

Minilísímetro com lençol freático constante operando com Irrigâmetro® para medida da evapotranspiração de referência

Minilísímetro con freático hídrico constante operando com Irrigâmetro® para medir la evapotraspiración de referencia

Minilysimeter with constant groundwater table operating with Irrigâmetro® to calculate the reference evapotranspiration

Franklin José VALBUENA MATERÁN ✉¹, **Rubens ALVES DE OLIVEIRA**², **Gilberto CHOHAKU SEDIYAMA**², **Paulo Roberto CECON**³, **Hugo Alberto RUIZ**⁴ e **Cristiano TAGLIAFERRE**²

¹Departamento de Engenharia de Solos e Águas, Núcleo Agropecuário, Faculdade de Agronomia de La Universidad Del Zulia (LUZ), Av. Goajira, Maracaibo, Zulia, Venezuela, ²Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), MG, Brasil, ³Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Escola de Agronomia, Departamento de Engenharia Agrícola e Solo, Brasil y ⁴Departamento de Informática, UFV e Departamento de Solos, UFV. E-mail: franklinvalb@yahoo.com ✉ Autor para correspondência

Recebido: 13/05/2008 Fim da primeira arbitragem: 18/06/2008 Primeira revisão recebida: 07/02/2009
Fim da segunda arbitragem: 21/02/2009 Segunda revisão recebida: 09/03/2009 Aceito: 11/03/2009

RESUMO

Este trabalho foi conduzido na Unidade de Pesquisa do Irrigâmetro® pertencente ao Universidade Federal de Viçosa (UFV). Instalaram-se 16 minilísímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro® vegetados com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), em delineamento inteiramente casualizado. O Irrigâmetro® é um aparelho patenteado pela UFV para manejo da água em projetos de irrigação. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos (15, 20, 25 e 30 cm) estabelecidos nos minilísímetros (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições. Objetivou-se, no presente trabalho, medir a evapotranspiração de referência (ET_o) utilizando os minilísímetros com nível freático constante operando com Irrigâmetro®, bem como avaliar o efeito dos tratamentos no seu desempenho em relação aos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo o método Penman-Monteith FAO 56 considerado como padrão. Os dados foram coletados diariamente e analisados estatisticamente. Com base nos resultados, verificou-se que os métodos M30, Penman modificado, Radiação, lisímetro de drenagem e tanque Classe A apresentaram bom desempenho. Os métodos de pior desempenho foram os minilísímetros M15, M20, M25 e Hargreaves-Samani, não sendo recomendado seu uso para a estimativa de ET_o nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentarem menor exatidão e menor precisão. No método dos minilísímetros, verificou-se maior consumo de água no nível freático de 15 cm de profundidade. A bordadura utilizada nos minilísímetros como área-tampão não foi suficiente para evitar o efeito varal.

Palavras chave: Grama-batatais, requerimento de água, irrigação.

ABSTRACT

This investigation was carried out in the unit of research of the Irrigâmetro®, belonging to the Federal University of Viçosa, in Viçosa, state of Minas Gerais, Brazil. The experiments was conducted with the grass-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), using 16 minilysimeters with Irrigâmetro® and constant groundwater. In the experiments the research design was entirely randomized. The Irrigâmetro® was development in the UFV for the Management of irrigation. The treatments comprised of four constant groundwater tables (15, 20, 25 and 30 cm of dept), established in the minilysimeters (M15, M20, M25 and M30), with four repetitions. The purposes of this investigation were: to determine the reference evapotranspiration (ET_o), by means of the minilysimeters, with constant groundwater table and operating with Irrigâmetro®, as well as to evaluate their performance in relation to the modified Penman, Radiation, Hargreaves-Samani, pan and draining lysimeter methods. With the Penman-Monteith FAO 56 method being considered the standard method. The methods of M30, modified Penman, Radiation, draining lysimeter and Pan exhibited a good performance in the determination of the ET_o. The methods that exhibited the worst performance were the Hargreaves-Samani and the minilysimeters M15, M20, M25, not being recommended their use for the estimate of the ET_o, under conditions similar to those studied in this investigation, due

to their low precision and accuracy. The highest consumption of water occurred in the 15 cm groundwater table, decreasing with depth. The external cylinder used as borders in the minilysimeters as buffer-area were not sufficient to avoid the clothesline effect.

Key words: Grass-batatais, water requirements, irrigation.

RESUMEN

Este trabajo fue realizado en la Unidad de Pesquisa del Irrigâmetro® perteneciente a la Universidade Federal de Viçosa. Se instalaron 16 minilísimetros con nivel freático constante operando con Irrigâmetro® en los cuales fue sembrada la grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge), en delineamento completamente aleatorizado. El Irrigâmetro® es un aparato patentado por UFV para el manejo del agua en proyectos de irrigación. Los tratamientos fueron constituidos por cuatro niveles freáticos (15, 20, 25 e 30 cm) establecidos en los minilísimetros (M15, M20, M25 e M30), con cuatro repeticiones. Los objetivos en el presente trabajo, fueron medir la evapotranspiración de referencia (ET_o) utilizando los minilísimetros con nivel freático constante operando con Irrigâmetro®, como también evaluar el efecto de los tratamientos en su desempeño en relación a los métodos Penman modificado, Radiación, Hargreaves-Samani, tanque Clase A y al lisímetro de drenaje, siendo el método Penman-Monteith FAO 56 considerado como método Estándar. Con base en los resultados, se verifico que los métodos M30, Penman modificado, Radiación, lisímetro de drenaje y el tanque Clase A (Clase A) presentaron buen desempeño. Los métodos de peor desempeño fueron los minilísimetros M15, M20, M25 y Hargreaves-Samani, no siendo recomendado su uso para la estimativa de la ET_o en las condiciones semejantes a la de este estudio. El método de los minilísimetros, se verifico mayor consumo de agua en el nivel freático de 15 cm de profundidad; ese consumo decreció con mayores profundidades del nivel freático. La bordadura utilizada en los minilísimetros como área buffer no fue suficiente para evitar el efecto tendadero.

Palabras clave: Grama lengua de vaca, requerimientos de agua, riego.

INTRODUÇÃO

Nos sistemas de produção das fruteiras sob irrigação, o recurso água é o fator principal, e como o mesmo tem se tornado limitante por causa da implementação de novas áreas irrigadas ou por falta da disponibilidade de recursos hídricos, é imprescindível a necessidade de medidas do consumo hídrico das fruteiras que possibilitem o uso adequado dos recursos hídricos disponíveis, promovendo a conservação do meio ambiente.

O conhecimento e a quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, um parâmetro fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (Sedyama, 1996).

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície com vegetação durante determinado período. Pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, em período predeterminado (Bernardo *et al.*, 2005).

Doorenbos e Pruitt (1977) definiram ET_o como a taxa de evapotranspiração de uma superfície

extensa de grama de 8 a 15 cm de altura, uniforme, em ativo crescimento, sombreando completamente o solo sem limitação de água.

Smith (1991) propôs a adoção de uma definição padronizada para a evapotranspiração de referência. A ET_o seria aquela que ocorre em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características: altura de 12 cm, resistência de dossel de 69 s m⁻¹ e coeficiente de reflexão (albedo) de 0,23, que representaria a evapotranspiração de uma gramínea verde, de altura uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem estresse hídrico.

A evapotranspiração pode ser obtida por métodos indiretos, sendo usadas, dentre outras, as equações de Penman modificada, Radiação, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith FAO 56.

A equação original de Penman (1948) possui dois termos, a saber: o da energia (radiação) e o aerodinâmico (vento e umidade do ar). O procedimento utilizado por Doorenbos e Pruitt (1977), para a modificação do modelo de Penman, consistiu na substituição da função vento do modelo original pela função vento proposta por esses autores, a qual foi determinada a partir de medidas diretas da

ETo e outros elementos do clima, em várias regiões com diferentes tipos climáticos.

