	0,000	0,990	0,98	0,43	0,95	2,76
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,304	0,888	0,93	0,24	0,98	2,78
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,313	0,884	0,92	0,25	0,98	2,78
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	0,994	0,99	0,22	0,98	2,79
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,308	0,886	0,94	0,23	0,98	2,78
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	0,000	1,008	0,99	0,24	0,98	2,81
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,008	0,99	0,25	0,98	2,81
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	0,000	1,017	0,99	0,28	0,98	2,83
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	0,000	1,017	0,99	0,29	0,98	2,83

Tabela 8 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos de cinco dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Lisímetro L. Freático Constante	-	-	-	-	-	2,79
Penman Modificado	-0,533	1,311	0,93	0,53	0,93	3,12
Hargreaves-Samani	1,187	0,979	0,85	1,21	0,71	3,92
Radiação	0,000	1,219	0,99	0,71	0,88	3,43
Tanque Classe A	0,000	0,969	0,99	0,28	0,97	2,75
Pemnan-Monteith – FAO 56	0,000	1,061	0,99	0,27	0,97	2,98
Lisímetro de percolação	0,000	0,993	0,98	0,41	0,95	2,77
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,000	0,989	0,99	0,21	0,98	2,78
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,000	0,989	0,99	0,23	0,98	2,78
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	0,994	0,99	0,20	0,99	2,79
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,291	0,892	0,99	0,19	0,99	2,78
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	0,000	1,008	0,99	0,21	0,99	2,81
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,008	0,99	0,21	0,99	2,81
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	0,000	1,017	0,99	0,22	0,99	2,82
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	0,000	1,017	0,99	0,25	0,98	2,82

Tabela 9 – Parâmetros da equação de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2), estimativa do erro-padrão (EEP), índice de concordância (d) e valores de ET_0 para períodos de sete dias

Método	a	b	r^2	EEP	d	ET_0 (mm d ⁻¹)
Lisímetro L. Freático Constante	-	-	-	-	-	2,80
Penman Modificado	-0,670	1,354	0,95	0,51	0,93	3,12
Hargreaves-Samani	0,890	1,084	0,90	1,20	0,70	3,92
Radiação	0,000	1,216	0,99	0,70	0,86	3,42
Tanque Classe A	0,465	0,818	0,92	0,25	0,97	2,75
Penman-Monteith – FAO 56	0,000	1,061	0,99	0,27	0,97	2,98
Lisímetro de percolação	-0,498	1,166	0,97	0,22	0,98	2,76
Miniev. UFV-1, P = 30 mm	0,000	0,988	0,99	0,18	0,99	2,79
Miniev. UFV-1, P = 45 mm	0,000	0,987	0,99	0,18	0,99	2,78
Miniev. UFV-1, P = 60 mm	0,000	0,994	0,99	0,16	0,99	2,79
Miniev. UFV-1, P = 75 mm	0,000	0,989	0,99	0,17	0,99	2,79
Miniev. UFV-2, P = 30 mm	0,000	1,006	0,99	0,18	0,99	2,81
Miniev. UFV-2, P = 45 mm	0,000	1,006	0,99	0,18	0,99	2,81
Miniev. UFV-2, P = 60 mm	0,000	1,013	0,99	0,20	0,99	2,82
Miniev. UFV-2, P = 75 mm	0,000	1,014	0,99	0,20	0,99	2,82

Analisando os dados das Tabelas 7, 8 e 9, observa-se que o agrupamento da ET_0 em períodos de três, cinco e sete dias, respectivamente, resultou em aumento dos coeficientes de determinação e de ajuste, com valores mais próximos da unidade, e em redução da estimativa do erro-padrão, com valores mais próximos de zero, na maioria dos métodos estudados, comparativamente aos valores obtidos em períodos diários. Isso era esperado, pois o agrupamento

dos valores de ET_0 em maior período de tempo melhora o desempenho dos métodos, por causa da suavização das flutuações pontuais dos dados.

O método de Penman-Monteith – FAO 56 apresentou valores da estimativa do erro-padrão em intervalos de três, cinco e sete dias, iguais a 0,32; 0,29; e 0,27 $mm\ d^{-1}$, respectivamente, com valor do índice de concordância igual a 0,97 e coeficiente de determinação igual a 0,99. Assim, o lisímetro de lençol freático constante operando com Irrigâmetro modificado mostrou-se adequado para estimar a ET_0 em todos os intervalos de tempo estudados.