O método da Radiação proposto pela FAO tem sua origem na equação de Makkink, desenvolvida em 1957, sendo modificada por Doorenbos e Pruitt (1977) e Doorenbos e Kassam (1979), que substituíram os coeficientes da reta a e b da equação original por um parâmetro c, que é função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (Pereira *et al.*, 1997).

Hargreaves e Samani (1985) desenvolveram um método para a estimativa da ETo a partir de dados da radiação solar extraterrestre e da diferença entre a temperatura máxima e a mínima médias, isto provoca subestimações da ETo nas áreas de amplo rango diário de temperaturas e subestimações nas áreas onde a diferença entre temperaturas diurnas e noturnas são pequenas.

Segundo Allen *et al.* (1998), o método de Penman-Monteith inclui parâmetros relacionados à troca de energia e ao correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração) na vegetação uniforme e extensa. A maioria desses parâmetros pode ser calculada a partir de dados meteorológicos, e a equação pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração de qualquer cultura, conforme as resistências de superfície e aerodinâmica da cultura específica.

A estimativa da evapotranspiração também pode ser feita por meio dos evaporímetros, os quais podem ser classificados em dois tipos: com superfície da água fica livremente exposta (tanques de evaporação) e outros em que a evaporação ocorre em uma superfície úmida (atmômetros). Dentre os métodos do primeiro tipo, o mais utilizado é o tanque Classe A, no qual a evaporação é convertida em ETo com emprego do coeficiente do tanque (K_p), desenvolvido por Doorenbos e Pruitt (1977).

Uma alternativa que tem sido utilizada para a obtenção da evapotranspiração por meio de medidas diretas são os lisímetros. Segundo Aboukhaled *et al.* (1986), a palavra lisímetro é derivada do grego *lysis* e significa dissolução ou movimento, e *metron* significa mensurar. Os lisímetros são recipientes contendo solo, instalados no campo, com superfície coberta por vegetação, para cálculo da evapotranspiração de uma cultura ou, ainda, com superfície sem vegetação, para cálculo da evaporação num solo descoberto. Para

Bernardo *et al.* (2005) e Amorim (1998), o método do lisímetro de pesagem é o mais preciso e considerado, ainda, instrumento-padrão para a determinação da evapotranspiração de referência (ETo).

Segundo Howell *et al.* (1991) e Aboukhaled *et al.* (1986), os lisímetros utilizados em pesquisas de evapotranspiração podem ser agrupados em três categorias: (1) com lençol freático de nível constante; (2) de drenagem; e (3) de pesagem, onde a variação de massa do sistema é determinada por um mecanismo de pesagem.

O lisímetro de drenagem consiste de um tanque enterrado no solo que possui uma rede de tubulações no seu fundo, que conduz a água drenada até um recipiente para posteriormente fazer a medição do volume de água.

A evapotranspiração de referência por ele estimada deve ser em valores semanais, quinzenais ou mensais (Bernardo *et al.*, 2005). Já os lisímetros de pesagem são constituídos de uma caixa impermeável sob a qual é instalada uma célula de carga, cuja finalidade é medir seu peso, sendo a sua variação num determinado tempo a medida da evapotranspiração. A maior desvantagem do lisímetro de pesagem é seu alto custo, limitando seu uso na atividade agrícola e na pesquisa, envolvendo a estimativa da evapotranspiração de referência ou de uma cultura.

Nos lisímetros com lençol freático de nível constante, o nível da água é mantido em determinada profundidade. Devido à evapotranspiração, a água é translocada até a zona radicular, por capilaridade. A descida do nível freático causado por esse deslocamento é automaticamente compensada por um mecanismo flutuador, sendo a quantidade de água necessária para repor esse nível, medida também automaticamente (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Segundo Mañas e Valero (1993) e Aboukhaled *et al.* (1986), uma limitação importante quanto ao uso de lisímetros com lençol freático de nível constante está associada aos problemas freqüentes com os flutuadores e ao desnível dos dispositivos de leitura-alimentação, interferindo diretamente nos cálculos da evapotranspiração. Outra limitação mencionada, quanto ao uso deste tipo de lisímetro está associada à presença do nível freático, o qual não representa as condições da parcela em seu entorno, provocando um crescimento maior da cultura dentro dos lisímetros que, em consequência disso, fica

mais exposta à radiação e aos efeitos do vento, superestimando a evapotranspiração em até 10 ou 20%.

A maioria desses métodos requer, além de pessoal especializado, para seu manuseio, instrumentos que geralmente são caros, e outros que se caracterizam por ser volumosos e pesados, limitando seu uso a um só local, razão pela qual a grande maioria dos produtores rejeita esses métodos. O uso do Irrigâmetro[®] desenvolvido acoplado ao minilísimetro se apresenta como uma ferramenta de grande valia, por ser de fácil manuseio, econômico, de fácil mobilidade e não requerer cálculos complexos, o que facilita sua utilização pelos produtores. Os objetivos deste trabalho foram: estimar a evapotranspiração de referência (ET_o), utilizando minilísimetros com nível freático constante operando com Irrigâmetro[®], preenchidos com substrato de areia e alimentado com solução nutritiva; estudar o efeito do nível freático (15, 20, 25 e 30 cm) sobre a ET_o; e avaliar seu desempenho em relação aos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A e o lisímetro de drenagem, sendo considerado como padrão o método Penman-Monteith FAO 56.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Unidade de Pesquisa e Desenvolvimento do Irrigâmetro[®], pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, localizada na cidade de Viçosa, Minas Gerais, com 20° 45' de latitude sul, 42° 45' de longitude oeste e altitude de 651 m. A temperatura média anual de Viçosa é de 19 °C. A umidade relativa do ar é, em média, de 80% e a precipitação média anual é de 1.341 mm, com estações seca e chuvosa bem definidas. O clima da região é do tipo Cwa, segundo a classificação climática proposta por Köeppen, isto é, subtropical, com inverno seco (Pereira *et al.*, 2002).

Descrição do minilísimetro operando com Irrigâmetro[®]

O minilísimetro foi construído com um tubo de PVC de 60 cm de altura, com 450 mm de diâmetro, dentro do qual foi instalado, de maneira concêntrica, outro tubo de PVC, de mesma altura e 250 mm de diâmetro, com área interna de 0,0468 m², no qual foi feito o controle da água consumida pela grama-batatais (Figura 1). O minilísimetro foi



Figura 1. Detalhe da instalação do minilísimetro com lençol freático constante e do Irrigâmetro[®].

assentado sobre um estrado de madeira com 15 cm de altura e coberto com uma telha transparente de fibra de vidro, com espessura de 2 mm, localizada 50 cm acima da sua borda cuja função é evitar a entrada da água da chuva que possa causar erro no cálculo da ETo.

Uma mangueira de polietileno de 20 mm conectou o fundo do cilindro interno com o Irrigâmetro[®], construído com tubo de PVC de 75 mm de diâmetro e 1 m de altura. O Irrigâmetro[®] utiliza o princípio de Mariotte, tendo sido usado para manter o nível freático constante no minilísimetro, fazendo a reposição da água e fornecendo o valor da lâmina evapotranspirada. A água deslocada no Irrigâmetro[®] foi quantificada por meio de régua milimétrica, sendo a sensibilidade de leitura igual a 0,086 mm, definida pela relação entre as áreas da seção transversal do tubo de alimentação do Irrigâmetro[®] e do cilindro interno do minilísimetro.

No preenchimento dos minilímetros foi colocada, inicialmente, uma camada de brita 0, com espessura de 5 cm, sobre a qual foi sobreposta uma camada de 5 cm de brita 1, acima da qual foi colocada uma camada de 45 cm de substrato de areia com granulometria entre 0,104 e 1,000 mm. A análise granulométrica da areia foi realizada no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados no Quadro 1.

Descrição do lisímetro de drenagem

Na área experimental foram instaladas três lisímetros de drenagem, construídos com caixas de cimento-amianto, com as seguintes dimensões: 1,10 m de largura, 1,60 m de comprimento e 0,70 m de profundidade, com área interna de 1,6845 m². Na instalação dos lisímetros, as bordas das caixas ficaram 5 cm acima da superfície do solo. O sistema de

drenagem desses lisímetros foi constituído de uma camada de brita zero, com espessura de 5 cm, sobre a qual foi sobreposta uma camada de 5 cm de brita 1. No fundo da caixa foi instalada uma rede de drenagem formada por tubos de PVC de 20 mm, com perfurações de 1 mm, conectada a uma estação de coleta da água drenada.

Os lisímetros de drenagem foram preenchidos com material de solo classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo (LV), distribuído em camadas de 10 cm até a espessura total de 70 cm, incluindo as camadas de brita e areia. No início da pesquisa foi feita uma calagem com base no resultado da análise química do solo. A adubação dos lisímetros de drenagem foi feita mensalmente com aplicação de 20 g m⁻² do fertilizante da formulação NPK 10-10-10. As análises granulométrica e química e a curva de retenção de água no solo foram realizadas nos Laboratórios de Rotina e de Física de Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, cujos resultados são apresentados nos Quadros 2, 3 e 4, respectivamente.

Os lisímetros de drenagem foram irrigados diariamente pela superfície, utilizando-se um volume de água suficiente para promover uma pequena drenagem.

Segundo Aboukhaled *et al.* (1986), a evapotranspiração da cultura pode ser calculada pela seguinte equação:

$$ET_0 = P + I - D \quad (1)$$

em que:

ET₀ = Evapotranspiração de referência no período, mm;

P = Precipitação no período, mm;

I = Lâmina de irrigação no período, mm; e

D = Lâmina de água drenada no período, mm.

Quadro 1. Distribuição granulométrica do substrato de areia.

Granulometria (%)	Valores
Areia grossa	93
Areia Fina	4
Silte	0
Argila	3
Massa Específica (g cm ⁻³)	
Partículas	2,85
Solo	1,50

Quadro 2. Resultados da análise física do solo.

Granulometria (%)	Valores
Areia grossa	15
Areia Fina	8
Silte	0
Argila	77
Massa Específica (g cm ⁻³)	
Partículas	2,62
Solo	0,99

Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os tratamentos foram constituídos por quatro níveis freáticos constantes, estabelecidos nos minilímetros, iguais a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade (M15, M20, M25 e M30), com quatro repetições.

Condução do experimento

O trabalho foi desenvolvido durante o período compreendido entre julho e dezembro de 2005. Dentro e ao redor dos minilímetros com lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®] e dos lisímetros de drenagem foi cultivado com grama-batatais (*Paspalum notatum* Flugge). Os minilímetros de lençol freático constante foram abastecidos com solução nutritiva inicial, descrita no

Quadro 5, até atingir os níveis freáticos estabelecidos, sendo o reabastecimento feito com a solução nutritiva descrita no Quadro 6. Tanto a solução nutritiva inicial quanto a de reabastecimento foram formuladas de acordo com Martinez e Silva (2004), Silva (2004) e Ruiz (1997).

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

A vegetação total contida em cada minilímetro e lisímetro de drenagem foi cortada sempre que atingia 15 cm de altura. Para isso, adaptou-se um suporte de metal a uma tesoura para que o corte fosse feito uniformemente, a 8 cm de altura, sendo realizadas 10 podas durante o período experimental.

A estimativa da evapotranspiração nos minilímetros foi feita diretamente no Irrigâmetro[®], diariamente às nove horas da manhã.

Os elementos climáticos diários foram obtidos na Estação Climatológica Principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, próximo à área experimental.

Quadro 3. Resultados da análise química do solo.

pH	H ₂ O	4,79
P	mg dm ⁻³	1,00
K	mg dm ⁻³	13,00
Ca	mg dm ⁻³	0,32
Mg	mg dm ⁻³	0,08
Al	mg dm ⁻³	0,59
H+Al*	cmol _c dm ⁻³	6,40
SB*	cmol _c dm ⁻³	0,43
CTC*	cmol _c dm ⁻³	1,02
MO*	dag kg ⁻¹	2,66
V*	%	6,30

* H+Al = Acidez Total, SB = Soma de Bases Trocáveis, CTC = Capacidade de Troca Catiônica Efetiva, MO = Matéria Orgânica e V = Índice Saturação de Bases.

Quadro 4. Valores de umidade do solo, em diferentes potencias matriciais

Potencial Matricial (MPa)	Umidade do solo (kg kg ⁻¹)
-0,01	0,429
-0,03	0,378
-0,05	0,294
-0,10	0,286
-0,20	0,257
-0,50	0,244
-1,50	0,239

Quadro 5. Fontes de nutrientes utilizadas para compor a solução nutritiva inicial, empregada dos minilímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro[®].

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 ₂₄	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		

Quadro 6. Conjunto de fontes de nutrientes (g L⁻¹) utilizados para compor a solução nutritiva empregada no reabastecimento dos lisímetros de lençol freático constante operando com Irrigâmetro®.

Sal	Conjunto 1		Sal	Conjunto 2	
	A	B		A	B
	g L ⁻¹			g L ⁻¹	
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 ₂₄	0,09		MgSO ₄		49,20
ZnSO ₄	0,57		NH ₄ H ₂ PO ₄		23,00
FeCl ₃		10,81			
Na ₂ EDTA		14,89			

Durante a condução do experimento houve presença de formigas e lagartas (*Spodoptera* spp.), as quais foram controladas com aplicações de deltametrina e clorpirifós etil. Semanalmente, foi feita a limpeza manual do gramado dentro e fora dos dispositivos lisimétricos, para controle de plantas invasoras, especialmente *Cyperus* spp.

Avaliação

As determinações da evapotranspiração de referência (ET_o) foram obtidas com uso dos métodos Penman Monteith FAO 56, Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e minilímetros.

A metodologia utilizada para a avaliação do desempenho dos métodos estudados foi proposta por Allen *et al.* (1989) e adotada por Jensen *et al.* (1990), fundamentada no erro-padrão da estimativa (EPE), sendo considerado o método Penman-Monteith FAO 56 como padrão.

O EPE é dado pela seguinte expressão:

$$EPE = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

em que:

EPE = erro-padrão da estimativa, mm d⁻¹;
 y = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;
 \hat{y} = evapotranspiração de referência estimada por cada método utilizado, mm d⁻¹; e
 n = número de observações.

A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância “d”, do coeficiente de determinação (r²) e do coeficiente (a) e (b) das respectivas regressões lineares. A melhor alternativa foi aquela que apresentou menor EPE, maior índice “d” e maior r². A precisão é dada pelo coeficiente de determinação que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à reta, ou seja, o erro aleatório. A exatidão está relacionada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados.

Matematicamente, a exatidão é dada pelo índice de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (Willmott *et al.*, 1985). A faixa de valores do índice d varia de zero, para completa dispersão entre os valores a 1 para perfeita concordância.

O índice é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left[(|P_i - O_i|) + (|O_i - \bar{O}|) \right]^2} \quad (3)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;
 O_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹;
 P_i = evapotranspiração de referência obtida pelos demais métodos, mm d⁻¹; e
 \bar{O} = média dos valores de ET_o obtida pelo método-padrão, mm d⁻¹.

A análise foi feita com dados diários e médios de 3, 5, 7 e 10 dias da ET_o, durante um período de 156 dias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 7 está apresentada a classificação dos métodos avaliados de acordo com seu desempenho, os coeficientes a e b da regressão linear, do erro-padrão da estimativa (EPE), do índice de concordância (d) e do coeficiente de determinação (r^2), para os valores diários ETo.