Nos intervalos de três, cinco e sete dias, os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, operando com Irrigâmetro modificado, apresentaram valores de declividade da reta praticamente iguais a 1. O minievaporímetro UFV-1 exibiu valores máximos da estimativa do erro-padrão iguais a 0,25; 0,23; e 0,18 $mm\ d^{-1}$; valores mínimos do índice de concordância iguais a 0,98; 0,98; e 0,99, e coeficiente de determinação mínimos iguais a 0,92; 0,99; e 0,99, respectivamente nos períodos de tempo iguais a três, cinco e sete dias .

No minievaporímetro UFV-2, obtiveram-se, nos períodos de tempo de três, cinco e sete dias, valores máximos da estimativa do erro-padrão iguais a 0,29; 0,25; e 0,20 $mm\ d^{-1}$ e mínimos do índice de concordância iguais a 0,98; 0,98; e 0,99, respectivamente, com coeficiente de determinação próximo a 0,99.

Esses resultados indicam que os minievaporímetros apresentaram melhor desempenho para a estimativa da ET_0 do que os demais métodos estudados, uma vez que os valores dos parâmetros das equações de regressão ajustadas foram muito próximos da condição ideal, ou seja, $a = 0$ e $b = 1$, com estimativas da ET_0 praticamente iguais às do método do lisímetro de lençol freático constante.

Nas Figuras 8, 9 e 10 estão apresentadas as equações de regressão, os coeficientes de determinação e os valores de ET_0 estimados pelos métodos estudados e medidos no lisímetro de lençol freático constante, em períodos de três, cinco e sete dias, respectivamente.