No Quadro 7, verifica-se que os valores de EPE, com base em valores diários de ETo, variaram de 0,383 a 1,360 mm d⁻¹. O menor valor de EPE ocorreu para o método Penman modificado e o maior valor, para o método M15. O erro-padrão da estimativa (EPE) representa uma variação média dos valores de evapotranspiração de referência estimados pelo método considerado em relação aos valores obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

A ordem de classificação dos métodos de determinação da ETo foi feita com base nos valores de EPE, conforme descrito por Allen *et al.* (1998). Sendo assim, o método Penman modificado o que melhor estimou a ETo diária seguido do método da Radiação.

O método Penman modificado apresentou o maior valor para o índice “d” (0,916), confirmando melhor concordância com os valores de ETo medidos pelo método-padrão. Os métodos da Radiação, tanque Classe A, lisímetro de drenagem e o minilísímetro M30 apresentaram um índice “d” de 0,857; 0,787; 0,726; e 0,707, respectivamente. Já os métodos Hargreaves-Samani, M25, M20, M15 apresentaram os mais baixos valores de índice “d” de 0,683; 0,663;

0,640 e 0,597, respectivamente.

Os altos valores de coeficientes de determinação encontrados nos métodos Penman modificado e Radiação indicaram um bom ajuste entre os valores diários da evapotranspiração de referência estimados com esses métodos e os valores estimados pelo método Penman-Monteith FAO 56. Os menores valores do coeficiente de determinação obtidos com os demais métodos estudados podem ser explicados pela pouca sensibilidade desses métodos para obtenção de valores diários de ETo.

Na Figura 2 são apresentados os valores diários de ETo obtidos pelos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilísímetros, para as quatro profundidades freáticas estudadas, comparativamente aos valores diários de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

Pode-se verificar, na Figura 2, que as melhores concordâncias entre os valores da evapotranspiração estimada pelos métodos Penman modificado e Radiação. A linha representativa das equações dessas regressões, em relação ao método Penman-Monteith FAO 56, foram as que mais se aproximaram da respectiva linha 1:1; entretanto, esses métodos superestimaram a evapotranspiração de referência, principalmente para os maiores valores de evapotranspiração de referência e subestimaram para os menores valores de ETo. Esse fato pode ser explicado, no caso do método Penman modificado, pelo empirismo na função do vento, a qual originalmente foi desenvolvida para grama nas

Quadro 7. Classificação dos métodos avaliados de acordo com o seu desempenho, os coeficientes (a) e (b) da regressão linear, erro-padrão de estimativa (EPE), índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), para valores diários de ETo (mm dia⁻¹).

Método	Classificação	Valores diários de ETo (mm dia ⁻¹)				
		a	b	EPE	d	r^2
Penman modificado	1	-0,831	1,315	0,383	0,916	0,973
Radiação	2	0,000	1,114	0,553	0,857	0,910
Hargreaves-Samani	6	0,918	0,997	1,027	0,683	0,810
Lisímetro de drenagem	5	0,718	0,650	0,917	0,726	0,386
Tanque Classe A	3	0,000	0,861	0,723	0,787	0,950
Minilísímetro M15*	9	1,144	0,955	1,360	0,597	0,522
MiniLisímetro M20*	8	1,038	0,909	1,159	0,640	0,526
MiniLisímetro M25*	7	1,032	0,862	1,069	0,663	0,502
MiniLisímetro M30*	4	0,702	0,889	0,898	0,707	0,543

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade .

condições da Inglaterra, e no caso do método Radiação pelo fator de ponderação, que representa as condições do vento e umidade que podem superestimar os valores da evapotranspiração (Garcia *et al.*, 2004; Rana e Katerji, 2000; Sedyama, 1996a; Cuenca e Nicholson, 1982), manifestando a dificuldade da utilização desses métodos e destacando a importância da necessidade da calibração para cada localidade.

Na Figura 2, nota-se a superestimativa da evapotranspiração de referência pelo método Hargreaves-Samani, certamente em decorrência do fato de esse método ser baseado somente na temperatura do ar. Além disso, esse método foi desenvolvido para condições áridas. Resultados semelhantes foram obtidos por Gavilán *et al.* (2006) na região sul da Espanha. Camargo e Sentelhas (1997), em três locais do Estado de São Paulo, encontraram superestimativas de ETo pelo método de Hargreaves-Samani em relação aos valores estimados por Penman-Monteith FAO 56.

No caso dos minilímetros, observou-se que,

em todos os níveis freáticos constantes estudados, a tendência foi superestimar a ETo em relação aos valores obtidos pelo método-padrão. Contudo, o M30 foi o mais preciso e exato em relação ao M15, M20 e M25, além de superar o desempenho dos métodos lisímetro de drenagem e Hargreaves-Samani, sendo superado seu desempenho ligeiramente pelo tanque Classe A.

Na Figura 2, as linhas de tendência da regressão dos métodos tanque Classe A e lisímetro de drenagem ilustram uma subestimativa da evapotranspiração. Esses resultados estão coerentes com os descritos por vários autores (Amorim, 1998; Mañas y Valero, 1993; Sedyama, 1990; Doorenbos e Pruitt, 1977), os quais não recomendam o uso do lisímetro de drenagem e tanque Classe A para medições diárias de ETo, devido à sua pouca sensibilidade para estimativa da evapotranspiração em períodos curtos de tempo.

No Quadro 8 está apresentada a classificação dos métodos avaliados de acordo com seu desempenho, os coeficientes a e b da regressão linear,

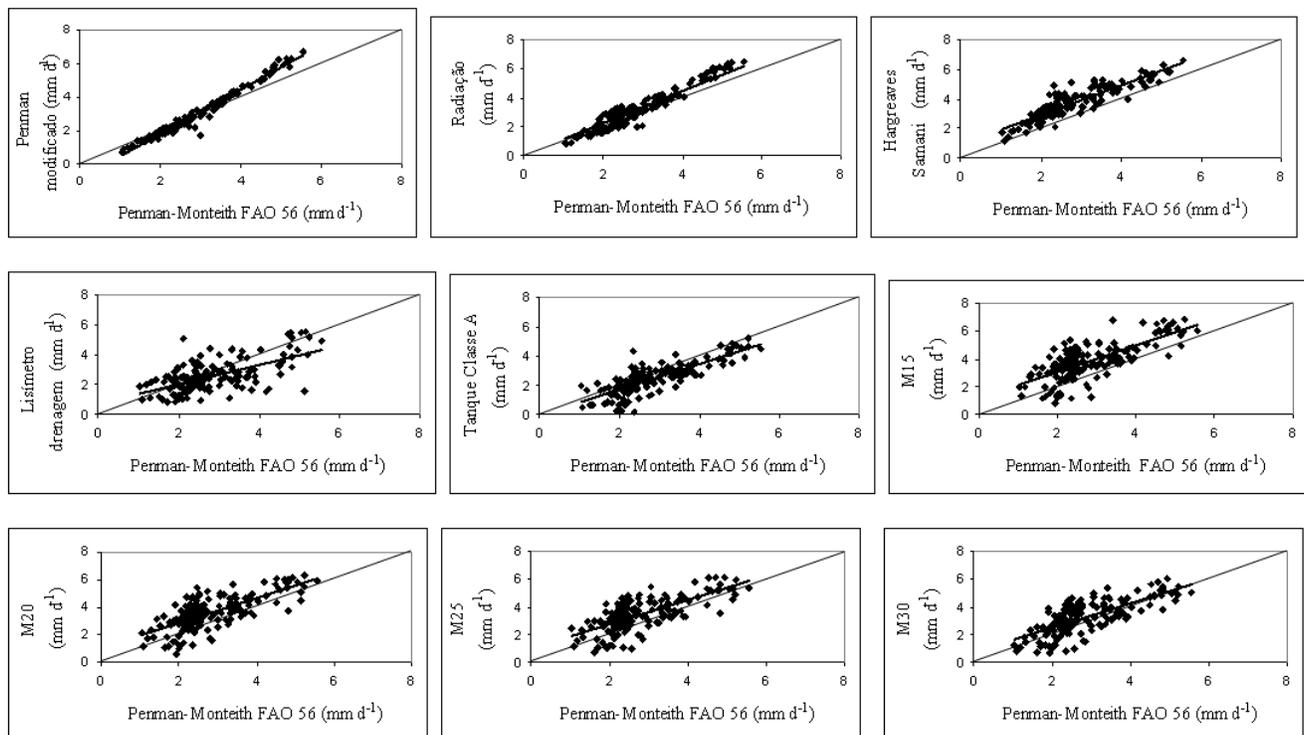


Figura 2. Valores diários de ETo obtidos pelos métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves-Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros, nas quatro profundidades freáticas estudadas, comparativamente aos valores diários de ETo obtidos pelo método Penman-Monteith FAO 56.

o erro-padrão da estimativa (EPE), o índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), nos períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias.

A classificação dos métodos de determinação da ETo nos períodos de 3, 5, 7 e 10 dias, em geral, foi a mesma observada nos valores diários, tendo o método Penman modificado apresentado o melhor

Quadro 8. Classificação dos métodos avaliados de acordo com o seu desempenho, os coeficientes (a) e (b) da regressão linear, erro-padrão de estimativa (EPE), índice de concordância (d) e o coeficiente de determinação (r^2), nos períodos de tempo de 3, 5, 7 e 10 dias

Método	Classificação	Períodos de 3 Dias				
		a	b	EPE mm d ⁻¹	d	r^2
Penman modificado	1	0,000	1,048	0,292	0,932	0,993
Radiação	2	0,000	1,104	0,461	0,865	0,989
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,319	1,011	0,660	0,992
Lisímetro drenagem	4	0,000	0,909	0,648	0,774	0,954
Tanque Classe A	3	0,000	0,868	0,534	0,825	0,984
Minilímetro M15*	9	0,000	1,334	1,287	0,580	0,950
Minilímetro M20*	8	0,000	1,249	1,092	0,621	0,955
Minilímetro M25*	6	0,000	1,201	0,984	0,643	0,954
Minilímetro M30*	5	0,000	1,123	0,795	0,695	0,957
Períodos de 5 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,045	0,274	0,929	0,994
Radiação	2	0,000	1,102	0,439	0,857	0,990
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,332	1,030	0,596	0,994
Lisímetro drenagem	4	0,000	0,917	0,565	0,770	0,966
Tanque Classe A	3	0,000	0,873	0,464	0,828	0,988
Minilímetro M15*	9	0,000	1,337	1,270	0,551	0,962
Minilímetro M20*	8	0,000	1,254	1,078	0,591	0,958
Minilímetro M25*	6	0,000	1,206	0,975	0,616	0,956
Minilímetro M30*	5	0,000	1,127	0,767	0,674	0,961
Períodos de 7 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,042	0,253	0,933	0,995
Radiação	2	0,000	1,090	0,434	0,853	0,989
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,334	1,025	0,499	0,996
Lisímetro drenagem	4	0,000	0,920	0,475	0,620	0,977
Tanque Classe A	3	0,000	0,869	0,450	0,824	0,992
Minilímetro M15*	9	0,000	1,334	1,254	0,553	0,964
Minilímetro M20*	8	0,000	1,250	1,058	0,592	0,960
Minilímetro M25*	6	0,000	1,201	0,958	0,615	0,958
Minilímetro M30*	5	0,000	1,123	0,753	0,673	0,962
Períodos de 10 Dias						
Penman modificado	1	0,000	1,040	0,245	0,932	0,995
Radiação	2	0,000	1,097	0,395	0,862	0,993
Hargreaves-Samani	7	0,000	1,337	1,034	0,581	0,996
Lisímetro drenagem	3	0,000	0,912	0,419	0,830	0,985
Tanque Classe A	4	0,000	0,867	0,446	0,816	0,993
Minilímetro M15*	9	0,000	1,342	1,278	0,528	0,965
Minilímetro M20*	8	0,000	1,257	1,078	0,570	0,961
Minilímetro M25*	6	0,000	1,211	0,971	0,594	0,960
Minilímetro M30*	5	0,000	1,128	0,747	0,660	0,965

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

desempenho para estimar a ETo, comparativamente ao método-padrão. Isso pode ser explicado pelo fato de esses dois métodos utilizarem a mesma base física, combinando os termos energético e aerodinâmico. O segundo melhor método foi da Radiação, o qual está fundamentado no termo energético, não levando em consideração as condições do vento e da umidade do ar. Jensen *et al.* (1990) recomendaram o uso do método Penman e da radiação para estimativa diária e quinidial da ETo, respectivamente.

No Quadro 8 pode-se verificar uma diminuição progressiva dos valores de erro-padrão da estimativa e aumento do coeficiente de determinação quando o período de observação variou de três a sete dias para o método tanque Classe A. Isso era esperado por causa da redução das flutuações diárias que permite uma melhoria nesses índices estatísticos quando se aumenta de tempo. Segundo Jensen *et al.* (1990), o método do tanque Classe A é recomendado para melhor ajuste com dados médios de cinco dias, sendo que sua aplicação em períodos de tempo diferentes pode reduzir a sua precisão e exatidão.

No Quadro 8, pode-se verificar que o desempenho do lisímetro de drenagem foi melhorando com o agrupamento dos valores de ETo em períodos maiores, notadamente no período de 10 dias, quando apresentou a terceira melhor colocação. Isso pode ser explicado pela superação da inércia apresentada por esses dispositivos em relação à sua drenagem, que ocorre quando a ETo é medida em períodos menores. Silva (1996) e Mañas e Valero (1993) recomendaram o uso do lisímetro de drenagem para a estimativa da ETo em períodos iguais ou superiores a sete dias.

No Quadro 8, pode-se notar que, durante os períodos de 3, 5, 7 e 10 dias, os minilímetros e o método Hargreaves-Samani foram os que apresentaram os mais altos valores de EPE e os mais baixos valores do índice “d” e do coeficiente de determinação. No entanto, dentre eles destaca-se o M30, que teve a melhor precisão e exatidão.

No caso dos M15, M20 e M25, a superestimativa da ETo em relação ao método padrão pode ser explicada pelas condições de maior exposição da grama-batatais à radiação e, principalmente, ao vento, visto que a superfície da grama ficou posicionada a 75 cm de altura. Isso evidencia que a bordadura oferecida pelo cilindro externo do minilímetro, desempenhando o papel de

área-tampão, foi insuficiente para manter um microambiente que pudesse evitar ou minimizar o efeito do vento e da radiação. No entanto, no M30, o efeito buquê, da radiação e principalmente o efeito varal foram notadamente amenizados, possivelmente, por uma menor disponibilidade de água no perfil do substrato devido ao fato de o plano freático estar a maior profundidade.

Segundo Mañas e Valero (1993) e Allen e Pruitt (1991), a altura da grama na área efetiva dos lisímetros e na área circunvizinha deve ser homogênea, para evitar diferenças na evapotranspiração.

As diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, provocam uma perturbação no movimento horizontal do ar e aumentam o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, resultando em maior transpiração da vegetação. A interceptação da radiação solar incidente aumenta numa proporção que pode chegar a 40% (Sediyama, 1996b). No caso do método Hargreaves-Samani, a superestimativa da ETo indicou que ele não se adapta às condições de Viçosa. O baixo desempenho está em desacordo com a sugestão de Allen *et al.* (1998), que recomendaram a utilização do método Hargreaves-Samani na estimativa da evapotranspiração com dados médios de sete dias.