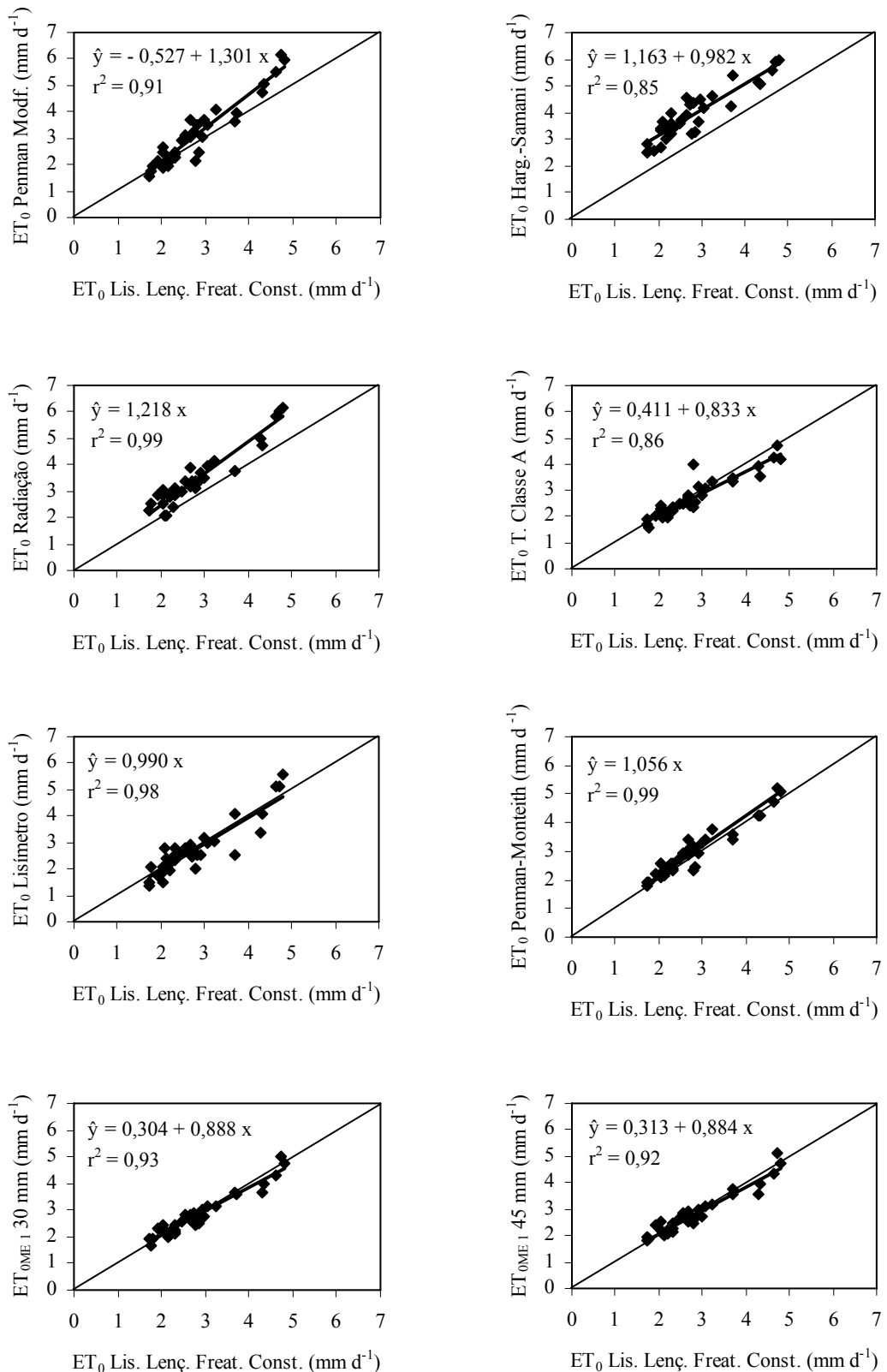


Figura 8 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e Penman-Monteith – FAO 56 e pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30 e 45 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos de três dias. Continua...

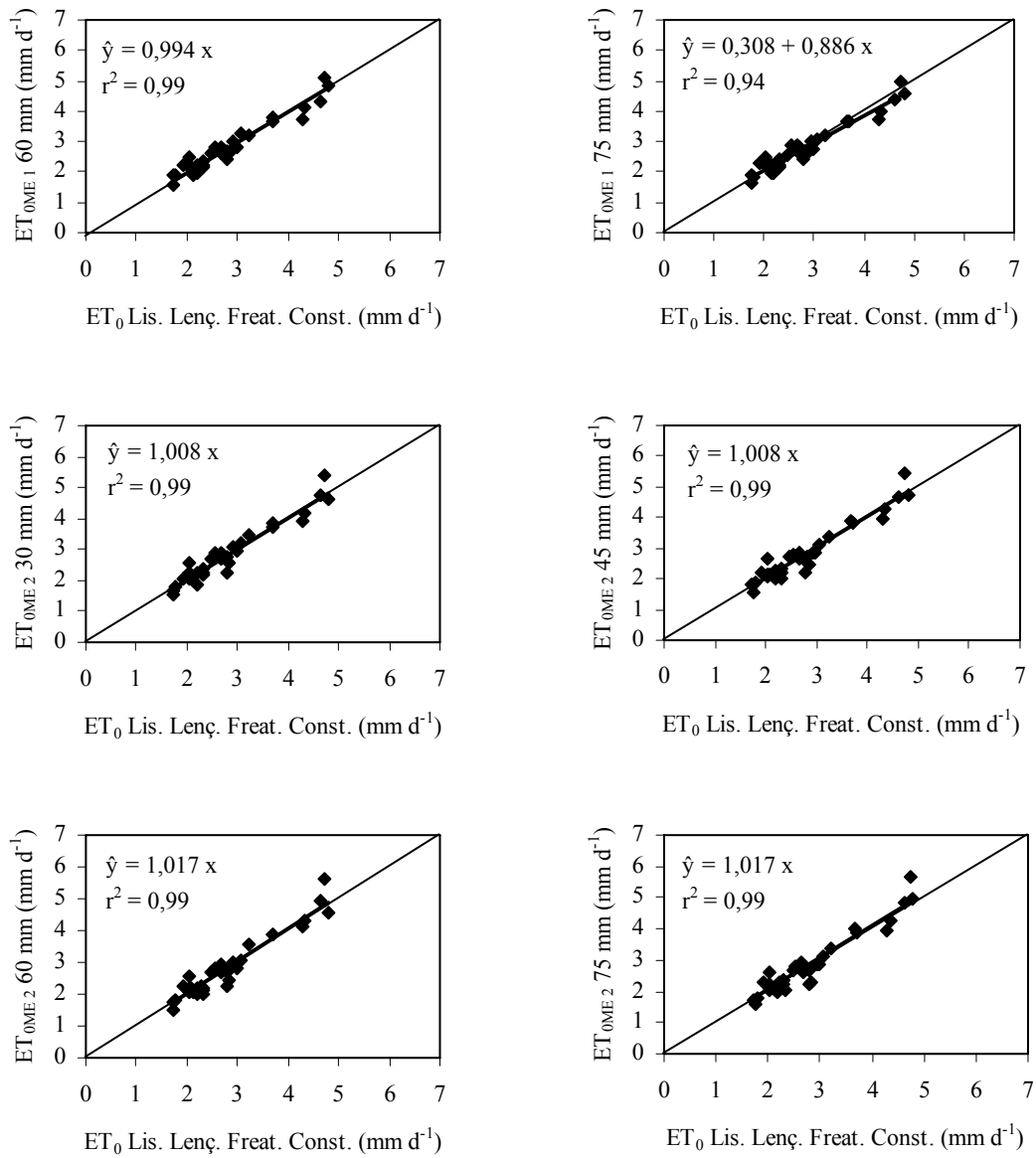


Figura 8 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}) nas profundidades do nível de água iguais a 60 e 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{OME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos de três dias.

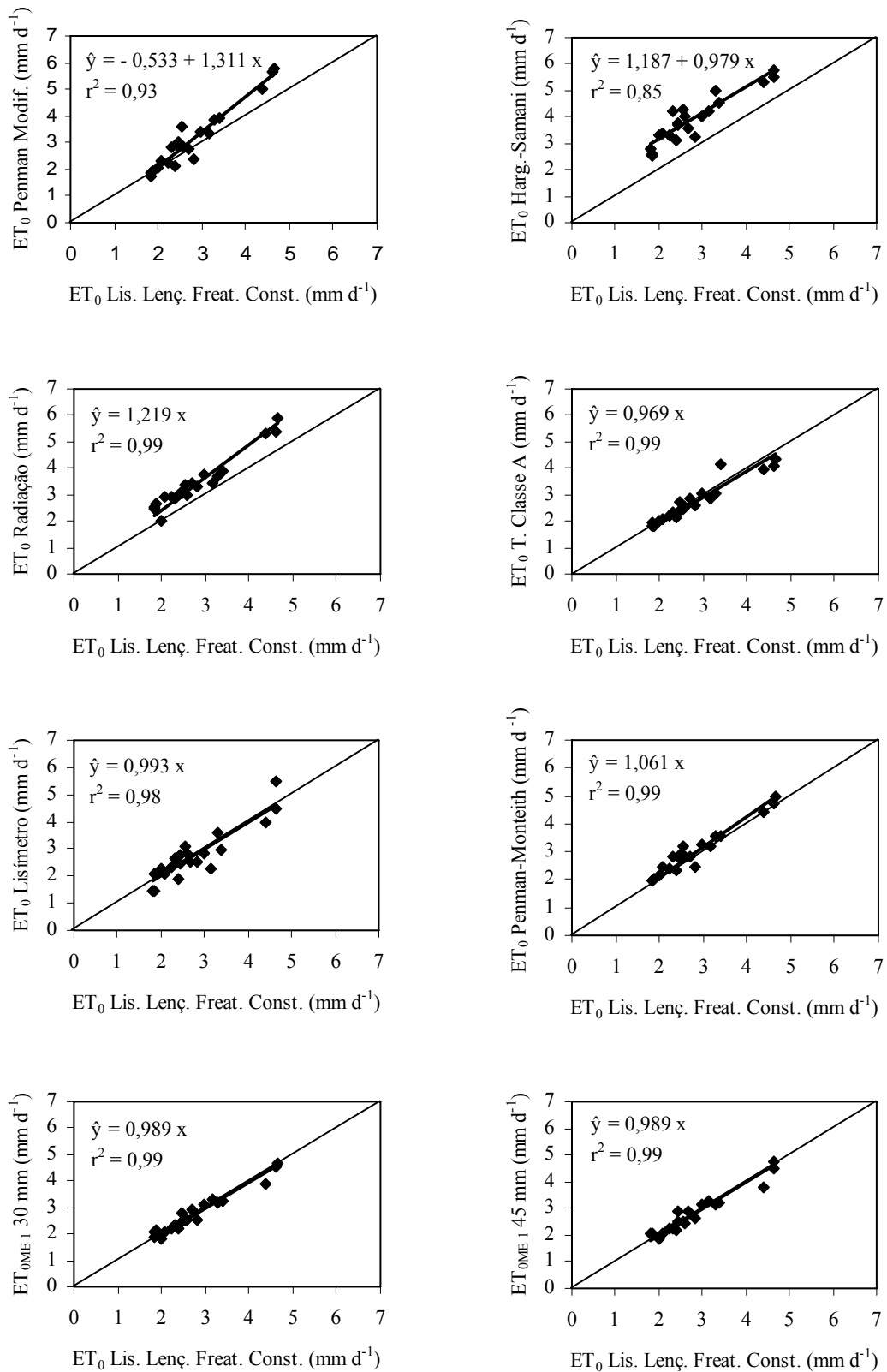


Figura 9 – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e Penman-Monteith – FAO 56 e pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30 e 45 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos de cinco dias. Continua...