Nas Figuras 3 a 6, apresentam-se os gráficos resultantes da regressão linear, passando pela origem, para os valores médios de ETo de 3, 5, 7 e 10 dias, respectivamente. Verificaram-se novamente as melhores concordâncias entre os valores da evapotranspiração estimados pelos métodos Penman modificado e Radiação. As retas representativas das equações de regressão para esses dois métodos foram as que mais se aproximaram da linha 1:1, observando-se menor dispersão em torno da linha de tendência, devido à suavização no comportamento das variáveis meteorológicas promovidas pelo uso da média; no entanto, ainda se verifica ligeira tendência desses modelos superestimarem a ETo para maiores valores de evapotranspiração.

Na Figuras de 3 a 6, pode-se observar que as linhas de tendência da regressão dos métodos tanque Classe A e lisímetro de drenagem continuaram subestimando a evapotranspiração em relação aos valores estimados pelo método Penman-Monteith

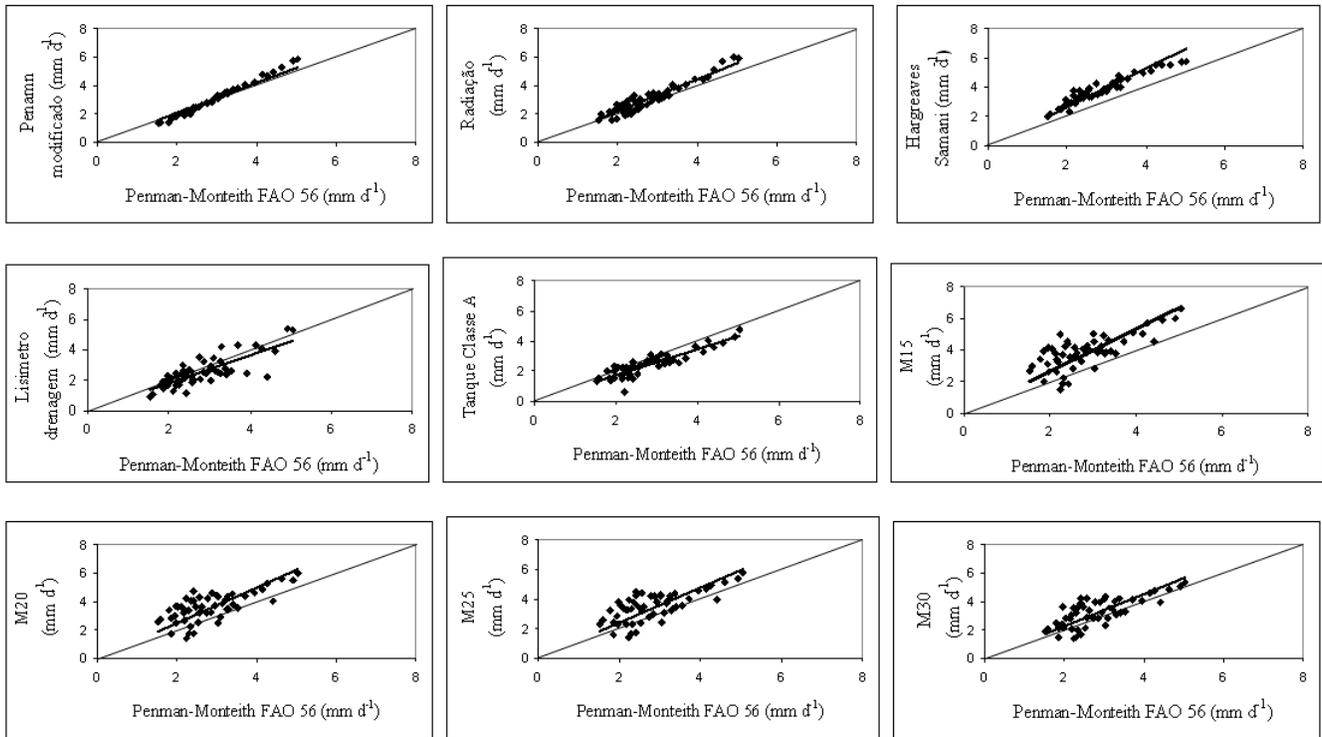


Figura 3. Relações entre ETo determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de três dias

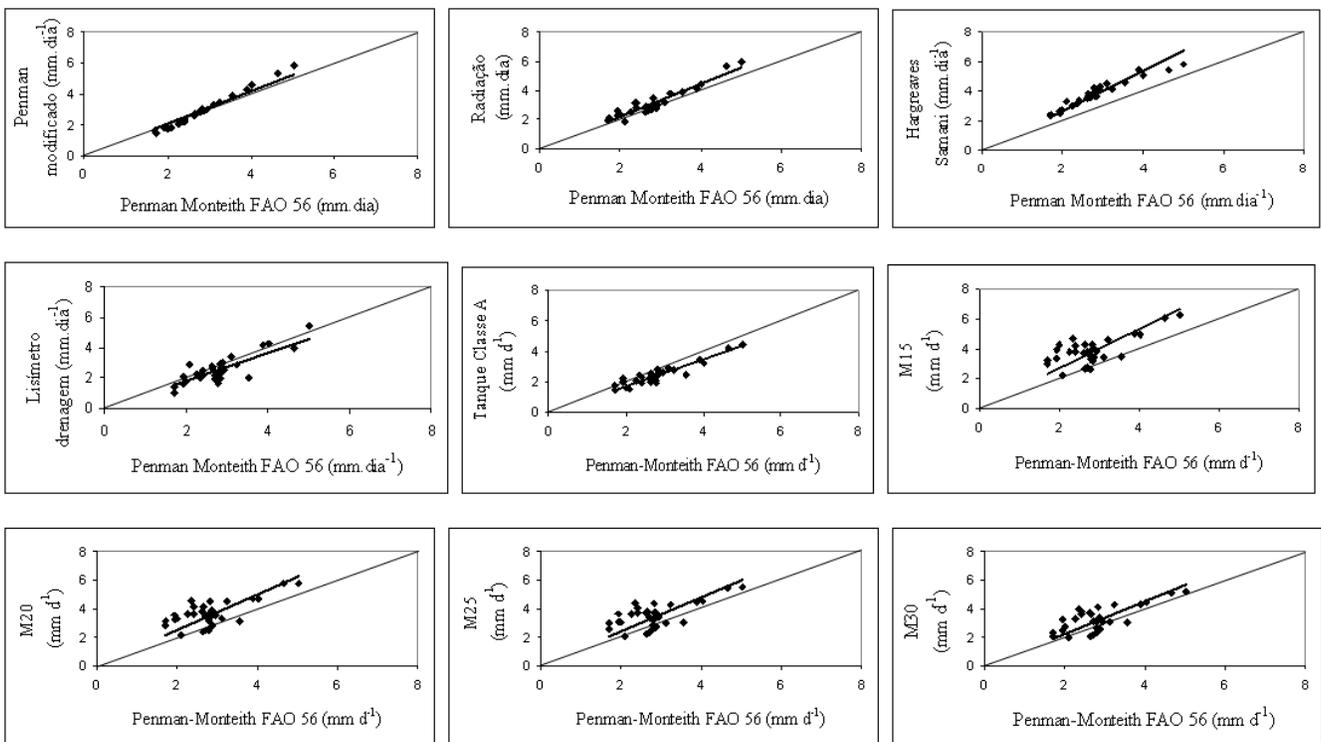


Figura 4. Relações entre ETo determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de cinco dias.