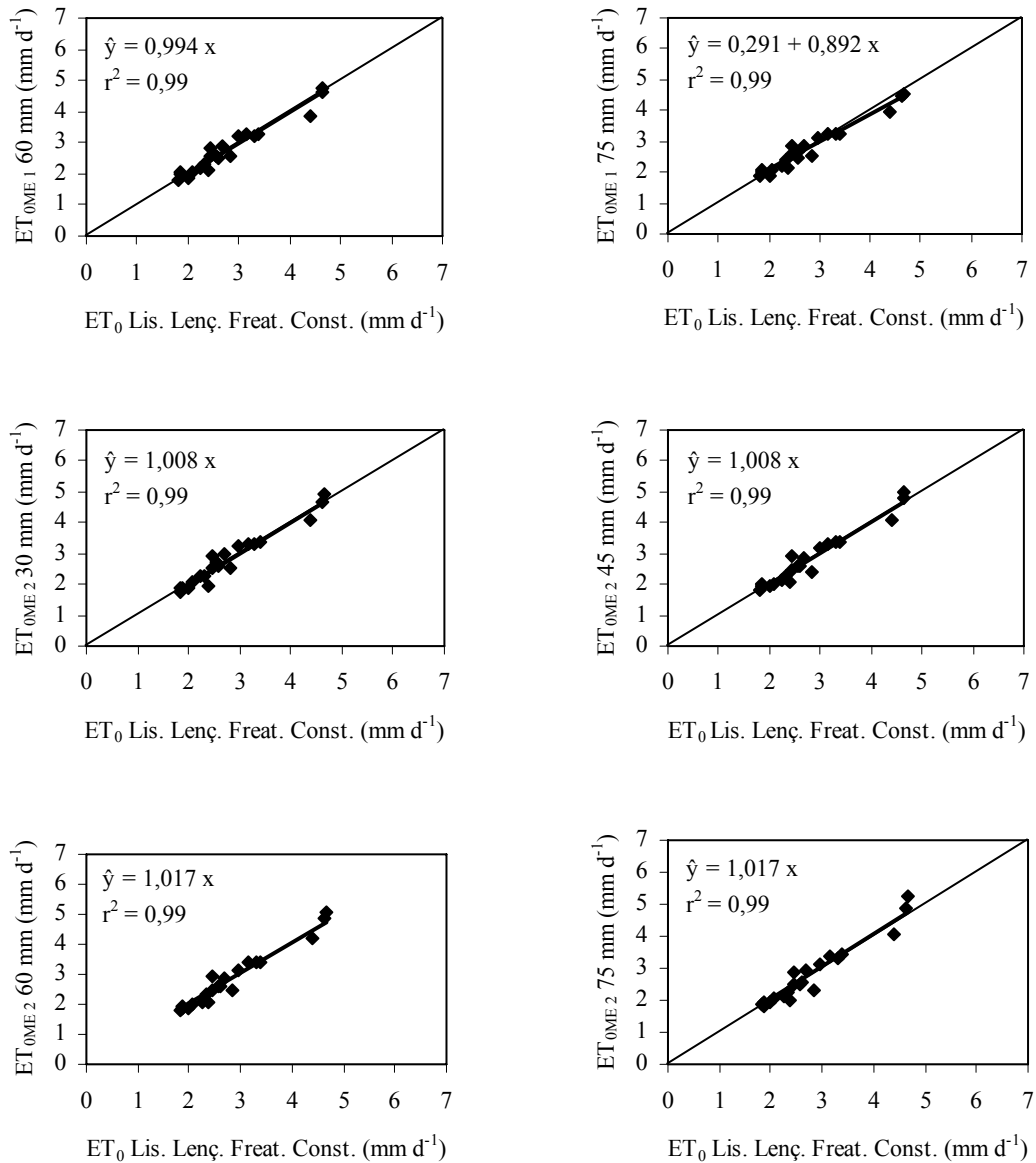


Figura 9 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{OME1}) nas profundidades do nível de água iguais a 60 e 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{OME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos de cinco dias.

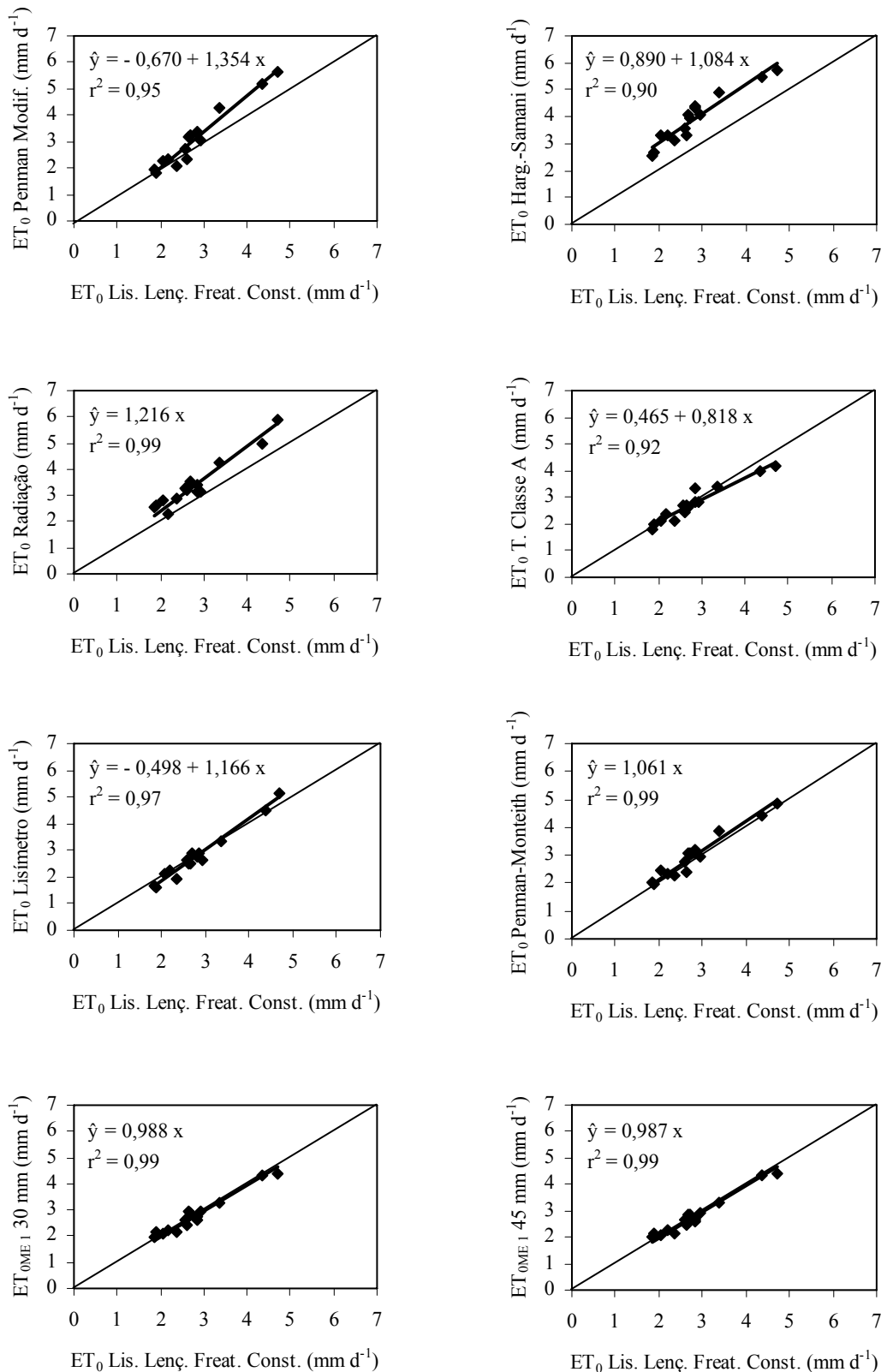


Figura 10 – Evapotranspiração de referência (ET₀) estimada pelos métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani, Radiação, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e Penman-Monteith – FAO 56 e pelo minievaporímetro Ufv-1 (ET_{0ME1}), nas profundidades dos níveis de água iguais a 30 e 45 mm da borda, em comparação com os valores de ET₀ determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos de sete dias. Continua...