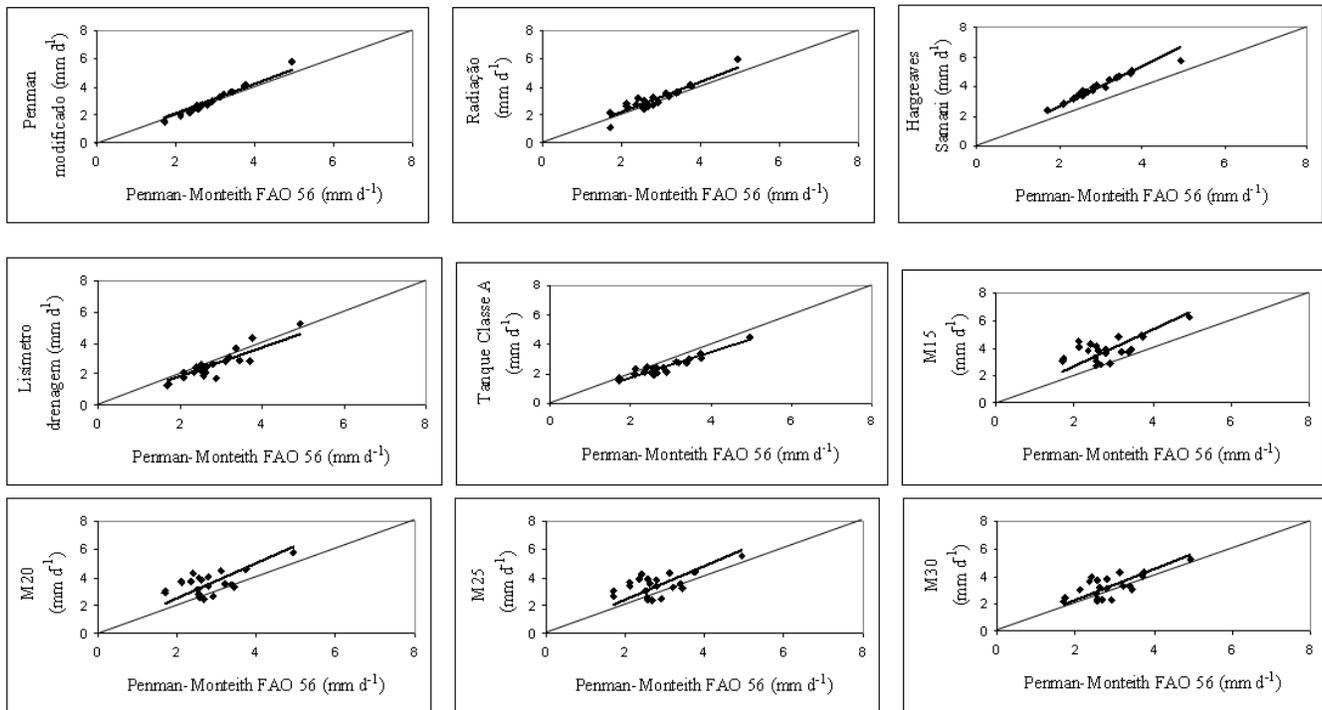


Figura 5. Relações entre ETo determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de sete dias.

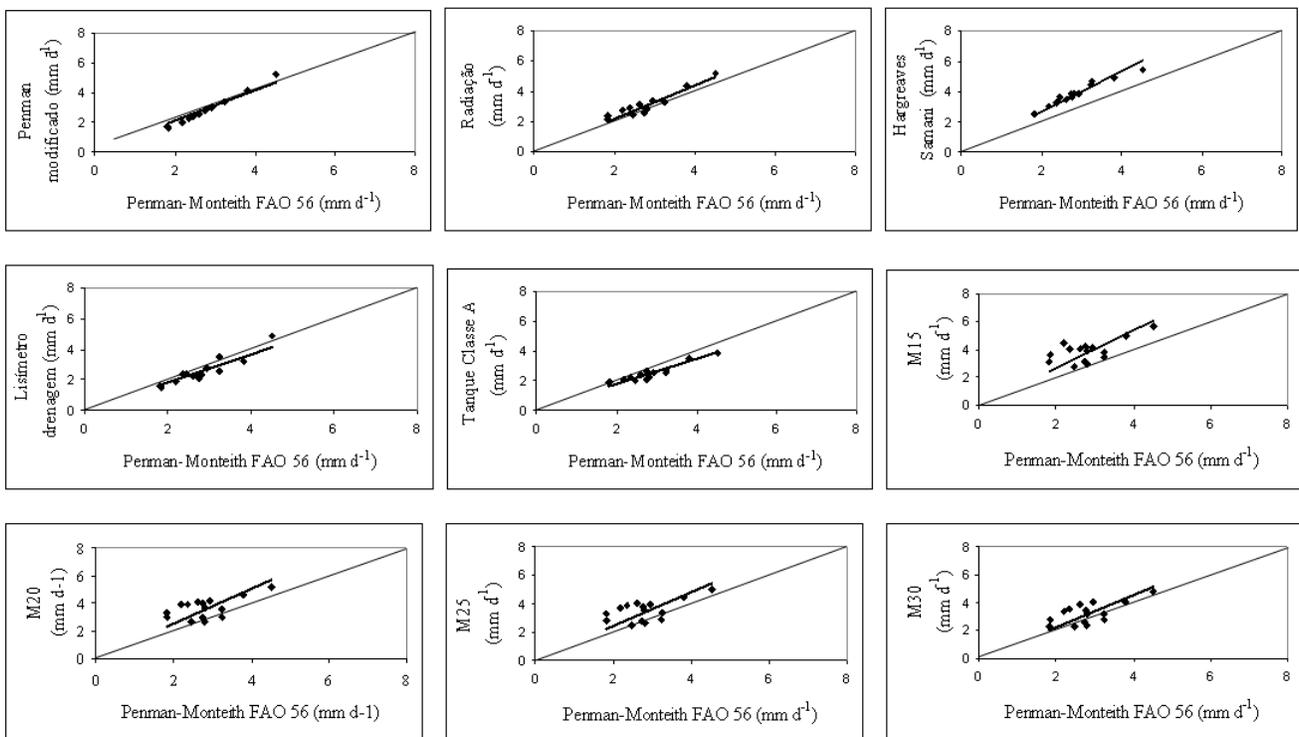


Figura 6. Relações entre ETo determinada pelo método Penman Monteith FAO 56 e os métodos Penman modificado, Radiação, Hargreaves e Samani, lisímetro de drenagem, tanque Classe A e minilímetros com lençol freático constantes nas profundidades de 15, 20, 25 e 30 cm, nos períodos de 10 dias.

FAO 56. Nota-se também, nessas figuras, que o método Hargreaves-Samani e os minilímetros, de maneira geral, apresentaram tendência de superestimar a ETo nos períodos analisados, tendo por base o método-padrão. Cuenca e Nicholson (1982) afirmaram que o método Hargreaves-Samani não é produto de uma análise teórica e, portanto, representa puramente empirismo. Métodos empíricos geralmente produzem resultados satisfatórios nos locais nos quais foram calibrados, e em locais de clima semelhante, mas não são válidos numa gama ampla de climas.

No Quadro 9, encontram-se os valores da evapotranspiração acumulada no período de estudo para todos os métodos estudados, inclusive o padrão.

Observa-se, no Quadro 9, que o tanque Classe A e o lisímetro de drenagem subestimaram os valores de evapotranspiração em 13,7 e 9,5%, respectivamente. Já os métodos Hargreaves-Samani, M15, M20, M25, M30, Radiação e Penman modificado superestimaram os valores de evapotranspiração em 32,2%, 36,0%, 27,7%, 22,6%, 13,7%, 9,4% e 2,2%, respectivamente.

O desempenho dos milímetros observado neste trabalho está de acordo com Allen e Fischer (1990), que encontraram uma superestimativa de 45% da ETo medida em dois lisímetros de pesagem em relação ao método Penman-Monteith, a qual foi atribuído ao fato de a grama estar 45 cm mais alta em comparação com a altura da cultura hipotética (10 cm). Aboukhaled *et al.* (1986) relataram aumentos na ordem de 10% a 30% da evapotranspiração da grama mantida de 7 a 15 cm mais alta que a normalmente utilizada (10 cm), atribuindo esses resultados

principalmente ao efeito varal e à maior incidência da radiação solar sobre os lisímetros.

Dentre os minilímetros, destaca-se o M30 por apresentar menor superestimativa da ETo, observando-se, também, pequena diferença porcentual em relação ao método da Radiação.