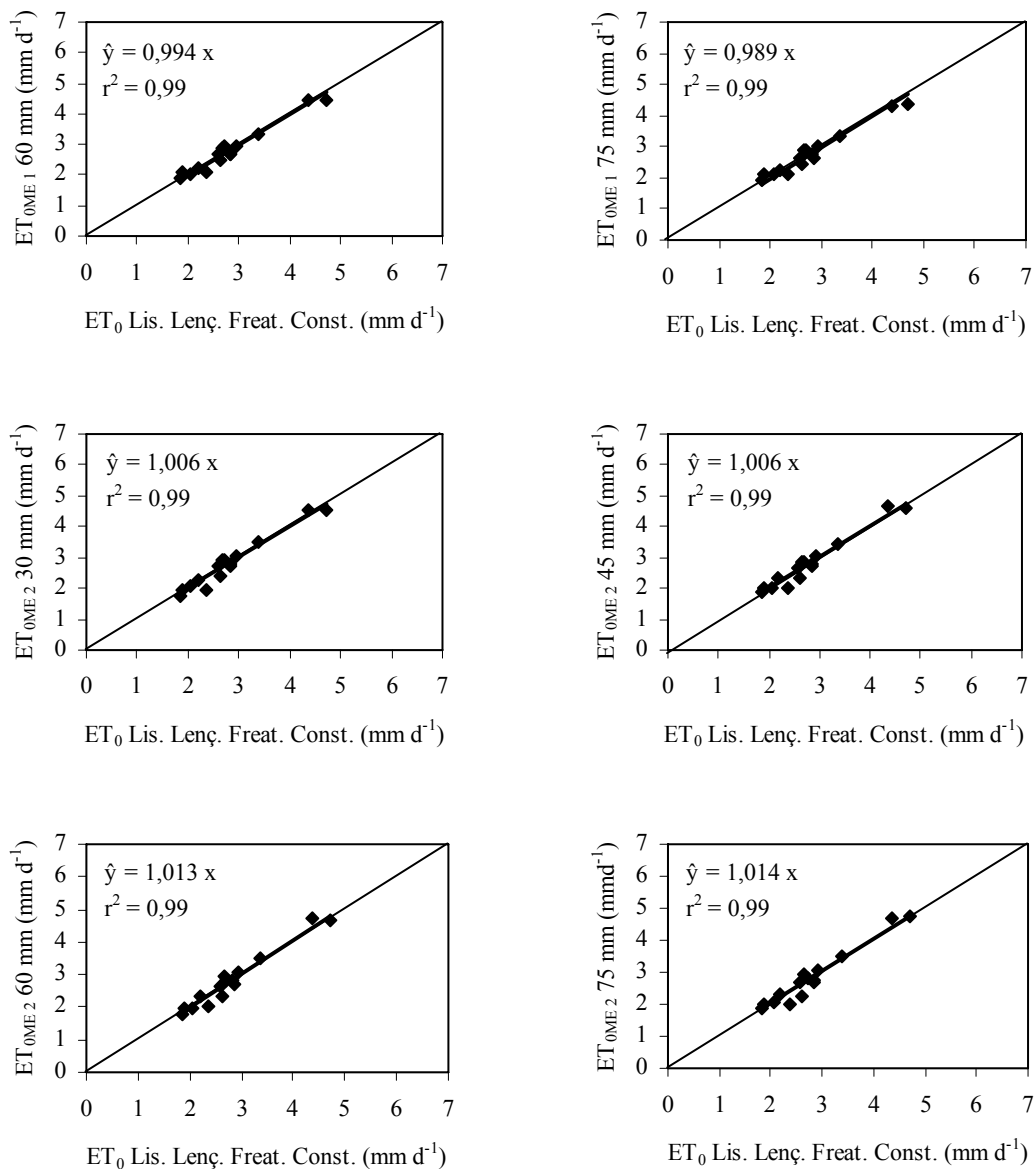


Figura 10 (Continuação) – Evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pelo minievaporímetro UFV-1 (ET_{0ME1}) nas profundidades do nível de água iguais a 60 e 75 mm e pelo minievaporímetro UFV-2 (ET_{0ME2}) nas profundidades do nível de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda, em comparação com os valores de ET_0 determinados pelo lisímetro de lençol freático constante, para períodos de sete dias.

Na análise das Figuras 8, 9 e 10 observou-se que o agrupamento dos dados em períodos maiores tende a melhorar a estimativa da ET_0 , mantendo-se o mesmo comportamento de os métodos de Penmam Modificado, Hargreaves-Samani e Radiação superestimarem e de o lisímetro de drenagem e de o tanque Classe A subestimarem levemente a ET_0 , comparativamente ao método do lisímetro de lençol freático constante.