Na Figura 7 está apresentada a relação entre a ETo acumulada e a profundidade freática, nos minilímetros. Observa-se, nessa figura, uma diminuição da evapotranspiração nos minilímetros à medida que aumenta a profundidade do lençol freático, sendo o M30 o que mais se aproximou da ETo determinada pelo método Penman-Monteith FAO 56. Segundo Grassi (1991), ao aumentar a profundidade do plano freático, diminui a taxa de movimento ascendente da água, sendo menor seu aporte ao processo de evapotranspiração. Assim, os maiores valores de evapotranspiração para as menores profundidades freáticas podem ser devidos ao elevado teor de água no sistema substrato-planta nos minilímetros, principalmente no nível freático a 15 cm de profundidade.

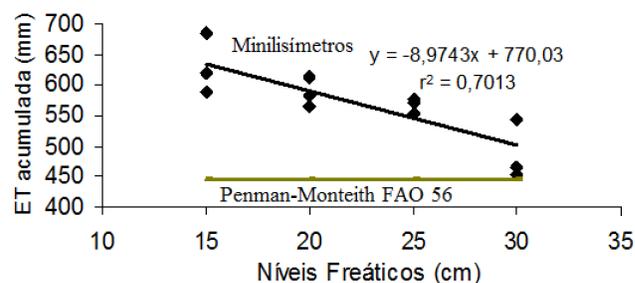


Figura 7. Relação entre a ETo acumulada e a profundidade freática nos minilímetros.

Quadro 9. Valores de evapotranspiração acumulada, medidos e estimados, durante o período experimental.

Método	ET média	ET acumulada	Variação
	mm d ⁻¹	mm	Porcentual da ETo
Penman-Monteith FAO 56	2,83	444,52	-
Penman modificado	2,89	454,23	2,2
Radiação	3,10	486,42	9,4
Hargreaves-Samani	3,74	587,55	32,2
Lisímetro de drenagem	2,56	402,10	-9,5
Tanque Classe A	2,46	383,80	-13,7
Minilímetro M15*	3,85	604,34	36,0
Minilímetro M20*	3,61	567,43	27,7
Minilímetro M25*	3,47	545,10	22,6
Minilímetro M30*	3,22	505,61	13,7

* M15, M20, M25 e M30: lençol freático a 15, 20, 25 e 30 cm de profundidade.

Dias Espejo y Knight (2005), avaliando minilísimetros de área exposta igual a 0,062 m² e solo com níveis de umidade diferentes, submetidos a condições de advecção, observaram uma evapotranspiração ligeiramente superior nos minilísimetros com maior teor de umidade, devido a um incremento no consumo de calor latente ocasionado pela advecção.

Diante dos resultados obtidos, há necessidade de se conduzirem estudos nos minilísimetros com níveis freáticos mais profundos, com a finalidade de obter valores mais precisos e exatos em relação ao método-padrão.

CONCLUSÕES

- Os métodos M30, Penman modificado, lisímetro de drenagem e tanque Classe A apresentaram bom desempenho.
- Os métodos com os piores desempenhos foram os minilísimetros M15, M20, M25 e Hargreaves-Samani, não sendo recomendado seu uso para a estimativa de ETo nas condições semelhantes às deste estudo, por apresentarem baixa exatidão e menor precisão.
- No método dos minilísimetros, verificou-se maior consumo de água no nível freático de 15 cm de profundidade; esse consumo decresceu com as maiores profundidades do lençol freático.

LITERATURA CITADA

Aboukhaled, A.; A. Alfaro y M. Smith. 1986. Los lisímetros. Roma. FAO Paper 39. 59 p.

Allen, R. G.; L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Guidelines for computing crop water requirements. Rome. FAO Paper Irrigation and drainage 56. 310 p.

Allen, R. G. and D. F. Fischer. 1990. Low-cost electronic weighing lysimeters. Transactions of the ASAE 33 (6): 1823-1833.

Allen, R. G. and W. O. Pruitt. 1991. Reference evapotranspiration factors. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 117 (5): 758-772.

Amorim, M. C. de. 1998. 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). Dissertação Mestrado em Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Minas Gerais, Brasil. 56 p.

Bernardo, S.; A. A. Soares e E. Mantovani. 2005. Manual de irrigação. 7. ed. Viçosa, MG: Editora UFV. 611 p.

Camargo, A. P. e P. C. Sentelhas. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia 5 (1): 89-97.

Cuenca, R. H. and M. T. Nicholson. 1982. Application of Penman equation wind function. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 108: 13-23.

Diaz Espejo, A. V. and R. Knight. 2005. Illustration of micro-scale advection using gridpattern minilysimeters. Agricultural and Forest Meteorology 129: 39-52.

Doorenbos, J. e A. H. Kassam. 1979. Efeito da água no rendimento das culturas. Rome. FAO Paper Irrigation and Drainage Paper 33. 221 p

Doorenbos, J. and J. O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Rome. FAO Paper Irrigation and Drainage Paper 24. 144 p.

Garcia, M.; D. Raes, R. Allen and C. Herbas. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). Agricultural and Forest Meteorology (La Paz) 125: 67-82.

Gavilán, P.; I. J. Lorite, J. Tornero and J. Berengena. 2006. Regional calibration of Hargreaves equation for estimating referente ET in a semiarid environment. Agricultural Water Management. 81 (3): 257-281.

Grassi, J. 1991. Drenaje de tierras agrícolas. Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras (CIDIAT). Mérida, Venezuela. 317 p.

Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Amer. Soc. Agric. Eng. Meeting, Chicago. Paper 85-2517.

- Howell, T. A.; A. D. Schneider and M. E. Jensen. 1991. History of lysimeter design and use for evapotranspiration. *In: Lysimeter for evapotranspiration and environment measurements.* New York: ASCE. p. 1-19.
- Jensen, M. E.; R. D. Burman and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE. New York, USA. 332 p.
- Mañas, F. M. y J. A. Valero. 1993. Agronomía del riego. La Universidad de Castilla-La Mancha. Ediciones Mundi-Prensa Madrid, España. 732 p.
- Martinez, H. E. e J. B. Da Silva. 2004. Introdução ao cultivo hidropônico de plantas. 2a. ed. Editora Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. 111 p.
- Penman, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London A193*: 120-146.
- Pereira, A. R.; L. R. Angelocci e P. C. Sentelhas. 2002. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Agropecuária Ltda. Guaíba, Rio Grande do Sul, Brasil. 478 p.
- Pereira, A. R.; N. A. Villa Nova e G. C. Sedyama. 1997. Evapotranspiração. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo, Brasil. 183 p.
- Rana, G. and N. Katerji. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13: 125-153.
- Ruiz, A. H. 1997. Relações molares de macronutrientes em tecidos vegetais como base para a formulação de soluções nutritivas. *Revista Ceres*, 44 (255): 533-546.
- Sedyama, G. C. 1990. Necessidade de água para os cultivos. Brasília: ABEAS. 143 p.
- Sedyama, G. C. 1996a. Estimativa da evapotranspiração: Histórico, evolução e análises crítica. *Revista Brasileira de Agroclimatologia* 4 (1): 1-12.
- Sedyama, G. C. 1996b. Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior (ABEAS) Brasília, Brasil. 173.
- Silva, D. F. 2004. Análises quantitativa e qualitativa do crescimento e desenvolvimento da grama-batatais e grama-esmeralda em diferentes lâminas de irrigação. Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Minas Gerais, Brasil. 48 p.
- Silva, F. C. 1996. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. Dissertação Mestrado em Agronomia. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. 68 p.
- Smith, M. 1991. Report on the expert consultation on revision of crop water requirements. Rome. FAO. 45 p.
- Willmott, C.J.; S. G. Ackleson, R. E. Davis, J. J. Johannes, J. Feddema, K. M. Klink, D. R. Legates, J. O'Donnell and C. M. Rowe. 1985. Statistics for evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research* 90 (C5): 8995-9005.