O lisímetro de drenagem e o tanque Classe A apresentaram melhoria expressiva na estimativa da ET_0 em períodos de três, cinco e sete dias, comparativamente aos valores obtidos nos períodos diários, com menores estimativas do erro-padrão e maior índice de concordância, justificando o seu uso com mais precisão na determinação do consumo de água por uma cultura em período de tempo superior a sete dias, conforme recomendação de Jensen et al. (1990) e Doorenbos e Pruitt (1977).

Nos períodos de três, cinco e sete dias, a média dos valores de evapotranspiração de referência obtidos nos minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, em cada profundidade do nível de água, foi praticamente igual à média da ET_0 obtida pelo método do lisímetro de lençol freático constante. É importante enfatizar que o excelente desempenho dos minievaporímetros está condicionado ao uso do Irrigâmetro modificado, o qual permitiu obter medidas de lâmina evaporada com sensibilidade de 0,086 mm.

4. CONCLUSÕES

1. Os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado apresentaram desempenho adequado, comparativamente ao método do lisímetro de lençol freático constante, para estimar a ET_0 nos períodos de tempo e nas profundidades dos níveis de água estudados.
2. O minievaporímetro UFV-1 apresentou valores dos coeficientes iguais a 0,47; 0,49; 0,51; e 0,52, enquanto no minievaporímetro UFV-2 eles foram iguais a 0,59; 0,63; 0,65; e 0,67, respectivamente nas profundidades dos níveis de água iguais a 30, 45, 60 e 75 mm da borda.
3. Os métodos de Penman Modificado, Hargreaves-Samani e Radiação superestimaram a ET_0 obtida pelo método do lisímetro de lençol freático constante em todos os intervalos de tempo estudados, enquanto o lisímetro de drenagem e o tanque Classe A subestimaram.

5. REFERÊNCIAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Los lisímetros**. Roma: FAO, 1986. 59 p. (FAO, Paper 39).

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 4, p. 348-386, 1986.

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, New York, v. 81, p. 650-662, 1989.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and drainage Paper, 56).

ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O. Reference evapotranspiration factors. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 5, p. 758-772, 1991.

ALLEN, R.G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82 p.

AMORIM, M.C. de. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ANDRADE, L. M. de. **Efeito de diferentes profundidades freáticas sobre a evapotranspiração e sobre a produção e os componentes da produção do milho-doce (*Zea mays*, L.)**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1991. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 1996. 625 p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CHANG, J. **Climate and agriculture**. Chicago: Aldine Publishing, 1971. 296 p.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage – Paper 24).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPS. Documento 1).

GRASSI, J. **Drenaje de tierras agrícolas**. Merida, Venezuela: Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras, 1991. 317 p.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, New York, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; JENSEN, M.E. History of lysimeter design and use for evapotranspiration. In: **Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements**. New York: ASCE, 1991. p. 1-19.

HUSSEIN, A.S.A. Grass et estimates using Penman-type equations in Central Sudan. **Journal of irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 125, n. 6, p. 324-329, 1999.

JENSEN, M.E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1973. 215 p.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

MARTINEZ, H.E.; SILVA, J.B. da. **Introdução ao cultivo hidropônico de plantas**. 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 111 p.

MENDONÇA, J.C.; SOUZA, E.F. de; BERNARDO, S.; DIAS, G.P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

PEREIRA, F.A de C. **Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) em relação a um lisímetro de pesagem**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Imp. Univ., 1998. 87 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

PEREIRA, F.A de C. **Efeitos de diferentes profundidades de lençol freático sobre a evapotranspiração, o coeficiente de cultura, a produção e os componentes de produção da alface (*Lactuca sativa* L.)**. Viçosa, MG: UFV, Impr. Univ., 1994. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

RUIZ, A.H. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 44, n. 255, p. 533-546, 1997.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1996. 176 p.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, Imp. Univ., 1998. 97 f. Tese (Doutorado em Agronomia) –

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, D.F. **Análises quantitativa e qualitativa do crescimento e desenvolvimento da grama-batatais e grama-esmeralda em diferentes lâminas de irrigação.** Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SLEIGHT, R.B. Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural research**, Washington, v. 10, n. 5, p. 209-262, 1917.

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

WILLMOTT, C.J.; CKLESON, S.G.; DAVIS, R.E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.